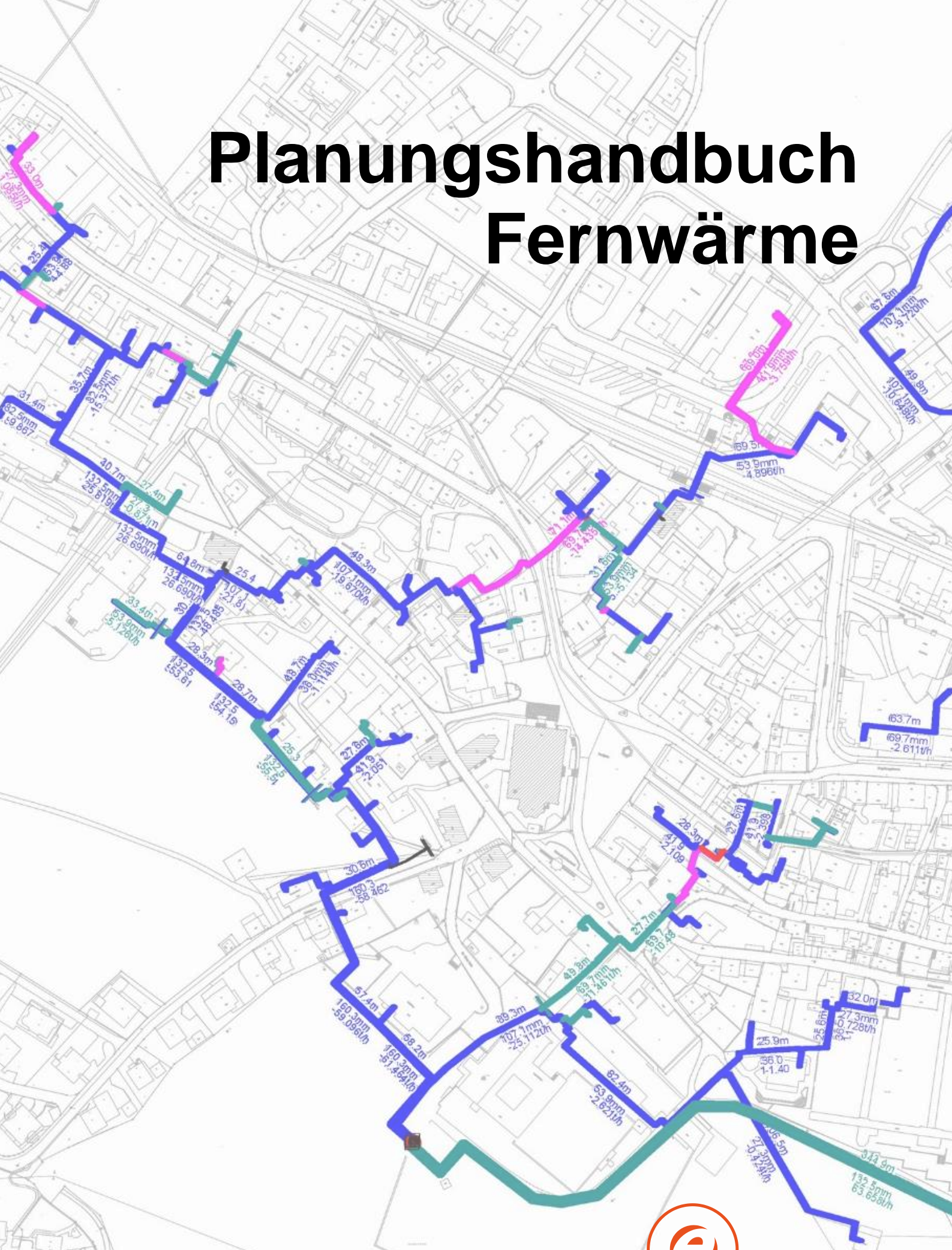


Planungshandbuch Fernwärme



Zweck und Motivation

Fernwärme ermöglicht die Nutzung von Abwärme sowie den Einsatz von erneuerbaren Energien und gewinnt deshalb zunehmend an Bedeutung. Das **Planungshandbuch Fernwärme** gibt eine Einführung in die technischen und betrieblichen Grundlagen zur Realisierung von Fernwärmenetzen und es soll dazu beizutragen, dass neue Fernwärmenetze effizient und ökonomisch ausgeführt und betrieben werden.

Zielpublikum

- Heizungsingenieure und Heizungsplaner,
- Tiefbauingenieure und im Rohrleitungsbau tätige Fachpersonen,
- Kaderleute in Planungsfirmen für Heizung, Haustechnik und Tiefbau,
- Mitarbeiter von Heizungsfirmen,
- Betreiber von Fernwärmenetzen.

Geltungsbereich

Das Planungshandbuch beschreibt die Grundlagen zu Planung, Ausführung und Optimierung der **Wärmeverteilung** und der **Wärmeübergabe** von **Fernwärmenetzen**. Die Ausführungen beschränken sich dabei auf folgende Anwendungsbereiche:

- Als Wärmeträgermedium dient flüssiges Wasser.
- Die Auslegung beschränkt sich auf direkt nutzbare Wärme mit Temperaturen ab 40°C.
- Die Wärmeverteilung erfolgt grossteils mit Kunststoffmantelrohren, wodurch die Dauerbetriebstemperaturen auf 120°C bis 140°C begrenzt werden.

Die Netzauslegung wird unabhängig von der Art der Wärmeerzeugung behandelt. Daneben werden die Techniken zur Wärmeerzeugung beschrieben und die Einflüsse zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung hingewiesen und auf die Besonderheiten von Energieholz, Abwärme und Umgebungswärme eingegangen. Die detaillierte Auslegung der Wärmeerzeugung ist aber nicht Gegenstand des vorliegenden Handbuchs.

Inhalt

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. Energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Das Planungshandbuch umfasst folgende Teile:

Teil 1 Grundlagen behandelt die Rahmenbedingungen, die Wärmebereitstellung, die Wärmeverteilung und die Wärmeübergabe und umfasst Basisinformationen, die in einer frühen Projektphase benötigt werden.

Teil 2 Planung und Berechnung behandelt die für die Ausführungsplanung erforderlichen Informationen. In Teil 2 werden Themen vertieft, die zum Teil in Teil 1 bereits eingeführt werden.

Teil 3 Optimierung beschreibt das Vorgehen zur Analyse bestehender Fernwärmenetze sowie zur Entwicklung von Massnahmen zu deren Optimierung.

Als Ergänzung zu den drei Hauptteilen beinhaltet der **Anhang** detaillierte Auslegungsdiagramme sowie Informationen zu Normen und Literatur.

Verantwortlichkeiten und Anwendung

Die Inhalte des Planungshandbuchs wurden auf Basis der Erfahrungen der Autoren und unter Verwendung der zitierten Fachliteratur aufgearbeitet. Die Bearbeitung wurde zudem durch Fachverbände und Branchenvertreter begleitet. Obwohl die Informationen nach bestem Wissen aufbereitet wurden, wird für deren Anwendung keine Haftung übernommen. Das Planungshandbuch soll als Basis für die Aus- und Weiterbildung dienen und regelmässig aktualisiert werden. Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge werden gerne entgegen genommen.

ISBN 3-908705-30-4

Version 1.2 vom 26. September 2018

Ersetzt Version 1.0 vom 6. April 2017

Ersetzt Version 1.1 vom 21. September 2017

Free-Download unter: www.qmfernwaerme.ch

Planungshandbuch Fernwärme

Autoren: Arbeitsgemeinschaft QM Fernwärme

Prof. Dr. Thomas Nussbaumer, Verenum, 8006 Zürich (Projektleiter)
Stefan Thalman, Verenum, 8006 Zürich
Andres Jenni, Ardens GmbH, 4410 Liestal
Joachim Ködel, Gruner Gruneko AG, 4020 Basel

Auftraggeber

Bundesamt für Energie

Patronat

VFS Verband Fernwärme Schweiz
SVGW Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches
SWKI Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren
suissetec Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband

Mitarbeit

Werner Betschart, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw
Walter Böhlen, Verband Fernwärme Schweiz VFS, 5443 Niederrohrdorf
Marc Burkard, Hoval AG, 8706 Feldmeilen
Marcel Büchler, ERZ Entsorgung + Recycling Zürich, 8050 Zürich
Lukas Bühler, Porta Ingenieure Planer Geometer, Porta AG, 3800 Interlaken
Michael Cueni, Triplex Energieplaner AG, 4450 Sissach
Robert Diana, Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband (suissetec), 8021 Zürich
Prof. Dr. Ludger Fischer, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw
Reto Gadola, SWKI, 6105 Schachen
Dr. Jürgen Good, QM Holzheizwerke®, 8006 Zürich
Andreas Hurni, Verband Fernwärme Schweiz VFS, 5443 Niederrohrdorf
Martin Jutzeler, Energie Wasser Bern EWB, 3001 Bern
Gerhard Oppermann, Verband Fernwärme Schweiz VFS, 4410 Liestal
Urs Peter, isoplus (Schweiz) AG, 8546 Islikon
Josef Rohner, LOGSTOR Schweiz AG, 8105 Regensdorf
Nathalie Spiller, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, 8027 Zürich
Prof. Matthias Sulzer, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw
Andreas Theiler, Triplex Energieplaner AG, 4450 Sissach
Reto von Euw, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw
Thomas Wälti, Merki + Häfeli AG, 5303 Würenlingen
Martial Wicht, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, 8027 Zürich
Ludovic Yvert, Brugg Rohrsystem AG, 5314 Kleindöttingen

Inhalt

GRUNDLAGEN 9

1 Einleitung 10

1.1 Entwicklung der Fernwärme 10

1.2 Begriffe und Bedeutung von Fernwärme in der Schweiz 10

1.3 Temperaturniveau 11

1.4 Vor- und Nachteile 11

1.5 Effizienz und Kosten 12

2 Wärmebereitstellung 16

2.1 Wärmebedarf einzelner Abnehmer 16

2.1.1 Raumwärme 16

2.1.2 Warmwasser und Prozesswärme 16

2.1.3 Temperaturbedarf 16

2.2 Gesamtwärmebedarf 17

2.3 Wärmeleistungsbedarf 18

2.4 Bedarf Altbau und Neubau 18

2.5 Auslegung Wärmeerzeuger 20

2.6 Bewertung von Wärme und Strom 22

2.6.1 Wirkungsgrad und Nutzungsgrad 22

2.6.2 Gesamtwirkungsgrad 22

2.6.3 Gewichteter Gesamtwirkungsgrad 24

2.7 Wärmeerzeugung und Potenzial der Fernwärme 25

2.8 Reine Wärmeerzeugung (Heizwerke) 27

2.8.1 Holzheizkessel 27

2.8.2 Direkt nutzbare Abwärme 30

2.8.3 Niedertemperatur-Abwärme und Umgebungswärme 30

2.8.3.1 Wärmepumpen zur Temperaturerhöhung 30

2.8.3.2 Wärmequellen für Wärmepumpen 31

2.8.4 Solarthermie 33

2.8.5 Geothermie 35

2.9 Wärme-Kraft-Kopplung (Heizkraftwerke) 36

2.9.1 Übersicht 36

2.9.2 Dampfturbinen 36

2.9.3 Dampfmaschinen 37

2.9.4 Organic Rankine Cycle 37

2.9.5 Verbrennungsmotoren 37

2.9.6 Offene Gasturbinen 38

2.9.7 WKK und Wärmepumpe 38

2.9.8 Geschlossene Gasprozesse 38

2.9.9 Systemvergleich 39

2.10 Thermische Energiespeicher 40

2.10.1 Eigenschaften und Begriffe 40

2.10.2 Speichertechnologien 41

2.10.2.1 Sensible Wärmespeicherung 41

2.10.2.2 Latente Wärmespeicherung 42

2.10.2.3 Thermochemische Wärmespeicherung 42

2.10.3 Grundlagen der Energiespeicherung 42

2.10.3.1 Speichervorgang 42

2.10.3.2 Thermische Energie 42

2.10.3.3 Wärmedämmung 43

2.10.3.4 Auskühlung über die Zeit 44

2.10.4 Speicherdesign und Auslegung 44

2.10.5 Integration und Anwendung 47

2.10.5.1 Integration im Wärmesektor 47

2.10.5.2 Integration in WKK-Anlagen 48

3 Verbindung Wärmebereitstellung – Wärmeverteilung 49

3.1 Netztemperaturen 49

3.1.1 Vorlauftemperatur 49

3.1.2 Rücklauftemperatur 49

3.2 Netzfahrweise 50

3.2.1 Gleitende Fahrweise 50

3.2.2 Gleitend-Konstante Fahrweise 50

3.2.3 Konstante Fahrweise 50

3.3 Pumpen 51

3.3.1 Bauarten 51

3.3.2 Energieeffizienz 51

3.3.3 Pumpenregelung 52

3.4 Pumpenschaltung 53

3.4.1 Parallelschaltung 53

3.4.2 Serienschaltung 54

3.4.3 Redundanz 54

3.5 Netzregelung 55

3.5.1 Regelkonzept 55

3.5.2 Messort der Differenzdruckregelung 56

3.5.3 Wärmenetze mit stark variablem Durchfluss und hoher Vorlauftemperatur 57

3.5.4 Getrennte Fernleitungsgruppen für Winter- und Sommerbetrieb 57

3.6 Nenndruck 58

3.7 Druckverlauf im Fernwärmenetz 58

3.8 Druckerhöhung und Netztrennung 60

3.9 Druckhaltung 61

3.9.1 Druckhaltesysteme 61

3.9.2 Einbindung der Druckhaltung 62

3.9.3 Expansionsvolumen und Nachspeisemenge 63

4 Wärmeverteilung – Grundlagen 65

4.1 Entwicklung 65

4.2 Verteilarten mit abnehmender Temperatur 65

4.2.1 Dampf-Verteilung 65

4.2.2 Heisswasser-Verteilung 66

4.2.3 Warmwasser-Verteilung 66

4.2.4 Niedertemperatur-Verteilung 67

4.3 Komponenten 68

4.3.1 Rohrsysteme 68

4.3.1.1 Kunststoffverbundmantelrohr (KMR) 68

4.3.1.2 Kunststoffmediumrohr (PMR) 69

4.3.1.3 Metallmediumrohr (MMR) 69

4.3.1.4 Glasfaserverstärktes Kunststoffrohr (GFK-Rohr) 70

4.3.1.5 Stahlmantelrohr (SMR) 70

4.3.1.6	Doppelrohrausführung.....	70
4.3.1.7	Auswahl des Rohrsystems	71
4.3.2	Leckageüberwachung	73
4.3.2.1	Überwachungssysteme	73
4.3.2.2	Ortungsverfahren	74
4.3.2.3	Dokumentation und Prüfung.....	75
4.3.3	Armaturen	75
4.3.3.1	Schieber	75
4.3.3.2	Ventile	77
4.3.3.3	Hähne.....	77
4.3.3.4	Klappen	77
4.3.3.5	Einsatzbereich.....	78
4.3.3.6	Betriebliche Hinweise.....	79
4.3.3.7	Kennzeichnung und Dokumentation	80
4.4	Netzaufbau	80
4.4.1	Unterteilung nach Anzahl Leitungen	80
4.4.2	Hauptverteilung.....	81
4.4.3	Unterverteilung und Hausanschlüsse	82
4.4.4	Entwicklung der Netzstruktur	82
4.4.5	Entlüftung und Entleerung.....	83
4.4.6	Messeinrichtungen.....	84
4.5	Verlegemethoden	84
4.5.1	Oberirdische Verlegung	84
4.5.2	Unterirdische Verlegung im Kanal.....	84
4.5.3	Unterirdische Verlegung im Graben.....	84
4.5.4	Grabenlose Verlegung.....	84
4.5.4.1	Bodenverdrängungsverfahren.....	85
4.5.4.2	Bodenentnahmeverfahren.....	85
4.5.4.3	Düker.....	85
4.6	Häufige Verlege-Situationen	86
4.6.1	Befestigte Oberflächen	86
4.6.2	Unbefestigte Oberflächen	86
4.6.3	Führung an Geländeabschnitten.....	86
4.6.4	Privatgrundstücke	86
4.6.5	Nachträglich anzuschliessende Verbraucher ..	86
4.6.6	Berücksichtigung anderer leitungsgebundener Sparten	86
4.6.6.1	Strom- und Fernmeldekabel.....	86
4.6.6.2	Gas- und Wasserleitungen.....	87
4.6.6.3	Abwasser- und Regenwasserleitungen....	87
4.7	Tiefbau.....	87
4.7.1	Allgemeines	87
4.7.2	Trassenplanung	88
4.7.2.1	Starre Rohrsysteme	88
4.7.2.2	Flexible Rohrsysteme.....	89
4.7.2.3	Bewilligungsverfahren	89
4.7.3	Bauablauf.....	89
4.7.3.1	Grabenaushub	90
4.7.3.2	Rohrleitungsbau	91
4.7.3.3	Grabenverfüllung.....	92
4.7.3.4	Instandstellung.....	93
4.8	Wasserqualität.....	93
4.8.1	Wasserarten.....	93
4.8.1.1	Begriffe in der Gebäudetechnik.....	93
4.8.1.2	Begriffe in der Fernwärmetechnik	93
4.8.1.3	Flüssigkeitskategorien.....	94

4.8.2	Empfehlung an die Wasserbeschaffenheit in der Fernwärmetechnik	94
4.8.2.1	Warmwasser bis 110°C	94
4.8.2.2	Heisswasser ab 110°C	95

5 Wärmeübergabe – Grundlagen 96

5.1	Begriffe.....	96
5.1.1	Hausanschlussleitung	96
5.1.2	Hausanschlussraum.....	96
5.1.3	Wärmeübergabestation	96
5.1.4	Hauszentrale	97
5.1.5	Hausstation	97
5.1.6	Kompaktstation.....	97
5.1.7	Hausanlage	97
5.2	Anschlussvarianten.....	97
5.2.1	Direkter Anschluss	98
5.2.2	Indirekter Anschluss	98
5.3	Wärmeliefervertrag	99
5.3.1	Allgemeine Geschäftsbedingungen (AGB).....	99
5.3.2	Technische Anschlussvorschriften (TAV).....	100
5.3.3	Tarifblatt	100

PLANUNG UND BERECHNUNG 101

6 Projektablauf 102

6.1	Übersicht.....	102
6.2	Qualitätssicherung	102
6.3	Unterschiede zwischen SIA 108 und Planungshandbuch Fernwärme.....	103
6.4	Phase 1: Vorstudie	105
6.4.1	Potenzielles Wärmeversorgungsgebiet	105
6.4.2	Umfrage Schlüsselkunden	106
6.4.3	Aktualisieren Wärmeversorgungsgebiet.....	107
6.4.4	Erste wirtschaftliche Betrachtung	108
6.5	Phase 2: Entwurfsplanung.....	111
6.5.1	Konkretisieren der Schlüsselkunden	111
6.5.2	Umfrage Kleinwärmeabnehmer.....	111
6.5.3	Festlegen Versorgungsgebiet.....	111
6.5.4	Zweite wirtschaftliche Betrachtung	111
6.5.5	Akquisition	112
6.6	Phase 3: Planung, Ausschreibung und Vergabe	113
6.6.1	Auslegung Wärmenetz	113
6.6.2	Spezifikation Übergabestation.....	113
6.6.3	Baubewilligungsverfahren	113
6.6.4	Ausschreibung vorbereiten.....	113
6.6.5	Submission.....	114
6.6.6	Dritte Wirtschaftliche Betrachtung	114
6.6.7	Vergabe.....	114
6.7	Phase 4: Ausführung und Abnahme.....	115
6.7.1	Ausführungspläne	115
6.7.2	Ausführung.....	115
6.7.3	Inbetriebnahme	115
6.7.4	Dokumentation	115
6.7.5	Kostenkontrolle.....	116

6.7.6	Abnahme.....	116	7.5.4	Frei verlegte Rohre.....	142
6.8	Phase 5: Betriebsoptimierung	118	7.5.4.1	Rohrhalterung.....	143
6.8.1	Datenerfassung.....	118	7.5.4.2	Verlegung mit Vorspannung	144
6.8.2	Auswertung.....	119	7.5.5	Kunststoff-Medienrohre (PMR).....	145
6.8.3	Optimierung	119	8	Wärmeübergabe – Technik und	
6.9	Phase 6: Betrieb und Bewirtschaftung ...	120		Hydraulik	146
6.9.1	Betriebskonzept	120	8.1	Komponenten und Technik einer	
6.9.2	Instandhaltung	120		Hausstation	146
6.9.3	Wartungsvertrag	120	8.1.1	Wärmeleistungsbedarf	146
6.9.4	Versicherungen.....	120	8.1.2	Werkstoffe und Verbindungen	146
7	Wärmeverteilung – Berechnung ..	122	8.1.3	Wärmedämmung.....	146
7.1	Wärmeverluste	122	8.1.4	Wärmezähler	147
7.1.1	Oberirdische Leitungen.....	123	8.1.4.1	Einbau von Wärmezählern	147
7.1.2	Erdverlegte Leitungen.....	124	8.1.4.2	Einhalten der Messbeständigkeit.....	148
7.1.3	Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter		8.1.4.3	Einfluss auf die Ventilautorität	148
	Rohrleitung.....	126	8.1.5	Druckabsicherung	149
7.1.4	Jährliche Wärmeverluste.....	126	8.1.6	Temperaturabsicherung	149
7.1.5	Temperaturabfall in Funktion der Distanz	127	8.1.7	Regelfunktionen	152
7.2	Druckverlust.....	128	8.1.8	Rücklauftemperatur.....	152
7.2.1	Gerade Rohrleitungen.....	128	8.1.9	Wärmeübertrager	152
7.2.2	Druckverlust von Wellrohren	130	8.1.10	Erdung.....	152
7.2.3	Druckverlust von Rohrleitungseinbauten	130	8.1.11	Datenerfassung.....	152
7.3	Dimensionierung der Rohrdurchmesser.....	130	8.1.12	Schmutzfänger	152
7.3.1	Empfehlungen.....	131	8.2	Warmwassererwärmung.....	153
7.3.2	Vorgehen	131	8.3	Legionellenproblematik.....	154
7.3.2.1	Vorbereitung.....	131	8.4	Hydraulik	156
7.3.2.2	Auslegung in vier Schritten.....	132	8.4.1	Hydraulisches Grundkonzept	156
7.3.3	Berechnungsmethoden.....	132	8.4.2	Grundschaltungen	157
7.3.3.1	Von Hand.....	132	8.4.2.1	Beimischschaltung.....	157
7.3.3.2	Berechnungsprogramme.....	132	8.4.2.2	Einspritzschaltung mit Durchgangsventil	157
7.4	Pumpenauslegung.....	133	8.4.2.3	Drosselschaltung	157
7.4.1	Pumpenkennlinie	133	8.4.3	Regelventil.....	157
7.4.2	Anlagenkennlinie.....	133	8.4.4	Ventilautorität	158
7.4.3	Proportionalitätsgesetze	133	8.4.4.1	Automatischer Druckdifferenzregler	159
7.4.4	Leistungsbedarf Pumpen	133	8.4.4.2	Differenzdruckunabhängiges Regelventil	
7.4.5	Energiebedarf Pumpen	134		(Kombiventil).....	159
7.4.6	Besonderheiten Auslegung.....	135	8.4.5	Systeme bei variablen Netzen.....	160
7.4.6.1	Problematik Überstrom.....	135	8.4.5.1	Statischer hydraulischer Abgleich.....	160
7.4.6.2	Zulaufgeschwindigkeit.....	135	8.4.5.2	Hydraulischer Abgleich mit automatischen	
7.4.6.3	Minimalvolumenstrom	136		Differenzdruckregler	160
7.5	Rohrstatik	136	8.4.5.3	Hydraulischer Abgleich mit	
7.5.1	Was ist Rohrstatik	136		differenzdruckunabhängigem Regelventil	
7.5.1.1	Druckfestigkeit und Wandstärke.....	137		(Kombiventil).....	161
7.5.1.2	Biegespannung bei Rohren.....	138	8.4.5.4	Vergleich der Systeme zum hydraulischen	
7.5.1.3	Wärmedehnung und Wärmespannung... ..	138		Abgleich.....	162
7.5.1.4	Überlagerung von Spannungen	139	8.5	Standard-Schaltungen	163
7.5.1.5	Statischer Nachweis.....	139	8.5.1	Direkter Anschluss	163
7.5.2	Verlegetechnik und Auslegung	140	8.5.2	Indirekter Anschluss	164
7.5.2.1	Dehnungsaufnahme	140	8.5.3	Warmwassererwärmung	166
7.5.2.2	Rohrstatische Auslegungstemperatur	140	8.5.4	Strahlpumpe.....	168
7.5.3	Erdverlegte Rohre (KMR).....	141	8.6	Anforderung an die Wärmeübergabe	169
7.5.3.1	Kaltverlegung Methode 1	141	8.6.1	Gebäudetechnik	169
7.5.3.2	Kaltverlegung Methode 2	142	8.6.2	Heizsystem.....	169
7.5.3.3	Thermische Vorspannung	142	8.6.3	Lüftungsanlage.....	170
7.5.3.4	Doppelrohre, Mehrfachrohre	142	8.6.4	Warmwassererwärmung und Zirkulation	170
			8.6.5	Regelungstechnik.....	170

9	Wirtschaftlichkeit	171
9.1	Verantwortlichkeiten	171
9.2	Kostenstruktur	171
9.3	Berechnung der Wärmegestehungskosten	173
9.4	Variantenvergleich	175
9.5	Businessplan, Planbilanz und Planerfolgsrechnung.....	175

OPTIMIERUNG 177

10	Analyse und Optimierung der Wärmeabnehmer	178
10.1	Methode	178
10.1.1	Grundlagen	178
10.1.2	Mehrverbrauch.....	179
10.1.3	Einfluss auf die Rücklauftemperatur	179
10.2	Vorgehen	180
10.2.1	Datenerfassung und Auswertung.....	180
10.2.2	Beurteilung.....	181
10.2.3	Umsetzung und Erfolgskontrolle	182
10.3	Empfehlungen zur Analyse der Wärmeabnehmer.....	182

ANHANG 185

11	Stoffwerte von Wasser	186
12	Ergänzungen zur Wasserqualität.	188
12.1	Messgrößen	188
12.2	Verfahren der Wasseraufbereitung	189
12.3	Verfahren der Wasserbehandlung (Konditionierung)	189
13	Kenngrossen Rohrsysteme	191

13.1	Übertragungsleistung bei verschiedenen Temperaturspreizungen.....	191
13.2	Übertragungsleistung bei unterschiedlichen spezifischen Druckverlusten	192
13.3	R-Wert-Tafel für nahtlose Stahlrohre.....	193
13.4	Abmessungen und spez. Wärmeverluste für KMR-, MMR- und PMR-Rohre.....	197
13.5	Spezifische Wärmeverluste pro Trassenmeter Rohrleitung	201
13.6	Richtpreise Fernwärmeleitungen	202
14	Fragebogen für einen Fernwärmeanschluss	204
15	Symbole für Installationen	207
16	Formelzeichen und Indizes	208
17	Glossar	212
18	Stichwortverzeichnis	217
19	Quellenverzeichnis	220
19.1	Literatur.....	220
19.2	Normen- und Richtlinien	222

Grundlagen

1 Einleitung

1.1 Entwicklung der Fernwärme

Bei einer mittleren Jahrestemperatur von rund 8°C und jährlich 200 bis 300 Heiztagen kommt der Beheizung von Gebäuden in unseren Breitengraden eine wichtige Rolle zu. Die Beheizung und Bereitstellung von Warmwasser sind Voraussetzungen für einen hohen Wohnkomfort, aber gleichzeitig auch verantwortlich für einen grossen Teil des Verbrauchs an fossilen Energieträgern.

Das Prinzip der Zentralheizung kam mit Hypokausten zur Wärmeverteilung mittels Warmluft in Fussboden- und Wandheizungen bereits rund 2000 Jahre v. Chr. im griechischen Raum zum Einsatz und wurde später auch von den Römern genutzt. Trotzdem dauerte die Zeit der offenen Feuerstellen und Herde in Europa noch viele Jahrhunderte. So sind erst ab 1000 n. Chr. geschlossene Feuerstellen sowie Öfen aus Stein und Lehm bekannt. Ab dem 15. Jahrhundert kamen Kachelöfen und ab dem 18. Jahrhundert Eisenöfen dazu, während sich die heutige Form der Zentralheizung erst nach dem zweiten Weltkrieg etablierte. Bis da kamen ausserdem fast ausschliesslich feste Brennstoffe zum Einsatz, während Heizöl erst ab Ende der 1940-er Jahre eine grosse Verbreitung fand und Erdgas noch etwas später dazu kam.

Die erste Anwendung von Fernwärme geht bereits auf das Jahr 1332 zurück, als in Chaudes-Aigues im französischen Zentralmassiv Wasser aus heissen Quellen zur Beheizung von rund 40 Häusern genutzt wurde [1]. Als erstes Fernwärmenetz im heutigen Sinn gilt jedoch ein in Lockport (New York, USA) errichtetes und mit Dampf betriebenes Netz, das auf mehrere Kilometer ausgebaut wurde [2], [3]. Ab den 1920-er Jahren und verstärkt ab 1960 setzte schliesslich vor allem in nördlichen Ländern der Aufbau von Fernwärmenetzen ein. Bild 1.1 zeigt dazu ein Beispiel eines Netzes in Leipzig in den 1980-er Jahren. In Dänemark, Schweden, Finnland, Island, Polen, Tschechien und Österreich sind heute mehr als 20 % aller Wohngebäude an Fernwärme angeschlossen [3], [7], [9].



Bild 1.1 Fernwärme, Leipzig 1986, DDR [4].

1.2 Begriffe und Bedeutung von Fernwärme in der Schweiz

In der Gesamtenergiestatistik der Schweiz wird Fernwärme wie folgt beschrieben:

„Als Fernwärme gilt eine Wärmeversorgung, in der für das Haupttransport- und Verteilnetz öffentlicher Boden beansprucht wird und in der Wärme an Dritte verkauft wird“ [18].

Da die Einschränkungen auf den Verkauf der Wärme und die Beanspruchung von öffentlichem Boden keine technische Bedeutung hat, gelten die Ausführungen des vorliegenden Handbuchs auch für Wärmeverteilnetze, bei denen Wärmeerzeuger und Wärmeabnehmer in einer Hand sind und kein öffentlicher Boden beansprucht wird.

Für kleinere Netze wird zum Teil auch der Begriff Nahwärme verwendet. In Deutschland wird damit die Übertragung von Wärme für Heizung und Warmwasser zwischen Gebäuden mit Leistungen zwischen 50 kW und einigen Megawatt beschrieben [10]. Von Minergie® wird Nahwärme auch dann verwendet, wenn die Wärmeerzeugung einige Gebäude oder Gebäudekomplexe versorgt, ohne dass zwingend ein Verkauf an Dritte erfolgt [11]. Da der Übergang zwischen Nahwärme und Fernwärme fließend ist, wird in den folgenden Kapiteln des vorliegenden Handbuchs nur der Begriff Fernwärme verwendet. In Deutschland gilt ausserdem nur der Begriff Fernwärme als technisch und juristisch korrekt, während zur Unterscheidung zwischen zentraler Wärmeerzeugung und Fernwärme weder die Distanz noch die Grösse des Leitungsnetzes entscheidend sind [58]. Effektiv ausgeführte Fernwärmenetze decken damit einen breiten Leistungsbereich mit Anschlussleistungen von weniger als 100 kW bis zu mehr als 1 GW ab.

Für die statistisch erfasste Fernwärme wird mit 18'300 TJ/a ein Anteil von rund 2.2 % am schweizerischen Endenergieverbrauch von rund 840'000 TJ/a ausgewiesen [18]. Die Angaben zu Fernwärme basieren auf einer seit 1978 durchgeführten Erhebung, welche nur die grossen Netze abdeckt, die grossteils von Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) versorgt werden. Kleinere Netze mit Holz, übrigen erneuerbaren Energien, Wärmepumpen, Erdöl und Erdgas sind in der Statistik somit nicht erfasst, weshalb die effektive Bedeutung der Fernwärme deutlich grösser ist.

Gemäss [19] liegt bis 2050 ein Potential für Fernwärme zur Deckung des Wärmebedarfs von rund 17 TWh/a bzw. 61'200 TJ/a vor, welches durch erneuerbare Energieträger gedeckt werden kann. Dies entspricht rund 38 % des langfristigen Wärmebedarfs für Raumwärme und Warmwasser in der Schweiz.

1.3 Temperaturniveau

Mit zunehmender Netztemperatur nehmen die Wärmeverluste des Fernwärmenetzes zu. Bei Überschreitung bestimmter Temperaturen steigen zudem die Anforderungen an Apparaturen und Rohre. Die maximale Vorlauftemperatur ist deshalb eine wichtige Grösse zur Unterscheidung von Fernwärmenetzen. Während für Neubauten Raumwärme ab rund 40°C direkt genutzt werden kann, wird für vorerwärmtes Brauchwarmwasser eine Mindesttemperatur von 60°C verlangt, um die Sicherheit gegenüber Legionellen zu gewährleisten. Für Brauchwarmwasser werden deshalb im Fernwärmenetz meist Vorlauftemperaturen von rund 70°C vorausgesetzt.

Nebst direkten Anwendungen zur Wärmenutzung besteht zunehmend auch ein Interesse an der Verteilung von Wärme auf Temperaturniveaus von lediglich 6°C bis 20°C zum Beispiel als Quelle für dezentrale Wärmepumpen. Im Vordergrund steht dabei die Nutzung von Abwärme und Umgebungswärme. Entsprechende Netze werden auch als „Anergienetze“ bezeichnet oder es wird auch von „kalter Fernwärme“ gesprochen [16]. Um den Primärenergieaufwand zur Deckung eines Nutzenergiebedarfs zu reduzieren, ist der Einsatz an Exergie (dem zur Arbeit fähigen Anteil der Energie) zu minimieren. Bei der Wärmeverteilung wird dies durch Reduktion des Temperaturniveaus ermöglicht, weshalb für Fernwärme auf tiefem Temperaturniveau auch der Begriff „LowEx Fernwärme“ verwendet wird [20].

Wenn die Verteilung von Wasser dazu dient, bei Verbrauchern Wärme abzuführen, wird dies auch als „Fernkälte“ bezeichnet. Eine Vernetzung von Wärme- und Kälteverbrauchern durch Netze mit kombinierter Nutzung bietet ein zusätzliches Potenzial zur Einsparung an Primärenergie und wird auch als „thermische Arealvernetzung“ bezeichnet.

Der Grossteil der heutigen Fernwärmenetze wird jedoch mit Vorlauftemperaturen von über 70°C betrieben und dient zur direkten Beheizung und meist auch zur Versorgung mit Brauchwarmwasser. Das vorliegende Planungshandbuch beschreibt die dazu erforderliche Technik für den Temperaturbereich von 40°C bis 140°C. Die obere Grenze entspricht der von Rohrherstellern in der Regel garantierten Dauerbetriebstemperatur von Kunststoffverbundmantelrohren (KMR). Da ab 110°C erhöhte Sicherheitsanforderungen einzuhalten sind, wird für die Wärmeverteilung zudem zwischen folgenden Begriffen unterschieden:

„Warmwasser“ dient zur Wärmeverteilung bis zu 110°C.

„Heisswasser“ bezeichnet Wasser ab 110°C.

1.4 Vor- und Nachteile

Fernwärme gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sie einen hohen Komfort für die Verbraucher erzielt und die Nutzung unterschiedlicher Wärmequellen ermöglicht. Als Wärmequellen für die im vorliegenden Handbuch behandelten Vorlauftemperaturen von über 40°C dienen meist automatische Holzheizwerke, Abwärme von KVA oder der Industrie, mit Wärmepumpen genutzte Umgebungswärme sowie Solarthermie.

Für Holz als Energieträger ermöglicht Fernwärme den Einsatz grosser, automatisch betriebener Wärmeerzeuger. Dank effizienter Feinstaubabscheider und automatisiertem Anlagenbetrieb kann damit sichergestellt werden, dass ein Ausbau der Holzenergie nicht zu einer erhöhten lokalen Belastung an Feinstaub führt, wie dies bei ungeeignet betriebenen Kleinf Feuerungen möglich ist.

Ein weiterer Vorteil von Fernwärme liegt im Raumgewinn im Gebäude der Wärmeabnehmer, da der Raumbedarf für Öltank, Kamin und Feuerung entfällt.

Für Fernwärmeabnehmer entfällt ausserdem der Aufwand zum Unterhalt der Wärmeerzeugung mit Brennstofflieferung, Service und Kaminfeger.

Den Vorteilen der Fernwärme stehen die zusätzlichen Verluste und Kosten für die Wärmeverteilung gegenüber. Da ein Fernwärmenetz hohe Investitionen verursacht, können die Kapitalkosten bis zu mehr als 50 % der Gesamtkosten ausmachen [14]. Im Fall von Holz, Heizöl oder Erdgas sind daneben die Brennstoffkosten zur Deckung der Wärmeverteilungsverluste ein wesentlicher Kostenfaktor, während die Stromkosten für die Pumpenergie in der Regel einen kleineren Anteil ausmachen [14].

In Bezug auf den Primärenergieverbrauch kann eine zentrale Wärmeerzeugung je nach Anwendung weitere Vorteile aufweisen. So ermöglicht zum Beispiel die Nutzung sonst nicht verwertbarer Abwärme die Einsparung fossiler Brennstoffe in dezentralen Heizungen. Wenn keine Abwärme vorliegt, ermöglicht ein Fernheizwerk, dass dank grösserer Wärmeerzeuger höhere Wirkungsgrade erzielt und durch mehrere Wärmeerzeuger die Produktion den Lastverhältnissen besser angepasst werden können. Zudem kann eine grössere Palette an Energieträgern genutzt und kombiniert werden. So kann etwa eine erneuerbare Grundlastabdeckung mit einem fossil betriebenen Spitzenlastkessel kombiniert werden. Ab einer gewissen Grösse kann zudem für Holz der Einsatz von Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) für den Grundlastanteil ermöglicht werden.

Wegen der zusätzlichen Wärmeverteilungsverluste überwiegen die Vorteile der Fernwärme nicht für alle Anwendungen. So ist zum Beispiel mit Erdgas erzeugte Fernwärme im Vergleich zu dezentralen Gasheizungen in der Regel höchstens dann vorteilhaft, wenn anstelle von Gasheizungen eine Stromerzeugung mit Holz betrieben und die Abwärme als Fernwärme genutzt wird.

1.5 Effizienz und Kosten

Bei gegebener Anschlussleistung und gegebener Vorlauftemperatur im Netz werden die Effizienz und Wirtschaftlichkeit eines Fernwärmenetzes durch folgende Faktoren beeinflusst:

1. Die **Wärmeverluste** des Netzes verursachen einen zusätzlichen Wärmebedarf. Im Falle eines Heizkessels wird dazu Brennstoff verbraucht. Der Energieinhalt entspricht dabei den Wärmeverlusten dividiert durch den Kesselwirkungsgrad. Zudem müssen die Wärmeverluste bei der Dimensionierung der Wärmeerzeugung und des Netzes berücksichtigt werden. Die Wärmeverluste nehmen mit zunehmender Oberfläche der Rohrleitung und somit mit zunehmendem Rohrdurchmesser zu und sie sinken mit Verbesserung der Wärmedämmung.
2. Eine Verkleinerung der **Rohrdurchmesser** bewirkt tiefere Kapitalkosten und niedrigere Brennstoffkosten, gleichzeitig steigen jedoch der Druckverlust und die Pumpleistung und damit die Betriebskosten für den Stromverbrauch.
3. Daneben beeinflusst die **Temperaturspreizung** zwischen Vor- und Rücklauf die mit einem bestimmten Volumenstrom transportierbare Wärmeleistung. Für die Wärmeleistung gilt:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T = \dot{V} \rho c_p \Delta T = w A \rho c_p \Delta T$$

\dot{Q} = Wärmeleistung in (kW)

\dot{m} = Massenstrom in (kg/s)

\dot{V} = Volumenstrom in (m³/s)

w = Strömungsgeschwindigkeit in (m/s)

A = Rohrquerschnitt in (m²)

ρ = Dichte von Wasser bei 60°C (983 kg/m³)

c_p = Wärmekapazität von Wasser bei 60°C (4.183 kJ/(kg K))

ΔT = Temperaturspreizung = (T_{VL} – T_{RL}) in (K)

Bild 1.2 zeigt den zum Transport von 1 MW Wärmeleistung erforderlichen Volumenstrom in Funktion der Temperaturspreizung.

Eine hohe Temperaturspreizung ermöglicht bei gegebener Anschlussleistung den Einsatz kleinerer Rohre, wodurch die Kapitalkosten und die Wärmeverluste sinken.

Für ein gegebenes Netz ermöglicht eine Vergrößerung der Temperaturspreizung eine Erhöhung der Anschlussleistung. Umgekehrt wird die Netzleistung durch Nichterreichen der Temperaturspreizung reduziert. Aus diesem Grund ist sicher zu stellen, dass die Wärmeübergabestationen korrekt betrieben werden und die geforderte Temperaturspreizung erreichen.

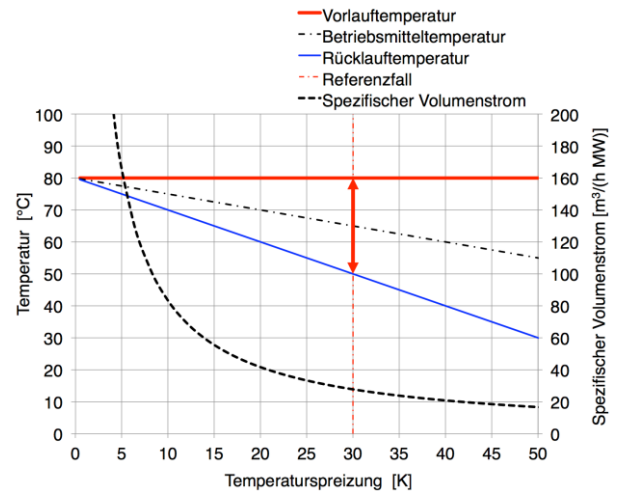


Bild 1.2 Spezifischer Volumenstrom in Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf (Massstab rechts). Der spezifische Volumenstrom entspricht dem Volumenstrom für ein Fernwärmenetz mit 1 MW am Netzeingang. Zusätzlich sind die Vor- und Rücklauftemperaturen für eine Vorlauftemperatur von 80°C eingezeichnet und das Beispiel eines Netzes mit einer Temperaturspreizung von 30 K eingetragen.

4. Das **Temperaturniveau** des Netzes wirkt sich auf mehrere Arten auf die Effizienz und Kosten aus. Durch Anhebung des Temperaturniveaus mit konstanter Temperaturspreizung steigen einerseits die Wärmeverluste des Netzes. Andererseits kann dadurch die Effizienz des Wärmeerzeugers sinken. Diese indirekte Wirkung auf die Wärmeerzeugung kann deutlich grösser sein als der direkte Effekt auf die Wärmeverluste und sie ist für folgende Anwendungen besonders ausgeprägt:
 - a) Für Wärmepumpen sowie für Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung mit Dampfprozessen (Dampfturbinen oder ORC-Anlagen). Für diese Fälle ist in erster Linie die Vorlauftemperatur entscheidend, da bei Erhöhung der Nutztemperatur die Leistungszahl der Wärmepumpe bzw. die Stromausbeute der WKK-Anlage sinkt.
 - b) Für Heizkessel mit Abgaskondensation. In diesem Fall ist die Rücklauftemperatur entscheidend, da eine effiziente Wärmerückgewinnung durch Abgaskondensation erst dann eintritt, wenn der Taupunkt des Abgases deutlich unterschritten wird.
5. Da die **Wärmeübergabestationen** und die **Wärmeabnahme** den Netzbetrieb und die Effizienz der Wärmeerzeugung durch die Rücklauftemperatur beeinflussen, ist für einen wirtschaftlichen Betrieb eines Fernwärmenetzes auch die Art und Betriebsweise der Wärmeübertragung auf der Verbraucherseite (also den Hausstationen) zu beachten. Mögliche Massnahme zur Vermeidung negativer Effekte auf Netz und Wärmeerzeugung bestehen darin, dass in den Technischen Anschlussbedingungen oder im Wärmeliefervertrag Anforderungen zu ei-

ner minimalen Temperaturspreizung oder einer maximalen Rücklauftemperatur aufgenommen werden. Im Weiteren ermöglicht ein Monitoring der Netztemperaturen die Einleitung von Massnahmen bei Nichteinhaltung der Auslegungswerte.

Die Wirtschaftlichkeit eines Fernwärmenetzes wird somit durch vielfältige Faktoren bestimmt. Eine Analyse zum Einfluss der Auslegungsparameter auf die Wirtschaftlichkeit zeigt, dass zur Optimierung der Wärmeverteilkosten bei vorgegebenen Temperaturen und Anschlussleistungen entscheidend ist, dass die Rohrleitungen auf den **kleinsten technisch zulässigen Rohrdurchmesser** ausgelegt werden [14]. Bild 1.3 zeigt dazu die Wärmeverteilkosten für ein Beispiel mit folgenden Annahmen:

- 1 MW Anschlussleistung
- 1 km Trassenlänge
- Ganzjährig betriebenes Netz
- Verbraucher 2'000 Vollbetriebsstunden p.a.
- Die Anschlussdichte beträgt am Netzeingang damit 2.0 MWh/(Trm a). Bei 10 % Netzverlusten entspricht dies am Netzausgang 1.8 MWh/(Trm a)
- Vorlauftemperatur 80°C
- Temperaturspreizung 30 K
- Annuität 5.1 % p.a. (30 Jahre, 3 % p.a.)
- Wärmekosten am Netzeingang 6 Rp./kWh
- Maximale Strömungsgeschwindigkeit nach ÖKL Merkblatt 67 (Bild 1.4, [120]), was im betrachteten Bereich etwa einem Druckverlust von 200 Pa/m entspricht.

Die Wärmeverteilkosten sind in Abhängigkeit des Nenndurchmessers beschrieben und weisen ein Minimum auf, das mit dem kleinsten zulässigen Nenndurchmesser zusammenfällt. Die minimalen Wärmeverteilkosten betragen dabei 2.6 Rappen pro Kilowattstunde an die Wärmeabnehmer gelieferte Wärme. Eine Auslegung auf einen Nenndurchmesser grösser als notwendig verteuert die Wärmeverteilung um 9 %, zwei Nenndurchmesser grösser um 30 %.

Der kleinste zulässige Nenndurchmesser wird dabei durch die maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeit bestimmt, welche einen Betrieb ohne unzulässige Kavitation und Geräuschentwicklung sicherstellt. Bild 1.4 zeigt die entsprechenden Empfehlungen nach ÖKL Merkblatt 67 [120] und nach der Swedish District Heating Association DHA [1]. Zusätzlich sind die Strömungsgeschwindigkeiten eingezeichnet, die einem Druckverlust von 100, 200 und 300 Pa/m entsprechen [14]. Eine Praxiserhebung an 52 Fernwärmenetzen zeigt, dass rund 80 % der Haupt- und Teilstränge grösser ausgeführt sind als effektiv erforderlich [16]. Die Überdimensionierung entspricht meist einem oder zwei, vereinzelt jedoch bis zu vier Nenndurchmesser und sie verursacht im Vergleich zu einem Netz mit kleinstmöglichem Rohrdurchmesser deutlich höhere Wärmeverluste und Kosten.

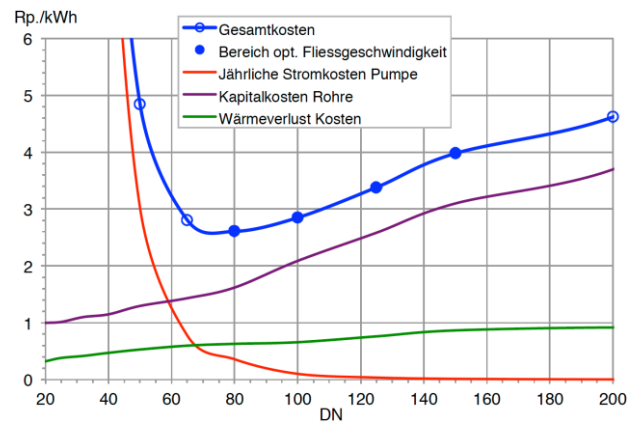


Bild 1.3 Wärmeverteilkosten als Gesamtkosten und unterteilt in Kapital-, Wärmeverlust- und Stromkosten in Funktion des Nenndurchmessers [14]. Die ausgefüllten Symbole zeigen den kleinsten zulässigen Nenndurchmesser und die nächsten drei grösseren.

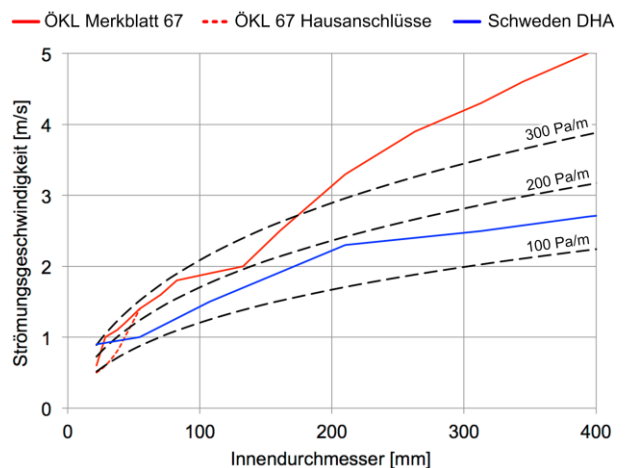


Bild 1.4 Strömungsgeschwindigkeiten in Funktion des Rohrdurchmessers (Innendurchmesser): Empfehlungen für maximale Fließgeschwindigkeit nach ÖKL Merkblatt 67 [120] und Empfehlungen der Swedish District Heating Association (DHA) [1]. Zudem sind die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend Druckverlusten von 100, 200 und 300 Pa/m dargestellt [14].

Weitere wichtige Faktoren sind die Temperaturspreizung und das Temperaturniveau. Eine Vergrösserung der **Temperaturspreizung** führt bei gleichem Rohrdurchmesser zu einer Reduktion der Wärmeverteilverluste, wie Bild 1.5 für das bereits beschriebene Beispiel zeigt.

Wie aus Bild 1.5 ebenfalls hervorgeht, ermöglicht eine Vergrösserung der Temperaturspreizung zudem die Verwendung kleinerer Rohrdurchmesser. Dies führt zu einer weiteren Reduktion der Wärmeverluste und bewirkt gleichzeitig deutlich niedrigere Investitionen. Aus diesem Grund können die gesamten Wärmeverteilkosten durch eine Vergrösserung der Temperaturspreizung deutlich reduziert werden, wie Bild 1.6 zeigt. Schliesslich führt eine grosse Temperaturspreizung bei gegebener Vorlauftemperatur zu tiefen Rücklauftempe-

raturen, wodurch zusätzlich die Effizienz der Wärmeerzeugung erhöht werden kann. Bei bestehenden Anlagen besteht auch bezüglich Temperaturspreizung ein erhebliches Verbesserungspotenzial, da zahlreiche Netze nach einer Praxiserhebung auch erhöhte Rücklauftemperaturen aufweisen [16]. Dies führt zu einem erhöhtem Hilfsenergieverbrauch und es kann auch den Energieverbrauch des Wärmeerzeugers erhöhen. Durch hohe **Vorlauftemperaturen** steigen die Wärmeverluste und damit auch die Betriebskosten (Bild 1.7). Während die Auslegung nach dem minimalen und damit optimalen Rohrdurchmesser bei der Dimensionierung erfolgen muss, ist die Einhaltung der Netztemperaturen im späteren Praxisbetrieb sicher zu stellen. Da durch eine zu geringe Temperaturspreizung die Anschlussleistung reduziert wird, besteht durch Optimierung auf Seite der Wärmeabnehmer ein Potenzial, die Anschlussleistung eines bestehenden Netzes im Bedarfsfall zu erhöhen. Oftmals kann bereits durch korrekte Einregulierung der Hausstationen eine Verbesserung erzielt werden, andernfalls ist eine Vergrößerung der Wärmeübertrager notwendig.

Ein weiterer Parameter, der die Wärmeverluste und die Kosten beeinflusst, ist die **Dämmstärke**. Im Gegensatz zum Rohrdurchmesser und der Temperaturspreizung weist die Dämmstärke gegenläufige Wirkungen auf, indem die Betriebskosten durch bessere Wärmedämmung reduziert und die Investitionen erhöht werden. Wie Bild 1.8 zeigt, besteht für die Verluste vor allem zwischen Dämmstärke 1 (minimale) und Dämmstärke 2 (mittlere Dämmung) ein deutlicher Unterschied. Dämmstärke 1 kommt für Fernwärmenetze in der Schweiz deshalb praktisch nicht infrage. Dämmstärke 2 erzielt für das beschriebene Beispiel mit dem Mindestdurchmesser Verluste von rund 10.5 %. Erst mit Dämmstärke 3 wird der Zielwert nach QM Holzheizwerke von 10 % [21] erreicht. Wichtig ist dabei wiederum, dass der kleinstmögliche Durchmesser oder höchstens eine Nennweite grösser verwendet wird.

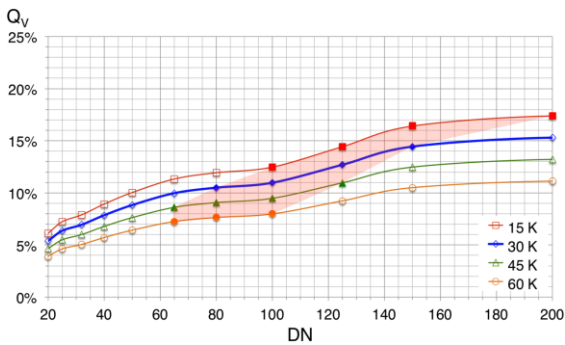


Bild 1.5 Wärmeverteilungsverluste in Funktion des Nenn-durchmessers für unterschiedliche Temperaturspreizungen für das in Bild 1.3 beschriebene Fernwärmenetz [14]. Hinterlegter Bereich: Nenndurchmesser mit zulässiger Strömungsgeschwindigkeit.

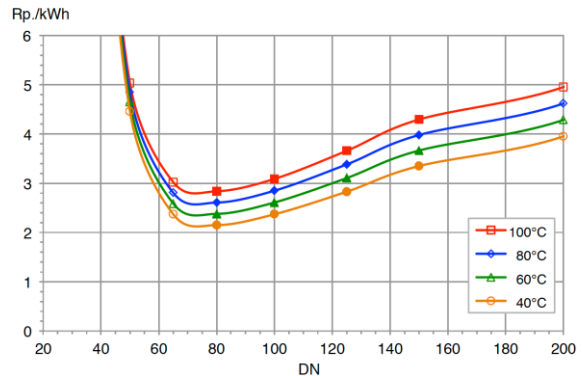


Bild 1.7 Wärmeverteilkosten in Funktion des Nenn-durchmessers für unterschiedliche Vorlauf-temperaturen bei einer Temperaturspreizung von 30 K [14].

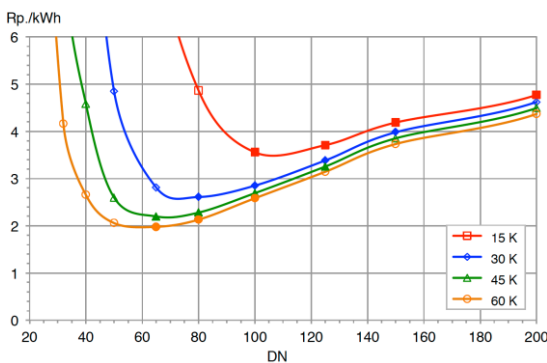


Bild 1.6 Wärmeverteilkosten in Funktion des Nenn-durchmessers für unterschiedliche Temperaturspreizungen bei einer Vorlauf-temperaturen von 80°C für das in Bild 1.3 beschriebene Fernwärmenetz [14]

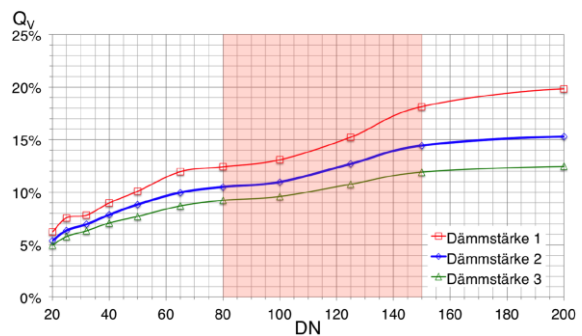


Bild 1.8 Wärmeverteilungsverluste in Funktion des Nenn-durchmessers für unterschiedliche Dämm-stärken. Hinterlegter Bereich: Zulässige Strömungsgeschwindigkeit [14].

Die wichtigsten Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit von Fernwärmenetzen können damit wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die Investitionskosten, die Netzverluste und der Hilfsenergieverbrauch des Fernwärmenetzes werden durch folgende Parameter bestimmt:
 - durch die **Rohrdurchmesser** (und damit die Dimensionierung des Netzes)
 - durch den **Rohrtyp** (Material, Ausführung)
 - sowie durch die **Wärmedämmstärke**.

2. Die Effizienz der Wärmeerzeugung wird durch folgende Parameter des Fernwärmenetzes beeinflusst:
 - die **Temperaturspreizung**
 - das **Temperaturniveau** der Vor- und Rücklauftemperatur.

2 Wärmebereitstellung

In diesem Kapitel werden die Grundzüge zum Wärmebedarf und Wärmeleistungsbedarf behandelt sowie die Aufteilung der Jahresdauerlinie in Grund- und Spitzenlast beschrieben. Zudem werden die wichtigsten Wärmeerzeuger beschrieben und deren Beeinflussung durch den Netzbetrieb und die Einbindung von Wärmespeichern erläutert. Für den Wärmebedarf wird unterschieden zwischen Prozesswärme und der Wärmeversorgung von Gebäuden. Der Wärmebedarf von Wohnbauten umfasst dabei Wärme zur Raumheizung und zur Warmwasserbereitstellung.

2.1 Wärmebedarf einzelner Abnehmer

2.1.1 Raumwärme

Der **Jahreswärmebedarf für Raumwärme** wird bei Neubauten anhand der SIA-Norm 380/1 berechnet [78]. Diese berücksichtigt interne Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung, Personen, elektrische Geräte und weitere Quellen. Für bestehende Bauten erfolgt die Berechnung in der Regel auf Basis des bisherigen Energieverbrauchs, also zum Beispiel anhand des jährlichen Heizölverbrauchs und des Jahresnutzungsgrades des bestehenden Wärmeerzeugers, wozu allerdings eine Aufteilung in Raumwärme, Warmwasser und Prozesse vorzunehmen ist. Wenn keine zuverlässigen Daten zum bisherigen Verbrauch oder zur Aufteilung in Raumwärme, Warmwasser und Prozesse möglich ist, können auch Messungen durchgeführt oder Schätzungen angenommen werden.

Der **Norm-Wärmeleistungsbedarf für Raumwärme** wird für Neubauten nach SIA 384.201 berechnet [82]. Im Gegensatz zur SIA 380/1 werden dabei keine Wärmegewinne berücksichtigt, da deren zeitlicher Anfall nicht steuerbar und nicht sicher vorhersagbar ist. Bei bestehenden Bauten ist die beste Methode zur Ermittlung des Wärmeleistungsbedarfs die Bestimmung der **Lastkennlinien** anhand von Messungen, was insbesondere bei grossen Verbrauchern und bei Prozesswärme sinnvoll ist [21]. Messungen sind aber nur möglich, wenn genügend Zeit und eine funktionsfähige Wärmeerzeugungsanlage zur Verfügung stehen. Zuverlässige Berechnungen zum Wärmeleistungsbedarf sind dagegen selten vorhanden oder die Daten beruhen auf veralteten Berechnungsmethoden. Für neue Berechnungen fehlen dagegen oft detaillierte Pläne und Informationen zum Wandaufbau und anderen Kenngrössen. Am häufigsten kommt deshalb eine Abschätzung des Wärmeleistungsbedarfs aus dem bisherigen Wärmeverbrauch zur Anwendung. Der maximale Wärmeleistungsbedarf für Raumwärme ergibt sich durch Division des Heizwärmebedarfs durch eine geeignete Vollbetriebsstundenzahl. Die Vollbetriebsstundenzahl ist abhängig vom Klima, der Heizgrenze, der Gebäudenutzung (Wohnen oder andere) sowie dem nicht witterungsabhängigen Anteil.

Bevorstehende Energiesparmassnahmen können den Jahreswärmebedarf, den Wärmeleistungsbedarf und den Temperaturbedarf beeinflussen und sind bei der Auslegung entsprechend zu berücksichtigen. Bei Gebäuden ist dabei entscheidend, dass der Anteil der Raumwärme durch bessere Gebäudetechnik deutlich sinkt, während der Bedarf an Warmwasser davon kaum betroffen ist. So machte die Warmwassererwärmung in den Jahren um 1970 lediglich knapp 10 % des Wärmebedarfs aus, während in Zukunft mit Werten bis gegen 50 % zu rechnen ist, wie in Kapitel 2.4 ausgeführt wird. Die Sanierung bestehender Gebäude kann deshalb während der Betriebszeit eines Fernwärmenetzes zu einer Reduktion des Raumwärmebedarfs führen und zusammen mit dem Anschluss von Neubauten einen deutlich sinkenden Anteil an Raumwärme verursachen.

2.1.2 Warmwasser und Prozesswärme

Die Berechnung des **Jahreswärmebedarfs für Warmwasser** bei Neubauten erfolgt üblicherweise aufgrund einer vorgegebenen Standardnutzung. Bei bestehenden Bauten erfolgt die Berechnung meist aufgrund des bisherigen Energieverbrauchs und einer Schätzung oder Messung zum Anteil für Warmwasser.

Der **Mittelwert** für den **Wärmeleistungsbedarf Warmwasser** bei Neubauten und bei bestehenden Bauten berechnet sich aus dem Wärmebedarf Warmwasser dividiert durch die jährliche Heizstundenzahl im Fall von Winterbetrieb oder durch 8760 Jahresstunden im Fall von Ganzjahresbetrieb. Der **Spitzenwert** des Wärmeleistungsbedarfs Warmwasser ergibt sich aus der Anschlussleistung des Warmwasserbereiters. Da in der Schweiz für Brauchwarmwasser meistens Speicher eingesetzt werden, während Durchflusserhitzer (Frischwasserstationen) selten sind, genügt für Wohnbauten in der Regel, wenn der **Jahreswärmebedarf Warmwasser** durch 4000 bis 6000 Vollbetriebsstunden dividiert wird. Damit wird eine Spitzenlast des Wärmeleistungsbedarfs berücksichtigt, welche rund doppelt so gross ist wie der Mittelwert bei 8760 Jahresstunden mit konstanter Leistung. Dies ist erforderlich, weil die Spitzenlast für den Warmwasserbedarf an gewissen Tagen erhöht sein kann, da der Warmwasserbedarf zum Beispiel vom Wochentag und von der Jahreszeit abhängen kann.

Der **mittlere Wärmeleistungsbedarf für Prozesswärme** berechnet sich aus der Division des Wärmebedarfs durch die jährlichen Betriebsstunden des Prozesswärmeverbrauchers, die in der Regel mittels Betriebsstundenzähler bestimmt wird. Auch bei Prozesswärme wird bei Bedarf eine höhere Spitzenlast berücksichtigt.

2.1.3 Temperaturbedarf

Der **Temperaturbedarf**, also das minimal notwendige Niveau der Vorlauftemperatur, ist abhängig von der Auslegung der Wärmeübertragung, der Art der Warmwasserbereitung und von weiteren Faktoren. Die Auslegung von Heizkörpern oder einer Fussbodenheizung und anderen Wärmeübertragern basiert meist auf Her-

stellerangaben und ist bei Neubauten bekannt. Bei bestehenden Bauten ist eine Abschätzung des Temperaturbedarfs aufgrund der vorhandenen Wärmeabnehmer (Radiator- oder Fussbodenheizungen, Warmwasserbereiter usw.) möglich. Empfohlen wird jedoch die Durchführung von Temperaturmessungen bei den Wärmeabnehmern bei tiefen Aussentemperaturen und einer Hochrechnung der gemessenen Wertepaare (Vorlauf-/Rücklaufemperatur, Aussentemperatur) auf Auslegungswerte.

2.2 Gesamtwärmebedarf

Bei der Bestimmung des Wärmeleistungsbedarfs der Gesamtanlage aus den Daten der einzelnen Wärmeabnehmer können folgende Herausforderungen auftreten, die bei der Auslegung zu beachten sind:

1. Der Wärmeleistungsbedarf für die Gesamtanlage ergibt sich aus einer Mischung von berechneten Werten mit mehr oder weniger grossen Sicherheitszuschlägen und realen Messwerten ohne Sicherheitszuschläge.
2. Der Norm-Wärmeleistungsbedarf für die Raumwärme nach SIA 384.201 basiert auf einer Norm-Umgebungstemperatur und berücksichtigt keine internen Wärmegewinne [82], während anhand von Messungen ermittelte Lastkennlinien auf realen Aussentemperaturen basieren und Wärmegewinne enthalten.
3. Zur Abschätzung des Wärmeleistungsbedarfs für Raumwärme aus dem Wärmebedarf bestehender Bauten wird eine Vollbetriebsstundenzahl benötigt. Da diese von verschiedenen Faktoren wie der Jahresdauerlinie der Aussentemperatur am Standort der Anlage, der Raumtemperatur, der Heizgrenze und der Grösse des nicht witterungsabhängigen Anteils ist, ist deren Abschätzung unsicher.
4. Aufheizleistungen zum Ausgleich einer intermittierenden Beheizung (z.B. Aufheizen von Bürogebäuden am Montagmorgen nach reduziertem Wochenendbetrieb) werden oft nicht berücksichtigt.
5. Messtechnisch bestimmte Lastkennlinien können für unterschiedliche Lastfälle durch Regression von Tagesmittelwerten bis zu 1-Stunden-Mittelwerten erstellt werden. Dabei muss aber beachtet werden, dass gemessene Spitzenlasten nicht allein vom Wärmeabnehmer abhängig sind, sondern auch durch den allenfalls begrenzenden Wärmeerzeuger oder durch die Systemträgheit beeinflusst werden.
6. Bestehende Gebäude weisen oft einen erheblichen nicht witterungsabhängigen Anteil Raumwärmeleistungsbedarf auf, der zum Beispiel infolge schlecht wärmedämmter Verteilung 5 % bis 10 % ausmachen kann und in der Lastkennlinie als Leistungssprung an der Heizgrenze in Erscheinung tritt. Während gemessene Lastkennlinien von Altbauten deshalb einen grossen witterungsabhängigen Anteil an Raumwärmeleistungsbedarf aufweisen können, wird dieser bei Neubauten nahezu vermieden.
7. Wie im Kapitel 2.1 ausgeführt, ist eine korrekte Auslegung des Wärmeleistungsbedarfs Warmwasser vorzunehmen, da die Spitzenlast infolge zeitlich un-

stetem Bedarf deutlich höher sein kann als der über das Jahr bestimmte Mittelwert.

Um die Zahlen für die Gesamtanlage aus einer Mischung von Berechnungen und realen Messwerten möglichst realitätsnah zu bestimmen, müssen deshalb folgende Fragen geklärt werden:

1. Wie werden Wärmegewinne bei Neubauten berücksichtigt.
2. Welches sind die geeigneten Vollbetriebsstundenzahlen zur Bestimmung des Wärmeleistungsbedarfs Raumwärme aufgrund des bisherigen Wärmebedarfs bei bestehenden Bauten.
3. Wie soll der nicht witterungsabhängige Anteil des Wärmeleistungsbedarfes für die Raumwärme berücksichtigt werden.

2.3 Wärmeleistungsbedarf

Zur überschlägigen Auslegung der Wärmeerzeugung dient die Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs. Diese basiert

1. auf der **Lastkennlinie der Gesamtanlage** nach Bild 2.1 und
2. der **Jahresdauerlinie der Aussentemperatur** nach Bild 2.2.

Die Informationen aus diesen zwei Grafiken werden in der in Bild 2.3 gezeigten **Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs** zusammengeführt.

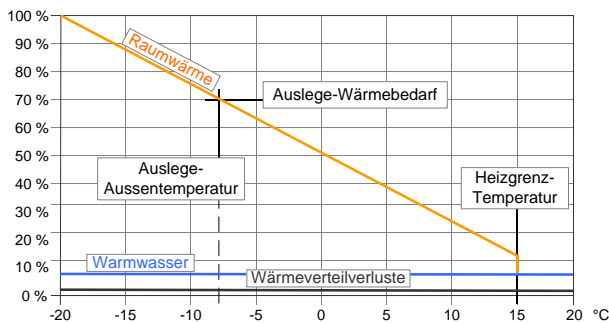


Bild 2.1 Gestapelte Lastkennlinie des Wärmeleistungsbedarfs der Gesamtanlage in Abhängigkeit der Aussentemperatur [21].

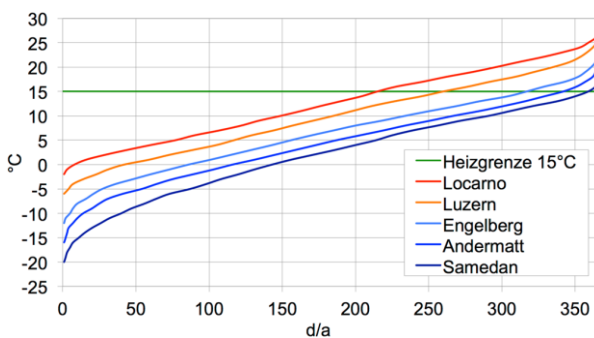


Bild 2.2 Aussentemperatur dargestellt als 10-Jahres-Tagesmittelwert von 2002 bis 2011 für unterschiedliche Standorte in der Schweiz [21]. Grün dargestellt ist eine Heizgrenze von 15°C.

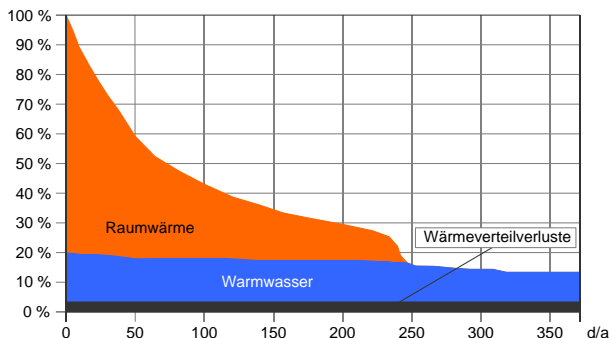


Bild 2.3 Charakteristische Jahresdauerlinie für ein Fernwärmenetz.

Die Darstellung des Wärmeleistungsbedarfs als Lastkennlinie (Bild 2.1) mit möglichst realen Aussentemperaturen ist aus der Praxis mit Messungen bei Sanierungen und Erweiterungen von grösseren Haustechnikanlagen hervorgegangen. Sie benötigt empirisch gestützte Entscheidungen wie die Wahl der Heizgrenze. Der Vorteil dieser Darstellung ist, dass Daten von Berechnungen aus dem bisherigen Energieverbrauch und solchen aus Messungen übersichtlich in einer Grafik vereint werden können.

Die Lastkennlinie der Gesamtanlage ergibt sich aus der Stapelung der einzelnen Lastkennlinien für Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme und Wärmeverteilverluste. Aus ihr kann der bei einer Auslegetemperatur notwendige Wärmeleistungsbedarf der Gesamtanlage herausgelesen werden.

Die Jahresdauerlinie der Aussentemperatur ist die Darstellung der Summenhäufigkeit der Aussentemperatur als Anzahl Tage pro Jahr. Aus Bild 2.2 kann beispielsweise herausgelesen werden, dass der 10-Jahres-Tagesmittelwert der Aussentemperatur in Luzern an 100 Tagen unter 4°C lag. Für die Aussentemperatur ist dabei immer der 24-Stunden-Mittelwert einzusetzen, hingegen kann der Wärmeleistungsbedarf ein Tagesmittelwert (z.B. für Wohnbauten) oder ein Spitzenwert (z.B. für ein Bankgebäude) sein.

Die Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs für die Gesamtanlage ergibt sich ebenfalls durch Stapelung mehrerer Jahresdauerlinien für Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme und Wärmeverteilverluste. Bild 2.3 zeigt beispielhaft die Jahresdauerlinien für Raumwärme, Warmwasser und Wärmeverteilverluste.

Im Beispiel sind die Wärmeverluste des Netzes über das Jahr vereinfachend als konstant angenommen, da sich die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf sowie die Temperatur des Erdreichs um die Fernwärmeleitung im Jahresverlauf nur geringfügig ändern.

Die zweite Komponente beschreibt den Wärmebedarf für Warmwasser. Dieser fällt ebenfalls ganzjährig an, wobei im gezeigten Beispiel ein leicht reduzierter Bedarf im Sommer dargestellt ist. Einfachheitshalber wird jedoch meistens auch der Warmwasserbedarf als über das Jahr konstant angenommen.

Die dritte Komponente beschreibt den Raumwärmebedarf mit dem grössten Anteil am gesamten Wärmebedarf.

2.4 Bedarf Altbau und Neubau

Raumwärme und Brauchwarmwasser in Gebäuden machen einen wichtigen Teil der Wärmeabnahme für Fernwärmenetze aus. Da diese durch den Gebäudestandard beeinflusst wird, werden nachfolgend die Jahresdauerlinien für Wohngebäude dargestellt. Diese beschreiben einen typischen Baustandard aus dem Jahr 1970 im Vergleich zu einem modernen Gebäudestandard. Der moderne Standard wird mit dem Jahr 2020 symbolisiert und entspricht etwa einem Gebäude nach Minergie-Standard von 2015 oder nach den Mustervor-

schriften der Kantone im Energiebereich (MuKE), deren Einführung im 2020 vorgesehen ist [71]. Basis für den Vergleich bilden die Werte nach Tabelle 2.1. Diese zeigt die Kennzahl für den Wärmeleistungsbedarf in W/m^2 sowie die Energiekennzahl in kWh/m^2a sowie die resultierenden Vollbetriebsstunden für den Raumwärmebedarf und den Warmwasserbedarf und das daraus resultierende Total. Das Gebäude von 1970 weist einen Wärmeleistungsbedarf bei Auslegungsbedingung ($-7^\circ C$, Zürich) von $85 W/m^2$ auf, während es für das Gebäude von 2020 noch $25 W/m^2$ sind.

Für die Darstellung der Jahresdauerlinien wird für den Standort Zürich auf Basis der Tagesmitteltemperaturen eine Auslegung nach [21] ausgeführt. Für ein Gebäude von 1970 ergeben sich damit Jahresdauerlinien nach Bild 2.4. Die obere Grafik zeigt den Absolutwert des Wärmeleistungsbedarfs in W/m^2 . Für ein Beispiel eines Gebäudes mit $1000 m^2$ Energiebezugsfläche entspricht der Zahlenwert somit gerade dem Wärmeleistungsbedarf in kW. In der unteren Grafik ist der Wärmeleistungsbedarf auf 100 % normiert, um den Verlauf mit dem rechts dargestellten neuen Gebäude zu vergleichen. Bild 2.5 zeigt dazu das Verhalten für das Wohngebäude mit Standard von 2020.

Tabelle 2.1 Leistungs- und Energiekennzahlen von Wohngebäuden (Beispiel) mit Standard 1970 und 2020 für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) pro m^2 Energiebezugsfläche und Auslegung auf $-7^\circ C$ (Zürich).

	Einheit	1970	2020
Raumwärmebedarf	W/m^2	80	20
	kWh/m^2a	185	20
Vollbetriebsstunden RW	h/a	2300	1000
Warmwasserbedarf	W/m^2	5	5
	kWh/m^2a	20	20
Vollbetriebsstunden WW	h/a	4000	4000
Bedarf RW+WW (= 100 %)	W/m^2	85	25
	kWh/m^2a	205	40
Vollbetriebsstunden RW+WW	h/a	2400	1600
Heizgrenze	$^\circ C$	15	10

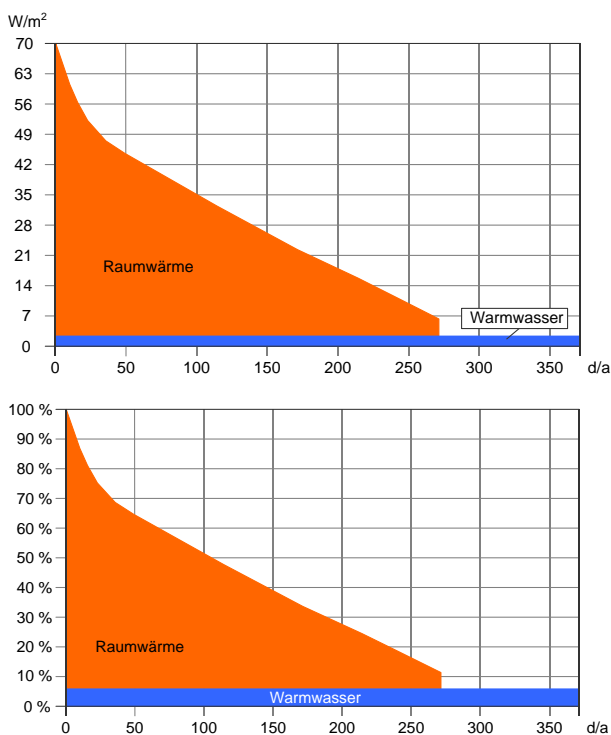


Bild 2.4 Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs für ein Wohngebäude von 1970 für Warmwasser und Raumwärme (Auslegung nach [21] für Zürich, Tagesmitteltemperatur $-7^\circ C$). Oben Wärmeleistungsbedarf in $[W/m^2]$. Unten in Prozent mit 100 % = Maximalwert.

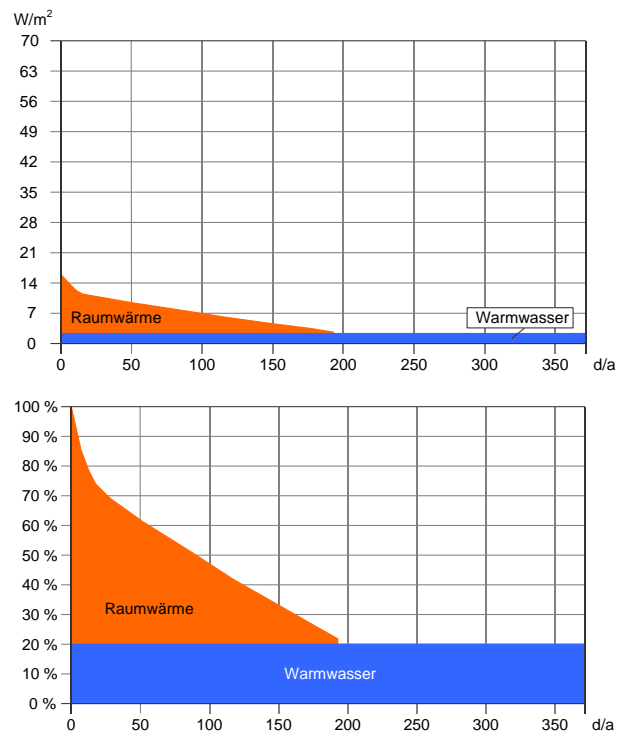


Bild 2.5 Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs für ein Wohngebäude von 2020 für Warmwasser und Raumwärme (Auslegung nach [21] für Zürich, Tagesmitteltemperatur $-7^\circ C$). Oben Wärmeleistungsbedarf in $[W/m^2]$. Unten in Prozent mit 100 % = Maximalwert.

Der Vergleich der Grafiken zeigt, dass die Heizgrenze durch den verbesserten Gebäudestandard deutlich sinkt und die Heizperiode um rund 50 Tage verkürzt wird. Der Energiebedarf für Raumwärme und Warm-

wasser sinkt dabei nach Tabelle 2.1 von 205 kWh/m²a auf 40 kWh/m²a oder auf 20 % des Ausgangswerts. Demgegenüber steigt der Anteil des Warmwassers an der Anschlussleistung von 6 % im Altbau auf 20 % im Neubau. Der Anteil des Warmwassers am Energieverbrauch steigt sogar von knapp 10 % auf 50 %, was auch von anderen Untersuchungen prognostiziert wird [43].

Dass ein Neubau einen deutlich höheren Grundlastanteil für Warmwasser aufweist als ein Altbau, ist für den Sommerbetrieb eines Fernwärmenetzes vorteilhaft. Da allerdings die Vollbetriebsstundenzahl für Raumwärme im Neubau gegenüber dem Altbau auf weniger als die Hälfte sinkt, weist der Neubau für Raumwärme und Warmwasser zusammen trotzdem mit jährlich 1600 statt 2400 Vollbetriebsstunden eine geringere mittlere Auslastung auf als ein Altbau, was für ein Fernwärmenetz nachteilig ist.

Bei der Auslegung von Fernwärmenetzen ist somit zu beachten, dass die Gebäudestruktur einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmebedarf hat und dass dieser durch Gebäudesanierungen während der Betriebszeit eines Fernwärmenetzes ändern kann. Wenn der Wärmeabsatz sinkt, steigen die prozentualen Wärmeverteilungsverluste und die Kapitalkosten, während die Anschlussdichte abnimmt. Für Versorgungsgebiete mit Minienergie-Bauten sind die niedrigen Anschlussleistungen nachteilig für Fernwärme, dagegen ist der Anteil Warmwasser und damit der Grundlastanteil im Sommer deutlich höher.

2.5 Auslegung Wärmeerzeuger

Bei der Auslegung der Wärmeerzeugung muss entschieden werden, ob zur Deckung des Wärmebedarfs ein einziger oder mehrere Wärmeerzeuger zum Einsatz kommen und ob die Leistung auf einen oder mehrere Energieträger aufgeteilt wird.

Im Falle eines Wärmeerzeugers muss dieser auf die maximal benötigte Wärmeleistung ausgelegt werden. Zur Versorgung von Gebäuden setzt dies voraus, dass der Wärmeerzeuger direkt oder mit Einbindung eines Wärmespeichers einen entsprechend grossen Lastbereich abdecken kann. Für die Warmwasserversorgung im Sommer beträgt die Minimalleistung für Altbauten lediglich rund 6 %, während der Wert für Neubauten immerhin 20 % ausmacht und für das Fernwärmenetz in beiden Fällen noch zusätzlich die Wärmeverteilungsverluste zu decken sind. Der resultierende Leistungsbereich umfasst damit je nach Verbraucher und Netz oft einen Faktor 5 oder mehr. Um diesen Leistungsbereich abzudecken, ist in vielen Fällen der Einsatz von zwei oder mehr Wärmeerzeugern vorteilhaft. Im Fall von automatischen Holzheizungen können dadurch ein besserer Anlagenbetrieb mit tieferen Emissionen und geringeren Wärmeverlusten der Heizkessel erzielt sowie der Aufwand für Hilfsenergie und Unterhalt reduziert werden.

Basis für die Auslegung bildet die gestapelte Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs, die durch Berechnung, Messung oder Vergleich mit ähnlichen Fernwärme-

netzen ermittelt wird, wie in Kapitel 2.3 beschrieben ist. Die Fläche unter der Jahresdauerlinie stellt den Jahreswärmebedarf dar, die wie in Bild 2.6 gezeigt in Grund- und Spitzenlast aufgeteilt werden kann. Die Grundlast ist dabei durch eine hohe Betriebsstundenzahl charakterisiert, während die Spitzenlast den über die Grundlast hinausgehenden Wärmeleistungsbedarf mit geringer Betriebsstundenzahl beschreibt.

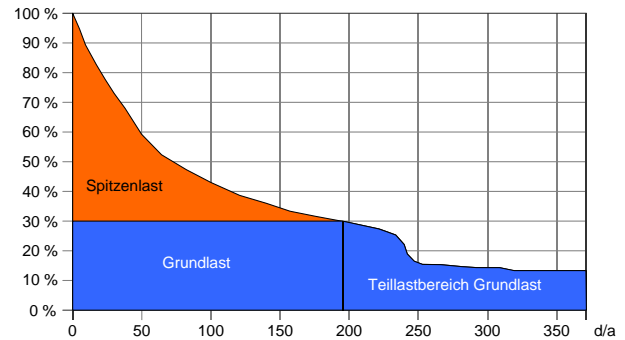


Bild 2.6 Aufteilung der Jahresdauerlinie in Grundlast und Spitzenlast.

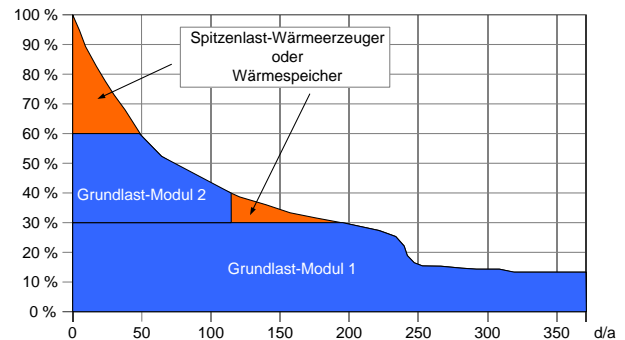


Bild 2.7 Deckung der Grundlast mit mehreren Grundlast-Modulen.

Der wirtschaftliche Leistungsanteil der Grundlast beträgt je nach Wärmeerzeuger meist zwischen 10 % und 60 % der Maximalleistung, womit in der Regel zwischen 50 % und 90 % des gesamten Jahreswärmebedarfs abgedeckt werden [43]. Bild 2.6 zeigt einen Anteil von 30 %, was zum Beispiel einem mit Biogas betriebenen Blockheizkraftwerk (BHKW) entsprechen kann, bei der ein Sommerbetrieb mit reduzierter Leistung oder (so weit zulässig) mit nur teilweiser Wärmenutzung erfolgt.

Wenn der oder die Grundlast-Wärmeerzeuger aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nur begrenzt bei Teillast betrieben werden können, wird der Spitzenlast-Wärmeerzeuger oft auch zur Abdeckung der Schwachlast eingesetzt, was im Beispiel in Bild 2.7 dargestellt ist. Dies kann zum Beispiel für eine automatische Holzfeuerung sinnvoll sein, da ein Schwachlastbetrieb insbesondere bei Verwendung nasser Brennstoffe zu erhöhten Emissionen führen kann.

Bei grösseren Einheiten kann zudem der Deckungsanteil des Grundlast-Energieträgers auch durch mehrmodulige Grundlastanlagen erhöht und damit auch eine zusätzlich Redundanz erzielt werden (Bild 2.7).

Als weitere Massnahme kommt zunehmend auch die Einbindung von gross dimensionierten Wärmespeichern zur Anwendung. Dies ermöglicht eine Glättung des Wärmeleistungsbedarfs und damit eine Erhöhung des Grundlastanteils. Im Fall von Wärme-Kraft-Kopplung ermöglicht die Wärmespeicherung zudem einen zeitweise stromgeführten Betrieb, wodurch der Ertrag der Stromeinspeisung erhöht und Spitzen im Strombezug reduziert werden können [43].

Sofern zur Wärmeversorgung eine Abwärmequelle zur Verfügung steht, wird die Abwärme aus wirtschaftlichen Gründen vorab zur Deckung der Grundlast genutzt. Dies betrifft auch Abwärme von WKK-Anlagen, die nach Möglichkeit weitgehend wärmegeführt betrieben werden. Sofern keine Abwärme zur Verfügung steht, kommen für die Grundlast oft Techniken mit hohen Kapital- und geringen Betriebskosten zum Einsatz. Dies trifft insbesondere für automatische Holzfeuerungen zu, welche hohe Kapitalkosten und relativ niedrige Brennstoffkosten aufweisen. Daneben weisen auch solarthermische Anlagen hohe Kapitalkosten und niedrige Betriebskosten auf. Die Einbindung von Solarwärme ist deshalb meist auf die Grundlast beschränkt und kann auch dazu nur einen Teil als Zusatzheizung decken.

Für die Spitzenlastabdeckung sowie für allfällige Reservevorhaltung kommen bis anhin oft Heizkessel mit Erdgas oder Heizöl zum Einsatz. Damit Fernwärme in Bezug auf CO₂-Emissionen einen deutlichen Vorteil gegenüber dezentralen Öl- und Gasheizungen erzielt, ist ein fossiler Spitzenlastanteil durch geeignete Auslegung gering zu halten. In der Regel ist ein Anteil der Grundlast-Wärmeerzeuger von 80 % bis 90 % am Jahreswärmebedarf möglich.

Zusammenfassend sind für die Kombination von Grundlast- und Spitzenlast-Wärmeerzeuger damit die Bedingungen nach Tabelle 2.2 typisch.

Tabelle 2.2 Typische Charakteristiken für Grundlast- und Spitzenlast-Wärmeerzeuger.

Grundlast	Spitzenlast
Betrieb bei Nennlast oder bei Teillast in begrenztem Lastbereich	Häufiger Betrieb im Teillastbereich
Hohe Auslastung bzw. grosse Vollbetriebsstundenzahl	Geringe Auslastung bzw. kleine Vollbetriebsstundenzahl
Wenig und langsame Lastwechsel	Häufige und rasche Lastwechsel
Wenig Anfah- und Abfahrzyklen	Häufige Anfah- und Abfahrzyklen

2.6 Bewertung von Wärme und Strom

2.6.1 Wirkungsgrad und Nutzungsgrad

Der **Wirkungsgrad** einer Anlage wird als Verhältnis zwischen Nutzenergie und zugeführter Energie definiert. Bei stationären oder pseudo-stationären Bedingungen und ohne Verfälschung durch Energiespeicherung kann er auch als Verhältnis zwischen momentaner Nutzleistung und momentan zugeführter Leistung in kW/kW bestimmt werden.

Im vorliegenden Handbuch wird die Bezeichnung Wirkungsgrad für einen über die Leistungen bestimmten **Momentanwert** oder für einen über eine **kurze Betrachtungsdauer** in der Größenordnung von Stunden bestimmten Wert verwendet. Beispiele dafür sind der mechanische Wirkungsgrad eines Motors in einem Lastpunkt oder der Kesselwirkungsgrad eines kontinuierlich betriebenen Heizkessels im stationären Zustand bei konstanter Leistung. Ein so bestimmter Wirkungsgrad gilt entweder für einen Lastpunkt oder für einen bestimmten Betriebszyklus. Ein Beispiel für einen Betriebszyklus ist ein Abbrand eines handbeschickten Stückholzkessels, der einige Stunden dauert. Während des Abbrands ist der Betrieb instationär, Verfälschungen durch Speichereffekte werden aber durch Wiederreichen des thermischen Ausgangszustands kompensiert. Grundsätzlich erfolgt auch bei einem Verbrennungsmotor eine Betrachtung über mindestens einen Zyklus, bei einem Viertaktmotor also über vier Takte. Die Zyklusdauer ist bei einem Motor aber viel kürzer, weshalb der Betrieb bereits bei einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde als pseudo-stationär erscheint.

Für eine Bewertung über einen längeren Zeitraum wird der Begriff Nutzungsgrad eingeführt. Der **Nutzungsgrad** wird definiert als Verhältnis zwischen der über eine längere Betrachtungsdauer aufsummierten Nutzleistung zu der über die Betrachtungsdauer aufsummierten zugeführten Leistung. Als Betrachtungsdauer wird oft ein Jahr gewählt und der ermittelte Wert dann als **Jahresnutzungsgrad** bezeichnet. Der Jahresnutzungsgrad entspricht also dem Verhältnis der in einem Jahr produzierten zu der in einem Jahr zugeführten Energie in (kWh/a)/(kWh/a).

Eine Unterscheidung zwischen Momentanwerten und den über einen längeren Zeitraum aufsummierten Leistungen erfolgt auch bei Wärmepumpen. So beschreibt die Leistungszahl einer Wärmepumpe das Verhältnis zwischen Nutzwärmeleistung und zugeführter elektrischer Leistung als Momentanwert, während die Jahresarbeitszahl das Verhältnis zwischen der Jahreswärmeleistung und dem Jahresstromverbrauch beschreibt.

Während Angaben zu Wirkungsgraden oft ein einzelnes Aggregat wie einen Motor oder einen Heizkessel beschreiben, dienen Nutzungsgrade oft zur Beschreibung ganzer Anlagen oder Systeme. Im Nutzungsgrad kann deshalb ein grösseres Bilanzgebiet abgedeckt werden.

Für eine aussagekräftige Beurteilung sind deshalb die jeweiligen Bilanzgrenzen exakt zu definieren. Bei Anlagen zur Stromproduktion betrifft dies zum Beispiel die Berücksichtigung des Eigenstromverbrauchs. So entspricht die Stromproduktion am Generator der Brutto-Produktion, während nach Abzug des Eigenstromverbrauchs die Netto-Produktion resultiert. Brutto- und Netto-Werte wiederum können aber sowohl für Wirkungsgrade als auch für Nutzungsgrade ausgewiesen werden.

2.6.2 Gesamtwirkungsgrad

Der **Gesamtwirkungsgrad** bezeichnet die Summe von elektrischem Wirkungsgrad und Wirkungsgrad zur Wärmenutzung. Im Zusammenhang mit Fernwärme kommen zur Stromerzeugung vor allem thermische Anlagen mit Dampfturbinen oder ORC-Anlagen zum Einsatz. Solche Dampfprozesse erzielen maximale elektrische Wirkungsgrade, wenn die Kondensation des Prozessmediums bei tiefstmöglicher Temperatur erfolgt. Dazu kann die Abwärme zum Beispiel über einen Kühlturm an die Umgebung abgeführt werden. Wenn die Abwärme dagegen genutzt werden soll, muss die Kondensation bei höherer Temperatur erfolgen, wodurch der elektrische Wirkungsgrad sinkt. Zur Unterscheidung der verschiedenen Anwendungen sind in Bild 2.8 Wirkungsgrade der Wärme- und Stromerzeugung dargestellt.

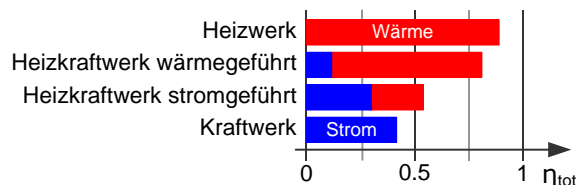


Bild 2.8 Gesamtwirkungsgrad mit Anteilen der Wärme (rot) und der Stromproduktion (blau) für Heizwerk, Heizkraftwerk wärmegeführt und Kraftwerk. Die Grafik zeigt das qualitative Verhalten und entsprechen zum Beispiel folgenden Anlagentypen (v.o.n.u):
 0,5–10 MW_q Holzheizwerk,
 0,5 MW_{el} Holzheizkraftwerk,
 20 MW_{el} Holzheizkraftwerk,
 500 MW_{el} Kohlekraftwerk.

In einem reinen **Kraftwerk** erfolgt keine Abwärmenutzung. Der elektrische Wirkungsgrad wird dabei maximal und entspricht gleichzeitig dem Gesamtwirkungsgrad. Wegen der Verluste zur Umwandlung von Wärme in Strom ist der Gesamtwirkungsgrad niedriger als bei Anlagen mit Wärmenutzung.

Ein **Heizkraftwerk** ist eine thermische Anlage mit Wärme-Kraft-Kopplung. Für Dampfanlagen wird der elektrische Wirkungsgrad durch die Wärmenutzung reduziert. Wenn das Heizkraftwerk **stromgeführt** betrieben wird, wird ein Teil der Wärme genutzt, was zu einer Verminderung des elektrischen Wirkungsgrads führt, während der Rest als Abwärme an die Umgebung abgegeben wird. Bei einem **wärmegeführten** Betrieb wird die gesamte Abwärme genutzt und der elektrische Wirkungs-

grad dadurch weiter vermindert. Gleichzeitig steigt mit zunehmender Wärmenutzung der Gesamtwirkungsgrad.

Ein **Heizwerk** produziert nur Wärme und erreicht den höchsten Gesamtwirkungsgrad.

Für Momentanwerte oder kurzfristige Betrachtungen gelten für den **Wirkungsgrad** eines Heizkraftwerks folgende Bedingungen:

$$\eta_q = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{Q}_{Br}}$$

$$\eta_{el} = \frac{P}{\dot{Q}_{Br}}$$

$$\eta_{tot} = \frac{\dot{Q}_K + P}{\dot{Q}_{Br}} = \eta_q + \eta_{el}$$

η_q = Wirkungsgrad Wärmeproduktion [-]

η_{el} = Wirkungsgrad Stromproduktion [-]

η_{tot} = Gesamtwirkungsgrad [-]

P = Stromproduktionsleistung [kW]

\dot{Q}_K = als Wärme nutzbare Kesselleistung [kW]

\dot{Q}_{Br} = zugeführte Wärmeleistung im Brennstoff [kW]

Für ein reines Kraftwerk gilt:

$$\eta_q = 0$$

$$\eta_{tot} = \eta_{el}$$

Für ein Heizwerk gilt:

$$\eta_{el} = 0$$

$$\eta_{tot} = \eta_q$$

Für einen Heizkessel wird der Wirkungsgrad der Wärmeproduktion zum Kesselwirkungsgrad:

$$\eta_q = \eta_K$$

η_K = Kesselwirkungsgrad [-]

Für einen Dampfkessel zum Antrieb eines Dampfprozesses dient dagegen ein Teil der Kesselleistung zur Stromerzeugung mit $\eta_{el} > 0$. In dem Fall gilt:

$$\eta_q < \eta_K$$

Für Bewertungen über längere Betrachtungsperioden gelten die Bedingungen analog für den **Nutzungsgrad**. Diese werden am Beispiel des **Jahresnutzungsgrads** beschrieben und mit dem Index a gekennzeichnet:

$$\eta_{q,a} = \frac{Q_{K,a}}{Q_{Br,a}}$$

$$\eta_{el,a} = \frac{E_{el,a}}{Q_{Br,a}}$$

$$\eta_{tot,a} = \frac{Q_{K,a} + E_{el,a}}{Q_{Br,a}} = \eta_{q,a} + \eta_{el,a}$$

$\eta_{q,a}$ = Jahresnutzungsgrad Wärmeproduktion [-]

$\eta_{el,a}$ = Jahresnutzungsgrad Stromproduktion [-]

$\eta_{tot,a}$ = Jahres-Gesamtnutzungsgrad [-]

$Q_{K,a}$ = Jährliche Wärmeproduktion [kWh/a]

$E_{el,a}$ = Jährliche Stromproduktion [kWh/a]

$Q_{Br,a}$ = zugeführte Energie im Brennstoff p.a. [kWh/a]

Für einen Heizkessel wird der Jahresnutzungsgrad der Wärme zum Jahresnutzungsgrad des Kessels:

$$\eta_{q,a} = \eta_{K,a}$$

$\eta_{K,a}$ = Jahresnutzungsgrad des Kessels [-]

Um eine hohe Gesamtausnutzung des Brennstoffs zu erzielen, kommen zwei Anwendungsarten infrage:

- Entweder werden hohe elektrische Wirkungsgrade angestrebt und dabei ein Betrieb ohne oder mit nur teilweiser Wärmenutzung zugelassen. Solche Anlagen können stromgeführt betrieben werden und auch bei sinkendem Wärmebedarf einen Beitrag zur Stromversorgung leisten. Ein Beispiel dafür sind Erdgas-Kombikraftwerke, die bei Leistungen von über 500 MW_{el} einen elektrischen Wirkungsgrad von gegen 60 % erzielen.
- Daneben können Anlagen mit geringen elektrischen Wirkungsgraden und dafür vollständiger Nutzung der Abwärme eingesetzt werden. Solche Anlagen werden weitgehend wärmegeführt betrieben und daher in Heizkraftwerken auf den Grundlastwärmebedarf ausgelegt. Entsprechende Anlagen werden in der Schweiz vor allem im Leistungsbereich von weniger als 10 MW_{el} ausgeführt. Beispiele sind Holzheizkraftwerke mit Dampfturbinen oder ORC-Modulen.

2.6.3 Gewichteter Gesamtwirkungsgrad

Da Elektrizität eine höhere Wertigkeit als Wärme aufweist, wird für einen Vergleich von Wärme- und Stromerzeugung ein **Gewichtungsfaktor für Elektrizität** eingeführt und für ein Heizkraftwerk damit ein **gewichteter Gesamtwirkungsgrad** wie folgt definiert:

$$\eta_{tot,gew} = \frac{\dot{Q}_K + f_{el} \cdot P}{\dot{Q}_{Br}} = \eta_q + f_{el} \cdot \eta_{el}$$

$\eta_{tot,gew}$ = Gewichteter Gesamtwirkungsgrad [-]

f_{el} = Gewichtungsfaktor für Elektrizität [-]

Daraus kann der **gewichtete Gesamtnutzungsgrad** abgeleitet werden. Dieser wird mit dem Index a beschrieben, was dem gewichteten Gesamtnutzungsgrad über ein Jahr entspricht. Die Ausführungen gelten jedoch auch für andere Betrachtungsdauern, weshalb im Folgenden vereinfachend von gewichtetem Gesamtnutzungsgrad gesprochen wird. Damit gilt:

$$\eta_{tot,a,gew} = \frac{Q_{K,a} + f_{el} \cdot E_{el,a}}{Q_{Br,a}} = \eta_{q,a} + f_{el} \cdot \eta_{el,a}$$

$\eta_{tot,a,gew}$ = Gewichteter Gesamtnutzungsgrad [-]

Für $f_{el} = 1$ gilt: $\eta_{tot,gew} = \eta_{tot}$ und $\eta_{tot,a,gew} = \eta_{tot,a}$.

Eine effektive Gewichtung der Elektrizität erfolgt, wenn ein Wert von $f_{el} > 1$ eingesetzt wird. Der gewichtete Gesamtwirkungsgrad kann dann ebenfalls Werte > 1 erreichen und darf nicht mit ungewichteten Werten verglichen werden.

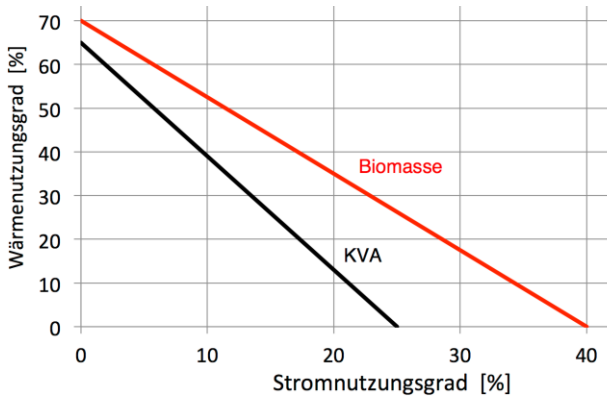


Bild 2.9 Mindestanforderung Energieverordnung für Dampfprozesse (ENV Anhang 1.5, Absatz 3.3 (KVA) und Absatz 6.3 Buchstabe a (Biomasse) [75]) zur Vergütung der kostendeckenden Einspeisevergütung für Biomasse-Strom (Bild 2.9, Artikel 7a EnG, Biomasse Anh. 1.5 EnV [76]). Die Betrachtungsdauer ist ein Jahr und es darf die Brutto-Stromproduktion bewertet werden.

Eine effektive Gewichtung der Elektrizität erfolgt zum Beispiel auch in den Mindestanforderungen zur **kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV)** aus thermischen Anlagen [75]. Bild 2.9 zeigt dazu die von der Energieverordnung (EnV) [76] verlangte Mindestanforderung zur KEV für Dampfprozesse, die mit Biomasse befeuert oder in Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) installiert werden [76]. Für Anlagen zur Nutzung von Biomasse werden dabei deutlich höhere Anforderungen verlangt als für KVA.

In [76] wird ausgeführt, dass die Nutzungsgrade über ein Jahr zu bewerten sind und dass die gesamte Stromproduktion ohne Abzug des Eigenverbrauchs bewertet werden darf. Die KEV-Anforderungen entsprechen also einem gewichteten Gesamtnutzungsgrad der Brutto-Stromproduktion über ein Jahr.

Für **Biomasse** entspricht die EnV folgender Forderung:

$$\eta_{tot,a,gew} = (\eta_{q,a} + f_{el} \cdot \eta_{el,a}) \geq 70\%$$

mit $f_{el} = 70\% / 40\% = 1.75$.

Für **KVA** gilt:

$$\eta_{tot,a,gew} = (\eta_{q,a} + f_{el} \cdot \eta_{el,a}) \geq 65\%$$

mit $f_{el} = 65\% / 25\% = 2.60$.

Die EnV führt also eine Gewichtung der Elektrizität mit einem Faktor von 1.75 bzw. von 2.60 ein.

Bild 2.10 zeigt den Einfluss des elektrischen Wirkungsgrads und des Gewichtungsfaktors auf den gewichteten Gesamtnutzungsgrad für ein Heizwerk, ein Heizkraftwerk und ein Kraftwerk. Für den Gewichtungsfaktor ist ein Basiswert von 1.75 gemäss EnV für Biomasse angenommen und zusätzlich ein doppelt so hoher Wert von 3.5 eingesetzt. Die Werte mit in realen Anlagen erzielbaren Nutzungsgraden sind fett dargestellt und decken für das Heizkraftwerk elektrische Nutzungsgrade von 10 % bis 40 % sowie für das Kraftwerk von 30 % bis 60 % ab. Für das Heizkraftwerk ist dabei ein wärmegeführter Betrieb angenommen.

Die Grafik zeigt, dass bei einer Gewichtung der Elektrizität mit einem Faktor 3.5 sowohl ein Heizkraftwerk als auch ein Kraftwerk einen höheren gewichteten Gesamtnutzungsgrad erzielen als ein Heizwerk. Bei einer Gewichtung von 1.75 erzielen Heizwerke und Heizkraftwerke ähnliche Gesamtwerte, während ein Kraftwerk erst ab einem elektrischen Wirkungsgrad von über 50 % gleich hohe oder höhere Werte erzielt.

Der für die Stromproduktion eingeführte Gewichtungsfaktor für Elektrizität kann auch zur Bewertung von Verbrauchern angewendet und dazu mit der Leistungszahl oder Jahresarbeitszahl (JAZ) einer Wärmepumpe verglichen oder als solcher interpretiert werden. Für andere Anwendungen als eine Wärmepumpe, wie etwa dem Stromverbrauch einer Wärmerückgewinnung, kann die Gewichtung auch allgemein als Faktor der Elektro-Thermo-Verstärkung (ETV) interpretiert werden.

Für die **Leistungszahl ε** (auch Coefficient of Performance (COP)) einer Wärmepumpe gilt:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{P_{el}} = \frac{\dot{Q}_{Zu} + P_{el}}{P_{el}} = 1 + \frac{\dot{Q}_{Zu}}{P_{el}} = \frac{T - T_u}{T} = 1 - \frac{T_u}{T}$$

\dot{Q}_{Nutz} = Nutzwärmeleistung [kW]

\dot{Q}_{Zu} = zugeführte Wärmeleistung [kW]

P_{el} = zugeführte elektrische Leistung [kW]

T = obere Temperatur (Nutzwärme) [K]

T_u = untere Temperatur (zugeführte Wärme) [K]

Der Index n bezeichnet die abgegebene Nutzwärme beim oberen Temperaturniveau T . Der Index u bezeichnet die Wärmezufuhr durch Umgebungs- oder Abwärme beim unteren Temperaturniveau T_u .

Die zwischen zwei Temperaturniveaus theoretisch erzielbare Leistungszahl wird als Carnot-Leistungszahl ε_C bezeichnet, da der Prozess einen linksläufigen Carnot-Prozess beschreibt. Bild 2.16 zeigt den Einfluss der Temperaturen auf die Carnot-Leistungszahl.

Das Verhältnis zwischen realer und theoretischer Leistungszahl wird Gütegrad η_{WP} genannt und erreicht typische Werte von $\eta_{WP} = \varepsilon/\varepsilon_C = 0.4 - 0.55$.

Für die **Jahresarbeitszahl (JAZ)** gilt:

$$JAZ = \frac{Q_{Nutz}}{E_{el}} = \frac{Q_{Zu} + E_{el}}{E_{el}}$$

Q_{Nutz} = jährlich produzierte Nutzwärme [kWh/a]

Q_{Zu} = jährlich zugeführte Wärme [kWh/a]

E_{el} = jährlicher Stromverbrauch [kWh/a]

Als Vergleich zu einem Referenzfall mit dezentralen und mit Brennstoffen betriebenen Heizungen kann somit ein Szenario betrachtet werden, in dem ein Heizkraftwerk mit dem zuvor in Heizungen genutzten Brennstoffen betrieben wird. Die Wärme wird dabei zum Beispiel für Fernwärme genutzt, während der Strom zum Antrieb von dezentralen Wärmepumpen dient, die Umgebungswärme als Wärmequelle verwenden und auf die Nutzwärme anheben. Der Energiefluss für dieses Szenario ist in Bild 2.11 in einem Sankey-Diagramm dargestellt. Für das Heizkraftwerk ist dabei ein Nutzungsgrad zu Wärme von 60 % und zu Strom von 20 % angenommen, was einem Gesamtnutzungsgrad von 80 % entspricht. Wenn für Wärmepumpen eine Jahresarbeitszahl von 3.5 angenommen und diese als Gewichtungsfaktor für die Elektrizität interpretiert wird, resultiert ein gewichteter Gesamtwirkungsgrad von 130 %. Die Differenz zwischen dem gewichteten Gesamtwirkungsgrad von 130 % und dem Gesamtwirkungsgrad von 80 % entspricht der durch die Umgebungswärme zugeführten Leistung von 50 %, die nicht als Aufwand bewertet wird.

Mit dem gleichen Brennstoff kann somit die 1.625-fache Nutzwärme produziert werden (130 % / 80 %). Alternativ kann auch die gleiche Nutzwärme mit 61.5 % des Brennstoffs erzeugt werden (1/1.625), was einer Einsparung an Primärenergie um 38.5 % entspricht. Das

in Bild 2.11 beschriebene Beispiel ist auch in Bild 2.10 als Beispiel eingetragen.

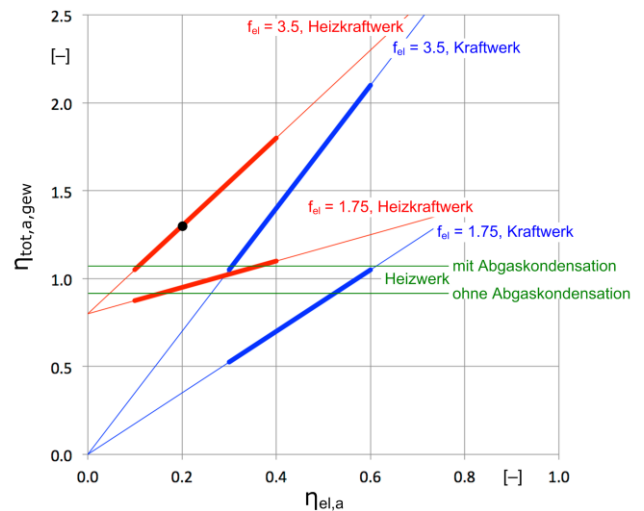


Bild 2.10 Gewichteter Gesamtnutzungsgrad für $f_{el} = 1.75$ und $f_{el} = 3.5$ für vier Szenarien: 1. Heizwerk ohne und mit Abgaskondensation, 2. Heizkraftwerk wärmegeführt mit $\eta_{tot} = 0.8$, 3. Kraftwerk (ohne Abwärmenutzung). Der Punkt entspricht Bild 2.11.

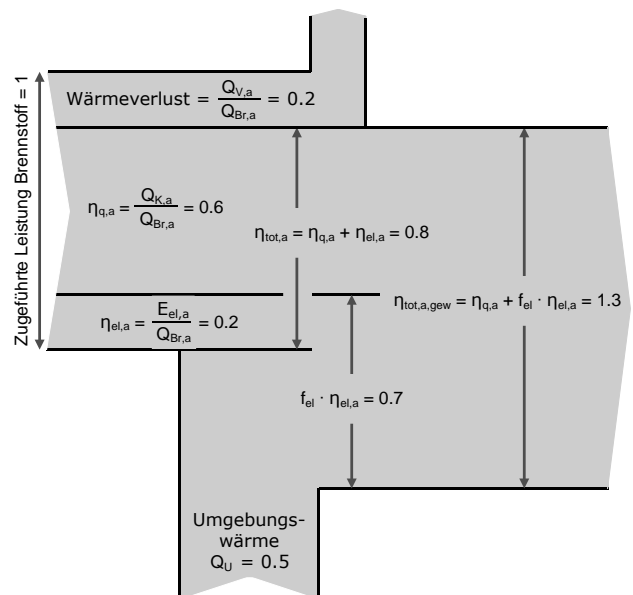


Bild 2.11 Sankey-Diagramm für das Szenario eines Heizkraftwerks, dessen Stromproduktion zum Antrieb von Wärmepumpen genutzt wird. Annahmen: Heizkraftwerk: $\eta_{el,a} = 20\%$, $\eta_{q,a} = 60\%$. Gewichtung Elektrizität: $f_{el} = JAZ = 3.5$. Für dieses Beispiel resultiert ein gewichteter Gesamtnutzungsgrad von 130 %, was in Bild 2.10 als Punkt eingezeichnet ist.

2.7 Wärmeerzeugung und Potenzial der Fernwärme

Eine Zentrale zur Erzeugung von Wärme wird als **Heizwerk** oder im Fall eines Fernwärmenetzes auch als **Fernheizwerk** bezeichnet. Wenn Strom und Nutzwär-

me produziert werden, wird die Zentrale als **Heizkraftwerk** bezeichnet. Als Wärmequellen für Fernwärme dienen meist folgende Prozesse und Energieträger:

- Automatisch betriebene Heizkessel für Energieholz wie Waldhackschnitzel, Restholz, Altholz und Holzpellets. Entsprechende Holzpellets kommen in Fernwärmenetzen zur Deckung der Grundlast oder des gesamten Wärmebedarfs zur Anwendung.
- Mit Erdgas oder Heizöl betriebene Heizkessel kommen oft zur Deckung der Spitzenlast zum Einsatz, während für neue Fernwärmenetze eine rein fossile Versorgung ausgeschlossen wird.
- Abwärme auf einem direkt nutzbaren Temperaturniveau von über 70°C aus industriellen Prozessen kann theoretisch für Fernwärme genutzt werden, in der Regel sind aber andere Massnahmen wie eine prozessinterne Nutzung vorteilhaft.
- Abwärme aus Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung bei über 70°C. Beispiele sind Dampfturbinen in KVA oder Holzheizkraftwerken, mit Holz betriebene ORC-Anlagen sowie mit Erdgas oder Biogas betriebene BHKW. Da WKK-Anlagen hohe Kapitalkosten aufweisen, ist ein Betrieb mit hohen Vollbetriebsstunden notwendig. WKK-Anlagen verfügen deshalb oft über einen Spitzenlastkessel, während die als Fernwärme genutzte Abwärme zur Deckung der Grundlast dient.
- Wärmepumpen zur Nutzung von Umgebungs- oder von Niedertemperaturabwärme. Umgebungswärme wird zum Beispiel aus der Luft oder mittels Erdwärmesonden genutzt. Niedertemperaturabwärme fällt zum Beispiel im Abwasser an, das in einzelnen

Gebäuden oder zentral in der Kanalisation als Wärmequelle genutzt werden kann. Ein grosses Potenzial an Niedertemperaturabwärme enthält zudem das geklärte Wasser im Auslauf von Abwasserreinigungsanlagen (ARA).

- Daneben kommt als Zusatzheizung in Fernwärmenetzen auch der Einsatz von solarthermischen Anlagen infrage. Dabei wird in der Regel ein auf einen Tag ausgelegter Wärmespeicher eingebunden und die Solaranlage aus wirtschaftlichen Gründen auf den sommerlichen Warmwasserbedarf ausgelegt. Für bestehende Wohnbauten wird damit ein solarer Deckungsgrad der gesamten Wärmeerzeugung von weniger als 10 % erreicht, während für Neubauten auch deutlich höhere Werte möglich sind. Die Einbindung solarthermischer Anlagen in Fernheizwerke ist in der Schweiz allerdings noch kaum verbreitet, da die Wärmeerzeugungskosten bis anhin meist höher sind als die Grenzkosten der sonstigen Wärmeerzeugung.
- In Regionen mit heissen Gesteinsschichten in Oberflächennähe kommt theoretisch auch eine direkte geothermische Fernwärmenutzung infrage. In der Schweiz sind entsprechende Schichten aber kaum gegeben, weshalb sich oberflächennahe Geothermie bis anhin weitgehend auf die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme für Wärmepumpen beschränkt. Sofern dagegen tiefe Geothermie und höhere Temperaturniveaus genutzt werden sollen, steht dabei die Stromerzeugung in einem thermischen Prozess im Vordergrund, wobei die Abwärme zur Fernwärmeauskopplung genutzt werden könnte.

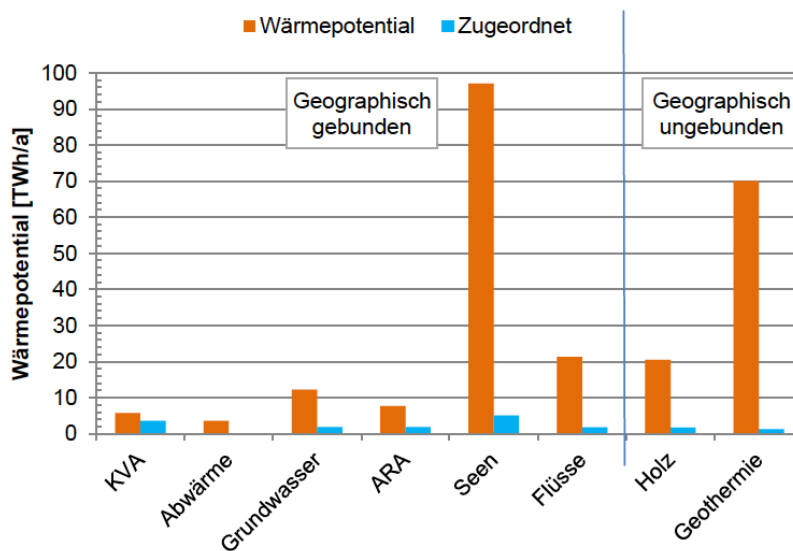


Bild 2.12 Wärmepotenzial verschiedener Wärmequellen (orange) sowie das „zugeordnete“ Potenzial, das im Jahr 2050 den dann noch vorhandenen Bedarf mit Fernwärme zu maximal 4.5 Rp./kWh verteilt werden kann [19].

Für die Schweiz wurde das Potenzial der wichtigsten Wärmequellen für Fernwärmenetze im Jahr 2014 erhoben und dazu eine geografische Einteilung in Cluster von 100 mal 100 Meter (Hektaren) vorgenommen. Erfasst wurden die Potenziale von KVA-Abwärme, Industrie-Abwärme, Grundwasser, ARA-Abwärme, Seen,

Flüssen sowie von Energieholz und Geothermie. Die Wärmepotenzial sind in Bild 2.12 orange dargestellt. Nicht enthalten ist dabei das Potenzial von Solarthermie und ebenfalls unberücksichtigt ist Umgebungsluft als Wärmequelle, da diese hauptsächlich für dezentrale Wärmepumpen von Interesse ist.

Unter der Annahme, dass der Wärmeverbrauch von Gebäuden bis ins Jahr 2050 um 50 % und dasjenige der Industrie um 20 % reduziert wird, wurden das Potenzial zur Deckung des verbleibenden Bedarfs aufgrund der Lage abgeschätzt und damit die als der Fernwärme „zugeordneten“ Potenziale ausgewiesen. Diese gelten unter der Annahme, dass die Wärmeverteilungskosten von maximal 4.5 Rp./kWh verursacht, was als wirtschaftlich attraktiv beurteilt wird. Bild 2.12 zeigt blau diese zugeordneten Potenziale, die in Tabelle 2.3 noch detailliert aufgeschlüsselt sind.

Tabelle 2.3 Aufteilung der *zugeordneten* Wärmequellen mit Unterscheidung einer direkten Nutzung sowie einer Nutzung mittels Wärmepumpen (WP), Zahlen nach [19].
*Der Wert für Abwärme wird als null ausgewiesen, da die Basis für eine geografische Zuordnung fehlt.

Wie	Quelle	Wärmequelle	TWh/a	%
Direkt	Holz	Holz	1.7	10
	Abwärme	Abfall (KVA)	3.6	21
		Abwärme* (Industrie)	0	0
WP	Abwärme	ARA	1.9	11
		Umwelt	Seen	5.1
		Flüsse	1.8	10
		Grundwasser	1.9	11
		Geothermie	1.7	10
Total			17.0	100
Total direkte Nutzung			5.3	31
Total Nutzung mit Wärmepumpen			11.7	69
Total Bedarf WW und Raumwärme 2050			45	100
Zugeordnetes Potenzial Fernwärme			17	38

Die Erhebung zeigt, dass Seewasser und Geothermie die weitaus grössten totalen Potenziale aufweisen. Unter den zugeordneten Potenzialen ist Seewasser mit 29 % Anteil gefolgt von KVA mit 21 % am interessantesten. Mit Ausnahme der industriellen Abwärme, für die wegen einer ungenügenden Basis für eine Zuordnung ein Wert von null ausgewiesen wird, weisen alle weiteren Quellen Potenziale von 10 % bis 11 % des Fernwärmepotenzials auf.

Das total zugeordnete Fernwärmepotenzial beträgt 17 TWh/a bei einem für das Jahr 2050 prognostizierten Bedarf von 45 TWh/a und kann somit bis zu 38 % des gesamten Wärmebedarfs für Raumheizung und Warmwasser decken. Vom zugeordneten Potenzial entfallen 69 % auf Niedertemperaturquellen, die für Fernwärme mittels Wärmepumpen genutzt werden. Dabei ist zu beachten, dass eine Ausschöpfung dieses Potenzials einen entsprechenden Ausbau der Stromproduktion voraussetzt.

2.8 Reine Wärmeerzeugung (Heizwerke)

2.8.1 Holzheizkessel

Während bis vor einigen Jahren vereinzelt noch rein fossil betriebene Heizkessel für Fernwärme zum Einsatz kamen, ist dies für Neuanlagen aufgrund der Klimaverpflichtungen nicht mehr zulässig. Zum Ersatz bestehender fossiler Feuerungen sowie für den Neubau von Fernwärmenetzen werden deshalb oft mit Biomasse befeuerte Heizkessel eingesetzt. Bis anhin kommt in erster Linie Energieholz zum Einsatz, weil die Versorgung mit Holz etabliert ist und Holz unter den Biomassensortimenten die vorteilhaftesten Eigenschaften als Brennstoff aufweist. Da Energieholz jedoch nur einen Teil der fossilen Wärmeerzeugung ersetzen kann, wird nach Ausschöpfung des Potenzials auch das Interesse an anderen Biomassebrennstoffen wie Reststoffen aus der Landwirtschaft und der Nahrungsmittelverarbeitung zunehmen.

Für **Energieholz** sind die Techniken und Versorgungsketten dagegen bereits heute etabliert, wobei für Fernwärme in erster Linie Waldhackschnitzel, Restholz und Altholz zum Einsatz kommen und daneben auch Holzpellets infrage kommen [24]. Die verschiedenen Sortimente setzen teilweise jedoch ganz unterschiedliche Techniken zur Lagerung, Förderung und Verbrennung voraus und es gelten auch unterschiedliche bauliche und gesetzliche Anforderungen. Letzteres betrifft insbesondere die in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) [25] geregelten Schadstoffemissionen im Abgas sowie die in der Abfallverordnung geregelte Entsorgung der Aschen [26].

Alle Sortimente an Energieholz zusammen tragen heute mit rund 37'200 TJ/a oder etwa 4.1 % zum Gesamtenergieverbrauch der Schweiz bei. Der Energieholzverbrauch kann noch um rund 50 % erhöht werden, womit dies würde das Holz rund 6 % des heutigen Verbrauchs decken oder bei künftig reduziertem Verbrauch noch entsprechend mehr zur Versorgung beitragen kann.

Bei direkt aus dem Wald gelieferten **Waldhackschnitzeln** ist bei der Anlagenauslegung unter anderem der hohe Wassergehalt zu beachten. Der Einsatz von nassen Waldhackschnitzeln setzt geeignete Feuerungen voraus und kommt erst ab einer gewissen Mindestgrösse infrage. Zudem wird dadurch die Möglichkeit rascher Lastwechsel und von Teillastbetrieb eingeschränkt. Feuerungen mit nassen Waldhackschnitzeln sind deshalb vor allem zur Deckung der Grundlast geeignet. Bei der Lagerung von nassen Holzschnitzeln kann Kohlendioxid (CO₂) als Gärgas gebildet werden. Da dies wegen der grösseren Dichte als Luft absinkt, müssen zum Personenschutz Massnahmen wie eine Belüftung getroffen werden. Die für Waldhackschnitzel genannten Einschränkungen gelten auch für nasses Restholz, wie es zum Beispiel in Form von Rinde in Sägereien anfällt. Rinde weist aber zusätzlich einen erhöhten Aschege-

halt und überlange Stücke auf, was zusätzliche Anforderungen an Fördereinrichtungen und Verbrennungsanlagen stellt.

Bei **Restholz** aus der zweiten Stufe der Holzverarbeitenden Industrie wie Schreinereien, Zimmereien, Möbel- und Küchenfabriken können je nach Anwendung Zusatzstoffe wie Leime und Farben enthalten sein. Ausserdem kann die Stückigkeit von groben Stücken bis zu feinen Hobelspänen variieren, was ebenfalls zu berücksichtigen ist. Besonders anspruchsvoll ist die Handhabung und Verbrennung von staubförmigen Brennstoffen, da diese mit Explosionsgefahr und Personengefährdung verbunden sind und besondere Verbrennungsanlagen voraussetzen. Zur Nutzung brennbarer Stäube kommt deshalb oft eine Pelletierung oder Brikkettierung am Ort des Anfalls zum Einsatz.

Bei **Altholz**, also Holz von alten Möbeln, Verpackungsmaterial und Gebäudeabbrüchen, ist die Herkunft und Zusammensetzung meist nicht bekannt, weshalb Altholz grundsätzlich als mit Schwermetallen und anderen Fremdstoffen belastet gilt. Eine Nutzung von Altholz ist deshalb nur in Anlagen erlaubt, die nach LRV dafür zugelassen sind und erhöhte Anforderungen an die Abgasreinigung und den Anlagenbetrieb einhalten.

Obwohl damit für alle Energieholzsortimente technisch ausgereifte Anlagen verfügbar sind, sind die spezifischen Besonderheiten betreffend Lagerung, Feuerungstechnik und Anlagenbetrieb zu beachten, wie in QM Holzheizwerke ausgeführt wird [21]. So kommen für Brennstoffe mit geringem Asche- und moderatem Wassergehalt oft Unterschubfeuerungen infrage, während für erhöhte Aschegehalte und/oder hohe Wassergehalte meist Vorschubrostfeuerungen nach Bild 2.13 zum Einsatz kommen.

Unterschubfeuerungen kommen meist im Leistungsbereich bis etwa 1 MW zum Einsatz, Rostfeuerungen dagegen bis zu über 20 MW. Für Leistungen ab 10 MW kommen auch Wirbelschichtfeuerungen infrage. Diese erzielen etwas höhere Wirkungsgrade und tiefere Emissionen im Rohgas bei gleichzeitig etwas höherem Hilfsenergieverbrauch.

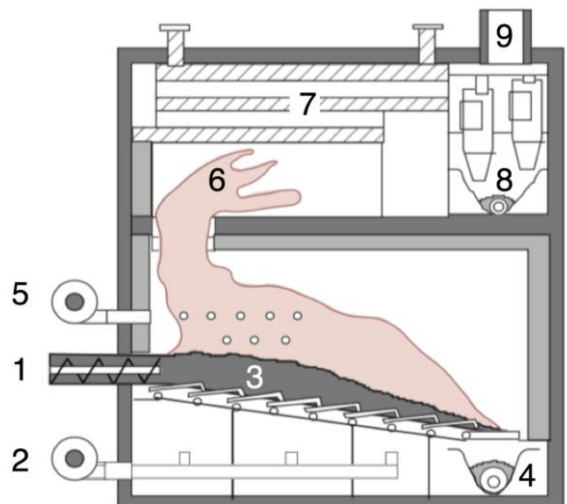


Bild 2.13 Prinzip einer Vorschubrostfeuerung für Waldchackschnitzel und andere Energieholzsortimente [27]. 1 Brennstoffzufuhr, 2 Primärluft, 3 Vorschubrost mit Brennstoffbett, 4 Austragung der Rostasche, 5 Sekundärluft, 6 Nachbrennkammer, 7 Kessel, 8 Multizyklon als Vorabscheider von Grobstaub, 9 Abgas.

Zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte an Feinstaub werden automatische Holzheizungen mit Staubabscheidern ausgerüstet. Bei der Nutzung feuchter Brennstoffe kommen meist Elektroabscheider zum Einsatz, für trockene Brennstoffe auch Gewebefilter.

Wie aus dem Aufbau eines Holzheizwerks mit Brennstofflager, Heizraum und technischen Einrichtungen nach Bild 2.15 hervorgeht, weisen Heizzentralen mit Holz einen grossen Raumbedarf auf. Damit verbunden sind auch hohe Kapitalkosten. Aus wirtschaftlichen Gründen werden für automatische Holzheizungen deshalb meist hohe Vollbetriebsstunden durch Deckung der Grundlast angestrebt.

Die spezifischen Kapitalkosten von Holzheizwerken weisen vor allem für Leistungen unter 1 MW bis 2 MW einen starken Skaleneffekt auf, wie in Bild 2.14 dargestellt ist. Ein wesentlicher Kostenfaktor ist dabei die Brennstofflagerung. Lagerhallen sind in der Regel am günstigsten, bei Neubauten können aber auch Unterflursilos mit lediglich geringfügig höheren Kosten integriert werden, während nachträglich ergänzte Unterflursilos hohe Kosten verursachen. Wegen des grossen Platzbedarfs zur Brennstofflagerung kommt einer ganzjährig gesicherten Versorgung eine wichtige Rolle zu, welche eine Auslegung der Lagerkapazität auf wenige Tage in der kältesten Periode erlaubt. Für die Versorgung von Heizwerken mit Energieholz ist gleichzeitig die Entsorgung der anfallenden Aschen sicherzustellen, die in der Regel vom Energieholzlieferanten zurückgenommen und korrekt entsorgt werden.

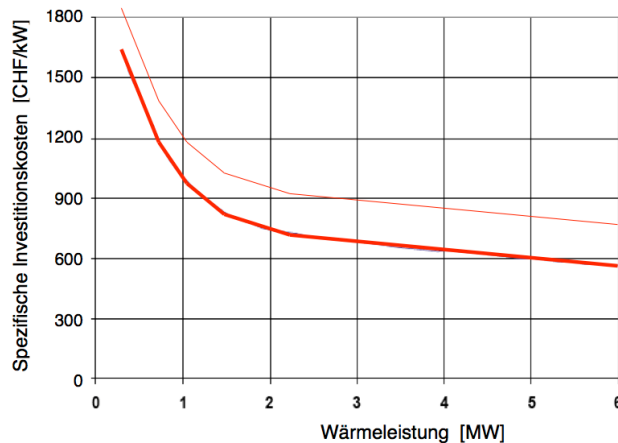


Bild 2.14 Spezifische Investitionskosten für automatische Holzheizwerke (inklusive Brennstofflagerung und Heizraum) in Funktion der Wärmeleistung. Die niedrigen Werte gelten für günstige bauliche Voraussetzungen für Brennstofflager und Heizraum.

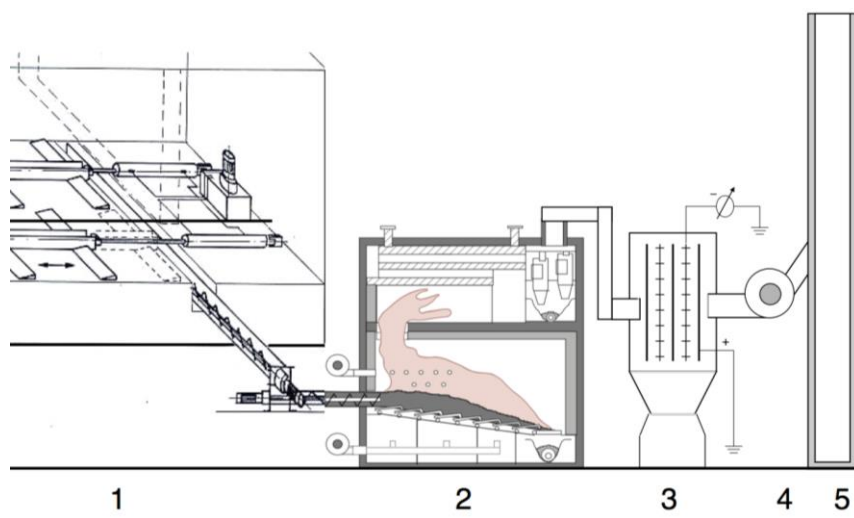


Bild 2.15 Heizzentrale mit automatischer Holzfeuerung: 1 Brennstofflager mit Austragung, 2 Heizkessel, 3 Feinstaubabscheider (im Bild als Elektroabscheider ausgeführt), 4 Abgasventilator, 5 Kamin [27].

Tabelle 2.4 Heizwert und Energiedichte zur Lagerung für verschiedene Brennstoffe. Für Holzschnittel ist ein typischer Wassergehalt (Masse Wasser pro Masse nasses Holz) von 30 % angenommen. Die Lagerdichte bezeichnet die Masse pro Lagervolumen, was für Holzschnittel der Schüttdichte entspricht. Die Energiedichte beschreibt Energieinhalt pro Lagervolumen.

Brennstoff		Wassergehalt Gew.-%	Heizwert kWh/kg	Lagerdichte kg/m ³	Energiedichte kWh/m ³	Lagervolumen (Öl=1)
Holzschnittel	Fichte	30 %	3.5	200	700	13
	Buche	30 %	3.3	270	900	11
Holzpellets		10 %	4.9	650	3200	3
Heizöl		0 %	11.8	850	10'000	1

Als Alternative zu Holzschnitteln kommen auch **Holzpellets** zur Wärmeerzeugung infrage. Holzpellets weisen für die Lagerung lediglich rund einen Viertel des Platzbedarfs von Waldhackschnitteln auf, wie der Vergleich nach Tabelle 2.4 zeigt. Obwohl der Platzbedarf damit immer noch grösser ist als für Heizöl, ist für den Fall eines Heizungersatzes eine Pelletheizung oft eher geeignet als eine Holzschnittelheizung. Bei der Lagerung ist dabei zu beachten, dass Holzpellets Kohlenmonoxid (CO) freisetzen und damit in Lagerräumen ab

einer gewissen Grösse zu einer Erstickungsgefahr führen können. Für grössere Lagerräume ist deshalb eine Belüftung und Überwachung erforderlich. Dabei sind jedoch andere Voraussetzungen als für Waldhackschnittel zu erfüllen. Da Holzpellets eine geringe Feuchtigkeit und homogene Eigenschaften aufweisen, sind sie auch für den Einsatz in Kleinf Feuerungen geeignet. Wegen des Herstellungsaufwands sind sie jedoch teurer als Waldhackschnittel, weshalb für die Grundlastdeckung in Fernheizwerken in der Regel andere Energieholzsorten

timente zum Einsatz kommen. Um fossile Energieträger vollständig zu ersetzen, ist in Zukunft jedoch denkbar, dass anstelle von Öl- oder Gaskesseln Pelletkessel für den Sommerbetrieb und für Spitzenlast dienen könnten.

Weil nasse Holzschnitzel in kleinen Feuerungen zu einem ungünstigen Betriebsverhalten führen können und auch in grösseren Anlagen für einen Sommerbetrieb nicht oder nur bedingt geeignet sind, werden seit einigen Jahren auch Holzschnitzel mit reduziertem Gehalt an Feuchtigkeit und Asche angeboten. Solche Holzschnitzel werden durch eine technische Trocknung und Absiebung des Feingutanteils produziert und auch als „Qualischnitzel“ bezeichnet. QM Holzheizwerke unterscheidet dabei nach FAQ 36 zwischen Qualischnitzel fein und Qualischnitzel grob, wobei die grobe Kategorie nur für Anlagen ab 100 kW empfohlen wird [28].

Da das nachhaltig nachwachsende Holz in der Schweiz nur noch einen Ausbau der Energieholznutzung um rund 50 % bis maximal 100 % erlaubt, besteht ein zunehmendes Interesse an **anderen biogenen Brennstoffen**. Infrage kommen zum Beispiel Reststoffe **aus der Landwirtschaft und der Nahrungsmittelverarbeitung** wie Stroh und Getreiderückstände. Solche Sortimente weisen einen hohen Aschegehalt sowie hohe Gehalte an Stickstoff, Schwefel, Kalium, Chlor und anderen Inhaltsstoffen auf. Eine Folge davon sind grosse Aschemengen, verstärkte Verschlackung und Ablagerungsbildung sowie erhöhte Schadstoffemissionen an Staub und Stickoxiden. Die Nutzung als Brennstoff verursacht deshalb höhere Anforderungen an die Verbrennungstechnik und den Anlagenbetrieb. Im Weiteren stehen auch Rückstände wie Tiermehl und getrockneter Klärschlamm zur Verfügung, bei deren Entsorgung die Hygiene und Sicherheit im Vordergrund steht. Entsprechende Sortimente sollten zwar in Zukunft auch zur Energiegewinnung genutzt werden, der Bau und Betrieb entsprechender Anlagen ist allerdings mit hohen Anforderungen verbunden und in der Regel auf ein entsprechendes Umfeld der Nahrungsmittelindustrie oder der Entsorgungstechnik beschränkt.

Nasse Biomasse wie Gülle aus der Landwirtschaft, Klärschlamm aus der Abwasserreinigung und feste Küchenabfälle kommen zur direkten Nutzung in Heizkesseln nicht infrage. Dagegen bietet sich für diese Reststoffe eine Verwertung als Substrat zur **anaeroben Vergärung** an. Zum Einsatz kommen dezentrale Biogasanlagen in Landwirtschaftsbetrieben, die aus Kostengründen in der Regel jedoch eine gewisse Mindestgrösse aufweisen. Daneben kommen grössere zentrale Vergärungsanlagen zum Einsatz, die oft zur Co-Vergärung von flüssigen Rückständen wie Klärschlamm und Gülle zusammen mit festen Rückständen aus der Gastronomie und von Haushalten ausgelegt sind. Das Gärgas, Biogas oder Klärgas aus Vergärungsanlagen besteht üblicherweise aus rund 60 % bis 70 % Methan und 25 % bis 40 % Kohlendioxid und enthält zudem Schwefel- und Stickstoffverbindungen, die vor einer Nutzung in der Regel abgeschieden werden. Aufgrund der Zusammensetzung weist Gärgas einen Heizwert

auf, der rund zwei Drittel des Heizwerts von Erdgas entspricht. Gärgas kann damit in einem Gasmotor-BHKW eingesetzt oder zur Einspeisung ins Erdgasnetz aufbereitet werden. Im Gegensatz zu einer motorischen Nutzung muss zur Einspeisung allerdings auch das Kohlendioxid in einer Gaswäsche abgetrennt werden. Bei Nutzung in einem BHKW bietet sich eine Abwärmenutzung für Fernwärme an, wobei die BHKW-Abwärme meist zur Grundlastdeckung dient.

2.8.2 Direkt nutzbare Abwärme

Industrielle Abwärme bei Temperaturen über 70°C ist in erster Priorität betriebsintern zu nutzen oder zu rekuperieren und steht für Fernwärme nur dann zur Verfügung, wenn keine geeignete betriebliche Verwendung möglich ist. Voraussetzung ist zudem, dass der Aufwand zur Abwärmenutzung wirtschaftlich und der zeitliche und örtliche Anfall geeignet und auf absehbare Zeit verfügbar ist. Die Wärmeversorgung wird daneben meist mit einer konventionellen Wärmeerzeugung abgesichert. Im Weiteren ist zu beachten, dass Verbesserungen oder Veränderungen in der Produktion den Abwärmefall reduzieren können. Daneben kommt hinzu, dass für die industrielle Produktion viel kürzere Abschreibungszeiten als für Fernwärmenetze vorausgesetzt werden, was eine Koordination der Investitionen erschwert. Aus diesen Gründen ist eine direkte Fernwärmenutzung industrieller Abwärme selten. Soweit dagegen grosse Abwärmemengen bei über 300°C zur Verfügung stehen, bietet sich eine Stromerzeugung mit Wärme-Kraft-Kopplung an, was im Kapitel 2.9 behandelt wird.

2.8.3 Niedertemperatur-Abwärme und Umgebungswärme

2.8.3.1 Wärmepumpen zur Temperaturerhebung

Wärmepumpen nutzen Wärme auf tiefem Temperaturniveau und erhöhen die Temperatur auf ein nutzbares Niveau. Dies erfolgt in Kompressions-Wärmepumpen durch Zufuhr von mechanischer Energie oder in Absorptions- und Adsorptions-Wärmepumpen unter Zufuhr von Wärme bei hoher Temperatur. Das Verhältnis zwischen Nutzwärme und meist als Elektrizität zugeführter hochwertiger Energie wird nach Kapitel 2.6.3 als Leistungszahl ε definiert und bei Betrachtung über ein Jahr als Jahresarbeitszahl (JAZ) bezeichnet.

Die Leistungszahl wird unendlich gross, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (untere Temperatur T_u) und Wärmeproduktion (obere Temperatur T) gegen null geht. Wenn die Temperaturdifferenz sehr gross wird, nähert sich die Leistungszahl dagegen dem Wert eins, wodurch eine elektrische Wärmepumpe zu einer elektrischen Heizung wird. Wärmepumpen sind deshalb nur interessant, wenn Quelle und Nutzwärme eine geringe Temperaturdifferenz aufweisen. Bild 2.16 zeigt dazu die Carnot-Leistungszahl in Funktion der Temperatur für verschiedene Quelltemperaturen.

Dies setzt voraus, dass eine niedrige Temperatur der Nutzwärme genügt oder die Wärmepumpe nur zur Vorwärmung wie zum Beispiel der Anhebung der Rücklauf-temperatur dient und eine Nacherwärmung mit einem zweiten Wärmeerzeuger erfolgt. Daneben kann die Wärmeproduktion auch auf zwei Temperaturniveaus ausgelegt werden. Zur Versorgung von Gebäuden kann eine Wärmepumpe dazu zum Beispiel alternierend Raumwärme bei 35°C und Warmwasser bei 60°C bereitstellen. Ohne Nacherwärmung kommen Wärmepumpen für Fernwärmenetze in der Regel nur für Vorlauf-temperaturen bis zu maximal 70°C infrage. Bei einer Quelltemperatur von 10°C und einem Gütegrad von 0.5 entspricht dies einer Leistungszahl von 2.9, wie aus Tabelle 2.5 hervorgeht. Wenn die Wärmepumpe nur zur Vorwärmung auf 50°C dient, wird dagegen eine Leistungszahl von 4.0 erreicht, bei 35°C wird ein Wert von 6.2 erreicht.

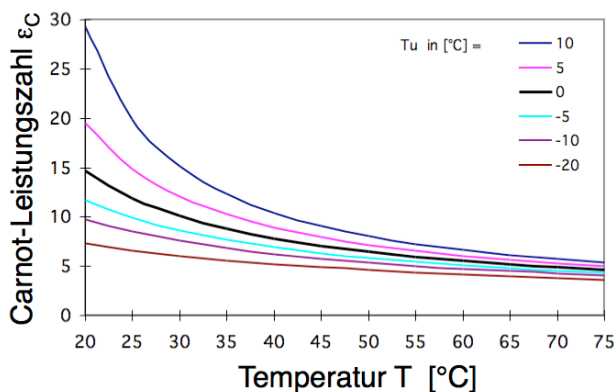


Bild 2.16 Carnot-Leistungszahl in Funktion der Temperatur T für verschiedene Niveaus der unteren Temperatur (Quelltemperatur) T_u .

Tabelle 2.5 Reale Leistungszahl einer Wärmepumpe mit Gütegrad 0.5 für verschiedene Temperaturen der Wärmezufuhr T_u und der Nutzwärme T.

$T_u =$		0 °C	10 °C	20 °C
T =	35 °C	4.4	6.2	10.3
	50 °C	3.2	4.0	5.4
	70 °C	2.5	2.9	3.4
	90 °C	2.0	2.3	2.6

Grundsätzlich ist auch für Fernwärmenetze eine getrennte Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser denkbar. Dies würde allerdings einen alternierenden Netzbetrieb oder ein Dreileitersystem voraussetzen, was den betrieblichen Aufwand und im zweiten Fall zudem die Investitionskosten erhöht.

Für dezentrale Anwendungen kommen hauptsächlich Kompressions-Wärmepumpen zum Einsatz, die über einen elektrischen Antrieb des Verdichters verfügen. Für Leistungen ab mindestens 300 kW ist auch ein direkter mechanischer Antrieb zum Beispiel mittels Gasmotor möglich.

Der Aufbau einer Wärmepumpe ist identisch zu einer Kältemaschine, wobei der Wärmeentzug auf dem unteren Temperaturniveau zur Bereitstellung von Kälte dient. Bei gleichzeitigem Bedarf an Wärme und Kälte, wie etwa bei der Kombination eines Hallenbads und einer Kunsteisbahn, kann sowohl die Kälte als auch die Wärme genutzt und der Stromverbrauch einer Kompressionsanlage im Vergleich zu zwei unabhängigen Anlagen entsprechend reduziert werden. Die Wärme-produktion der Kältemaschine dient dabei als direkt nutzbare Abwärme. Sofern am Ort der Kälteproduktion kein gleichzeitiger Wärmebedarf vorhanden ist, kommen Kältemaschinen auch als Abwärmequellen für Fernwärme infrage.

Der Einsatz von Absorptionsanlagen ist zum Beispiel dann von Interesse, wenn grosse Abwärmemengen bei ausreichender Temperatur zur Verfügung stehen und gleichzeitig ein entsprechender Kältebedarf vorhanden ist. Wegen des apparativen Aufwands beschränken sich solche Anwendungen jedoch auf grössere Einheiten. Wenn Fernwärme kostengünstig und bei hoher Temperatur zur Verfügung steht, kommt auch eine dezentrale Kälteproduktion mittels Absorptionsanlagen infrage.

2.8.3.2 Wärmequellen für Wärmepumpen

Für die zentrale Wärmeerzeugung in Fernwärmenetzen mit Wärmepumpen kommen vor allem folgende Wärmequellen infrage:

- Umgebungsluft.** Dezentrale Wärmepumpen werden oft mit Umgebungsluft als Wärmequelle ausgeführt, da diese Anwendung nahezu überall möglich ist und die Bohrkosten für einzelne Sonden verhältnismässig teuer sind. Umgebungsluft weist jedoch in der kalten Jahreszeit bei maximalem Heizbedarf gleichzeitig die niedrigste Temperatur auf, was die Leistungszahlen im Winter begrenzt. Aus diesem Grund kommt auch die Kombination einer Wärmepumpe mit einem zweiten Wärmeerzeuger infrage. Daneben kann die Effizienz von Luft-Wärmepumpen durch Luftvorwärmung zum Beispiel in Erdregistern erhöht werden. Für Fernheizwerke stehen jedoch Wärmequellen wie Geothermie, Gewässer und Abwärme im Vordergrund.
- Oberflächennahe Geothermie.** Erdreich weist ab rund 10 m Tiefe eine über das ganze Jahr nahezu konstante Temperatur von rund 11°C auf, die in weiterer Tiefe um rund 1°C pro 30 m zunimmt. Zur Nutzung des Erdreichs kommen mit Sole betriebene **Erdwärmesonden** zum Einsatz. In der Schweiz betragen die Bohrtiefen meist zwischen 100 m und 300 m und die Quelltemperaturen ab 12°C bis 15°C, was im Winter höhere Leistungszahlen als mit Umgebungsluft ermöglicht. Der über lange Zeitdauer nachhaltige Wärmeentzug aus einer Erdwärmesonde ist von zahlreichen Faktoren wie Bohrtiefe, Gesteinsschicht, Sondenlänge und Sondendichte abhängig. Insbesondere bei grösseren Einheiten bietet sich deshalb an, ein Sondenfeld auch zur Abführung von sommerlicher Überschusswärme von Gebäuden und Solaranlagen zu nutzen. Das Erdreich kann so regeneriert und das

Sondenfeld als Saisonspeicher genutzt werden. Bei typischen Sondentemperaturen ist so eine Gebäudekühlung mit aktiven Bauteilen ohne Klimatisierung möglich. Daneben kommt auch der Einsatz von hybriden Solarsystemen mit aktiv gekühlten Fotovoltaikanlagen infrage. Eine weitere Anwendung bieten unverglaste Solarkollektoren, die im Sommer nachts zur freien Kühlung (Freecooling) des Gebäudes genutzt werden und tagsüber sommerliche Überschusswärme an das Sondenfeld abführen. Neben Erdwärmesonden kommen auch Erdkollektoren in Tiefen von rund 1.5 Metern infrage. Da diese jedoch grosse Flächen benötigen und niedrigere Temperaturen als Erdwärmesonden erzielen, haben sie nur eine geringe Bedeutung.

- Gewässer.** Vom Temperaturniveau her interessant ist die Nutzung der Wärme aus Grundwasser sowie von Seewasser und aus Flüssen. Während für Grundwasser ein Entnahme- und ein Schluckbrunnen erforderlich sind, genügen zur Verwendung von Seewasser zwei Leitungen. Grundwassernutzung kann auch als Sonderfall der Geothermie betrachtet werden und wird deshalb unter Geothermie weiter beschrieben. Da viele Städte und Ortschaften an natürlichen Gewässern liegen, bieten Seen und Flüsse das grösste Potenzial für Wärmepumpen. Entsprechende Anwendungen werden teilweise auch von der öffentlichen Hand unterstützt. Zur Nutzung natürlicher Gewässer sind Auflagen bezüglich Gewässer- und Naturschutz einzuhalten. Zudem darf das Wasser nach einem Richtwert vom Bundesamt für Umwelt nur um maximal 3 K abgekühlt werden. Seewasser weist im Winter bei Tiefen ab 10 Meter jedoch bereits typische Temperaturen von über 5°C auf, in 20 Metern sind es über 10°C bis teilweise 15°C. Selbst bei Ausschöpfung der Temperaturabsenkung um 3 K ermöglicht dies hohe Leistungszahlen. Da die Wassertemperaturen zudem auch im Sommer ab 20 Metern grossteils unter 18°C bleiben, kann Seewasser auch zur Gebäudekühlung durch Freecooling genutzt werden. Die Auswirkungen auf die Temperatur der Gewässer bleiben dabei sehr gering, wobei der geringfügig kühlende Trend im Fall der Fernwärme der unerwünschten Erwärmung als Folge des Klimawandels entgegenwirkt.
- Abwasser.** Das Abwasser von Haushalten, öffentlichen Einrichtungen sowie der Industrie weist mit 20°C bis 25°C deutlich höhere Temperaturen auf als das mit 8°C bis 12°C zugeführte Trinkwasser [29]. Diese im Abwasser enthaltene Abwärme kann auf verschiedene Arten zurückgewonnen werden. Grundsätzlich kann direkt beim Verbraucher eine Rekuperation zur Erwärmung des zugeführten Frischwassers genutzt und damit der dezentrale Warmwasserverbrauch reduziert werden. Entsprechende Einrichtungen sind zum Beispiel in Form von Duschwannen mit eingebautem Wärmeübertrager verfügbar und das noch unverdünnte Abwassers weist dabei noch höhere Temperaturen von über 30°C auf. Da die Betriebszeiten dieser einzelnen Einrichtungen in Wohnbauten jedoch kurz sind, kommt als Alternative auch eine Wärme-

rückgewinnung aus dem gemischt anfallenden Abwasser von mehreren Verbrauchern infrage. Bei Temperaturen von 20°C bis 25°C ist die Abwärme eine geeignete Quelle für Wärmepumpen. Solche Anwendungen können durch Wärmeübertragern von einzelnen Gebäuden wie in Bild 2.17 gezeigt „Inhouse“ erfolgen, wobei dies aus wirtschaftlichen Gründen nur für grössere Einheiten ab etwa 150 kW infrage kommt.



Bild 2.17 Wärmerückgewinnung aus Abwasser in einer Inhouse-Anlage [30].

Bei Kanalisationen mit mindestens 10 Liter pro Sekunde Tagesabflussminimum, was etwa 5000 Einwohnern entspricht, kommt auch die Nutzung aus in Abwasserkanälen gesammeltem Abwasser infrage. Bild 2.18 zeigt dazu eine Nutzung in einem in die Kanalisation eingeführten Wärmeübertrager. Alternativ dazu kann auch ein separater Schacht mit Wärmeentnahme installiert werden.

Während dezentrale Anwendungen den Bedarf einzelner Gebäude reduzieren, kommt eine Wärmerückgewinnung aus dem Abwasserkanal auch zur Versorgung von Fernwärmesystemen infrage. Dabei ist zu beachten, dass das Wärmepotenzial aus dem Abwasserkanal durch dezentrale Wärmerekuperation vermindert wird und deshalb eine geeignete Koordination erforderlich ist.

- Abwasserreinigungsanlagen (ARA).** Eine zentrale Nutzung von Abwasserwärme bietet sich bei Kläranlagen an. Besonders interessant ist dabei die Nutzung des geklärten Wassers im Auslauf der ARA. Bei typischen Wassertemperaturen im Winter von über 8°C ist in der Regel eine Abkühlung um mindestens 4 K möglich. Das Potenzial entspricht dabei einer Wärmeleistung von etwa 800 MW [30]. Da in Kläranlagen auch Klärgas anfällt, das oft in einem BHKW zur Stromerzeugung genutzt wird, kann die Motorenabwärme zusammen mit über eine Wärmepumpe genutzter Abwasserwärme zur Fernwärmeversorgung eingesetzt werden.

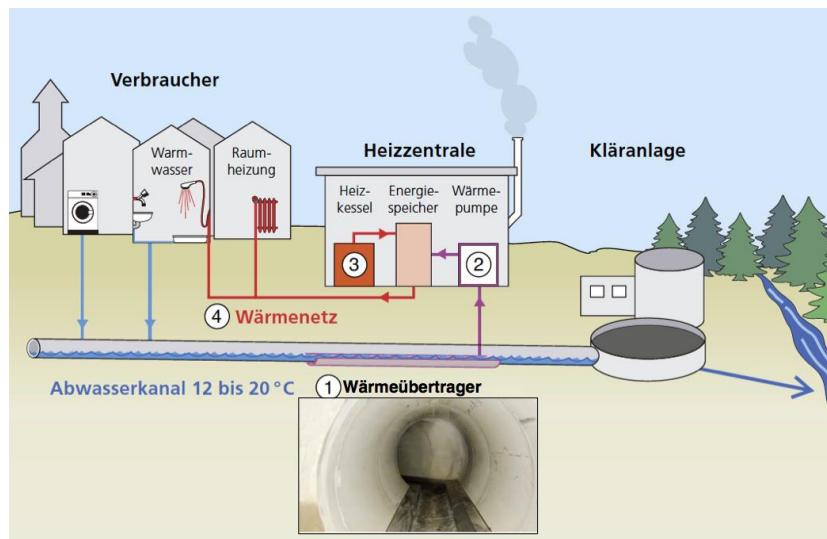


Bild 2.18 Abwärmenutzung aus dem Abwasserkanal [31]. 1 Wärmeübertrager, 2 Wärmepumpe, 3 Heizkessel für Spitzenlast, 4 Wärmeverteilung mit Fernwärmenetz.

2.8.4 Solarthermie

Die Solarthermie nutzt die Sonnenstrahlung, die bei hochstehender Sonne und wolkenlosem Himmel zur Mittagszeit rund 1000 Watt pro Quadratmeter auf eine horizontale Fläche beträgt. Eine Bestrahlung mit 1000 W/m^2 dient auch als Referenzwert zur Beschreibung der Leistung von Solaranlagen. Im Jahresmittel wird in der Schweiz ein effektiver Wert von rund 125 W/m^2 oder $1/8$ der an einem wolkenlosen Mittag anfallenden Strahlung erreicht. Die mittlere Strahlung auf einen horizontalen Kollektor entspricht damit $1/8 \times 24 \text{ h}$ oder 3 h pro Tag sowie $1/8 \times 8760 \text{ h/a}$ oder 1100 Vollbetriebsstunden pro Jahr, was wiederum 1100 kWh pro Quadratmeter und Jahr entspricht. Da Europa nördlich des nördlichen Wendekreises liegt, ist der Winkel zwischen Sonne und Erdoberfläche auch am längsten Tag bei höchstem Sonnenstand kleiner als 90° und die Sonne steht dann im Süden. Aus diesem Grund erreichen fest installierte Kollektoren den maximalen Jahresertrag bei einer Neigung von rund 42° nach Süden. Da für Solarthermie jedoch der Winterertrag entscheidend ist und die Sonne dann in flachem Winkel auf die Erdoberfläche trifft, wird mit einer Neigung um rund 60° der maximale Winterertrag erzielt. Interessant ist auch eine Anbringung an einer vertikalen Südwand, da deren Winterertrag nur geringfügig kleiner ist als bei 60° Neigung. Um den tageszeitlichen Anfall zu verlängern, ist dagegen eine häftige Anordnung mit Ost- und Westausrichtung in flacher Neigung ideal, was vor allem für Fotovoltaik zur Anwendung kommt. In allen Fällen hat der lediglich tagsüber anfallende Ertrag zur Folge, dass Solaranlagen für übliche Anwendungen im Gebäude mit einem Wärmespeicher ausgerüstet werden.

Weil ein Teil der Strahlung reflektiert wird (was optische Verluste zur Folge hat) und der Kollektor zudem mit Anstieg der Temperatur zunehmende thermische Ver-

luste an die Umgebung aufweist, erreichen Solaranlagen zur Warmwasserbereitung typische Wirkungsgrade um 60% , wie in Bild 2.19 am Beispiel der **Kollektorkennlinie** eines Flachkollektors gezeigt ist, der bei einer Umgebungstemperatur von 5°C und einer Bestrahlung mit 1000 W/m^2 betrieben wird. Bei reduzierter Strahlung sinkt die, ohne Durchströmung erzielte Stagnationstemperatur und damit auch der Wirkungsgrad.

Der über ein Jahr bewertete Systemnutzungsgrad umfasst zusätzliche Verluste durch Speicherung und Systemeinbindung und erreicht typische Werte um 50% , sofern die Anlage auf einen solaren Deckungsgrad von rund 50% ausgelegt wird, wie Bild 2.20 zeigt. Für solche Anlagen kann im schweizerischen Mittelland damit ein Ertrag um 550 kWh pro Jahr und Quadratmeter Absorberfläche erzielt werden. Noch etwas höhere Erträge pro Quadratmeter Absorberfläche werden mit Vakuumröhrenkollektoren (VKR) erzielt, die dank besserer Wärmedämmung zudem auch höhere Temperaturen erzielen.

In Wohnbauten werden Solaranlagen oft so ausgelegt, dass die Warmwasserbereitung während rund drei bis vier Sommermonaten ganz oder teilweise gedeckt werden kann. Wie das Beispiel in Bild 2.20 zeigt, genügen dafür relativ kleine Kollektorflächen von 1 m^2 bis 1.5 m^2 pro Person. Da der Ertrag in den Wintermonaten damit auf unter 25% des Bedarfs fällt, wird eine Zusatzheizung benötigt und über das Jahr ein solarer Deckungsgrad für Warmwasser von 50% bis 60% erreicht.

Durch Vergrößerung der Kollektorfläche kann zwar der Deckungsgrad erhöht werden. Damit steigen aber die Verluste als Folge der höheren Temperaturen und der im Sommer nicht nutzbaren Überschusswärme, weshalb der Systemnutzungsgrad und der Solarertrag pro Quadratmeter Kollektor sinkt. Im Gegenteil dazu werden höhere Systemnutzungsgrade und Erträge von bis zu 700 kWh pro Quadratmeter und Jahr erzielt, wenn

Solarwärme nur zur Vorwärmung einem Deckungsgrad von 5 % bis 30 % eingesetzt wird, wie in Bild 2.21. Auch zur Einbindung in Fernwärmenetze ist Solarther-

mie deshalb wirtschaftlich vor allem zur Vorwärmung oder zur Deckung des sommerlichen Warmwasserbedarfs interessant.

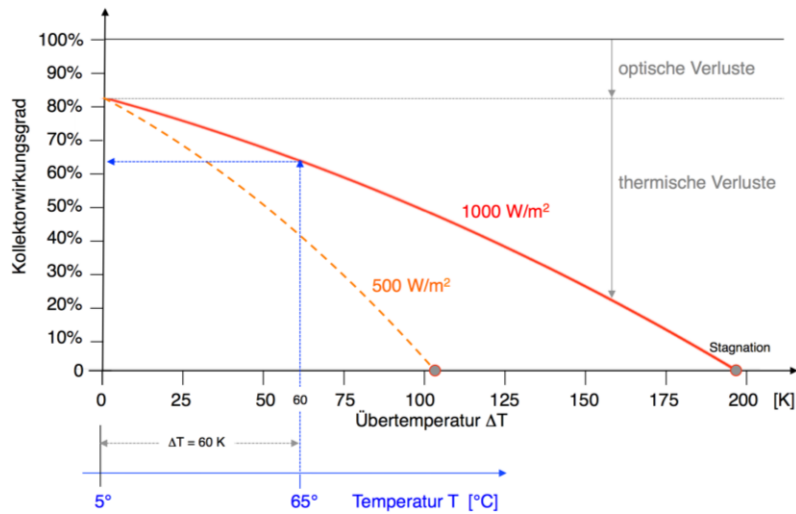


Bild 2.19 Kollektorwirkungsgrad in Funktion der Übertemperatur (= Kollektorkennlinie) eines verglasten Flachkollektors (Differenz zwischen Kollektor- und Umgebungstemperatur).

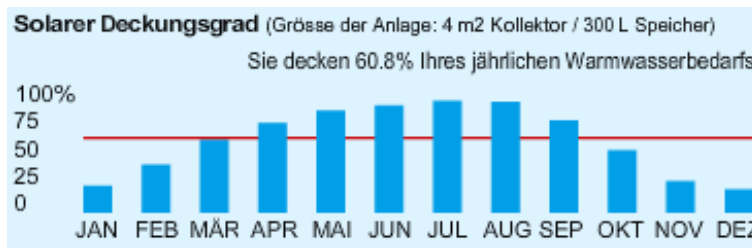


Bild 2.20 Monatlicher solarer Deckungsgrad zur Bereitstellung von Warmwasser mit einer auf den Sommerbedarf ausgelegten Solaranlage für einen Haushalt mit 4 Personen und 4 m² Kollektorfläche.

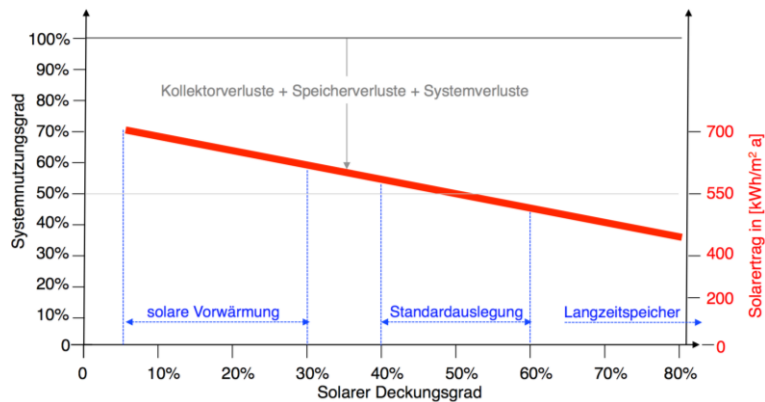


Bild 2.21 Systemnutzungsgrad (links) und Solarertrag (rechts) in Funktion des solaren Deckungsgrades.

Während für solare Vorwärmung eine Kurzzeitspeicherung genügt, ist zur Erhöhung des solaren Deckungsgrads eine Vergrößerung der Wärmespeicher-Kapazität erforderlich, was etwa mit Erdwärmesonden möglich ist. Damit kommen zum Beispiel folgende Konzepte für solar unterstützte Fernwärme infrage:

1. Solar unterstützte Fernwärme mit Kurzzeitspeicher: Bei diesem Konzept wird die Solarwärme als Vorwärmung eingesetzt, was einen hohen solaren Wirkungsgrad ermöglicht, während Wärmeüberschuss in einem Kurzzeitspeicher gespeichert wird. Weil

die Solarstrahlung und der Raumwärmebedarf saisonal gegenläufig anfallen, kann mit diesem Prinzip nur ein kleiner Anteil des Jahresbedarfs solar gedeckt werden, nämlich in heutigen Netzen typischerweise zwischen 5 % und 12 %. Da der Anteil des Warmwassers am Jahresbedarf jedoch von 10 % für Altbauten auf gegen 50 % für Neubauten steigen wird, wird künftig auch mit Kurzzeitspeichern ein Anteil an Solarwärme von 25 % oder mehr denkbar.

2. Die Einbindung von Solarwärme mit saisonalen Wärmespeichern ist auf verschiedene Arten möglich. Einerseits kann die Solarwärme auf tiefem Temperaturniveau und damit hohem Wirkungsgrad genutzt werden, um die Gesteinsschichten um Erdwärmesonden, die im Winter als Wärmequelle dienen, im Sommer zu regenerieren. Die Wärmeversorgung erfolgt dann mittels Wärmepumpen, die dank hoher Quellentemperatur hohe Jahresarbeitszahlen erreichen. Da zur Regeneration der Gesteinsschichten niedrige Temperaturen ausreichen, kommen für solche Anwendungen auch unverglaste Kollektoren zum Einsatz. Diese erzielen nur bei niedrigen Übertemperaturen hohe Wirkungsgrade und die Stagnationstemperatur ist wegen der erhöhten Wärmeverluste viel niedriger als in einem in Bild 2.19 gezeigten verglasten Kollektor. Unverglaste Kollektoren können nachts auch zum Free-cooling genutzt werden. Daneben sind auch Langzeitwärmespeicher auf höherem Temperaturniveau möglich, wobei die Versorgung der Verbraucher aus dem Speicher mit Nacherwärmung zum Beispiel über einen Holzkessel auf die notwendige Vorlauftemperatur erfolgt. Damit sind solare Deckungsgrade von bis zu über 40 % möglich.
3. Nebst Solaranlagen beim Heizwerk ist für künftige Netze auch denkbar, dezentrale solarthermische Anlagen zum Beispiel durch Rücklaufanhebung in ein Fernwärmenetz einzubinden.

Solarthermische Anlagen weisen hohe spezifische Investitionskosten auf, die mit der Anlagengrösse sinken. Erst in grösseren Einheiten wie für Mehrfamilienhäuser werden Wärmegestehungskosten von deutlich unter 20 Rp./kWh und bei günstigen Bedingungen solche von bis zu unter 10 Rp./kWh erzielt, wie Bild 2.22 zeigt.

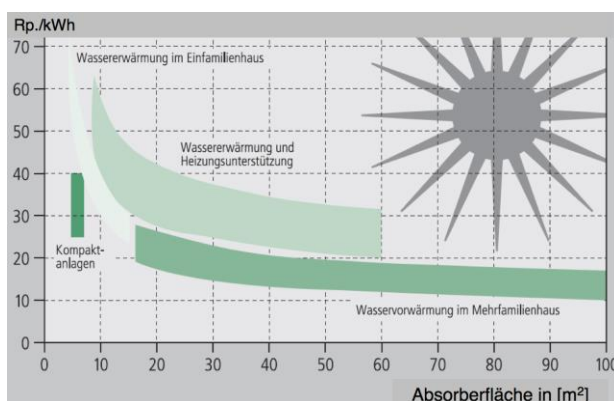


Bild 2.22 Wärmegestehungskosten für solare Wasser- und Heizungsunterstützung [32].

2.8.5 Geothermie

Bei der Geothermie wird zwischen oberflächennaher und tiefer Geothermie unterschieden.

Zur oberflächennahen Geothermie (in der Regel bis zu Tiefen von etwa 400 m) zählen Erdwärmesonden, Erdkollektoren sowie Grund- und Grubenwasser, die meist als Wärmequelle für Wärmepumpen genutzt werden.

Für Fernwärmenetze ist einerseits die Grundwasser-nutzung ab 100 kW interessant. Daneben weisen Erdwärmesonden ein grosses Potenzial auf. Bild 2.23 zeigt die Anordnung für ein Feld mit 10 Erdwärmesonden zur Beheizung eines Mehrfamilienhauses.

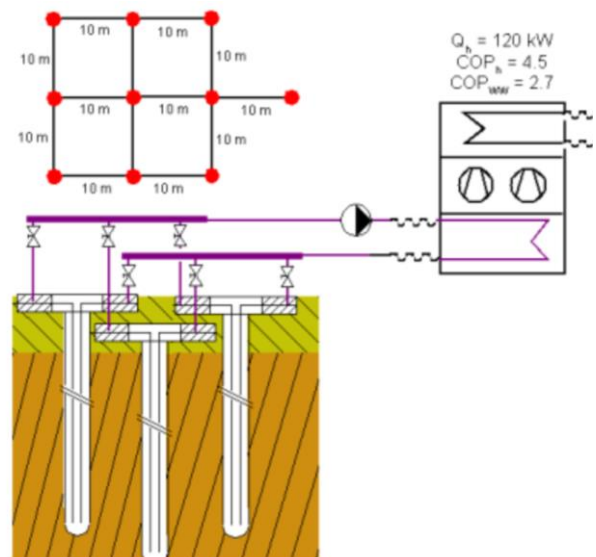


Bild 2.23 Beispiel eines Feldes mit 10 Erdwärmesonden von 210 m Bohrtiefe zur Versorgung eines Mehrfamilienhauses mit 120 kW Heizleistung mit COP von 4.5 für Raumwärme und 2.7 für Warmwasser [33].

Da die Temperatur im Erdreich durch die Wärmeentnahme sinkt und sich die Sonden eines Sondenfeldes gegenseitig beeinflussen, muss für die Auslegung das instationäre Verhalten der Wärmeentnahme berücksichtigt werden. Um die Temperaturabnahme zu verringern, können Sondenfelder durch aktive Gebäudekühlung und durch Solarthermie regeneriert werden.

Für die Auslegung von Sondenfeldern stehen Berechnungsprogramme zum instationären Verhalten zur Verfügung, die auch die Einbindung aktiver Kühlung und solarer Regeneration erlauben [33]. Bild 2.24 zeigt ein Berechnungsbeispiel zum Verhalten der Sondentemperatur während 50 Jahren.

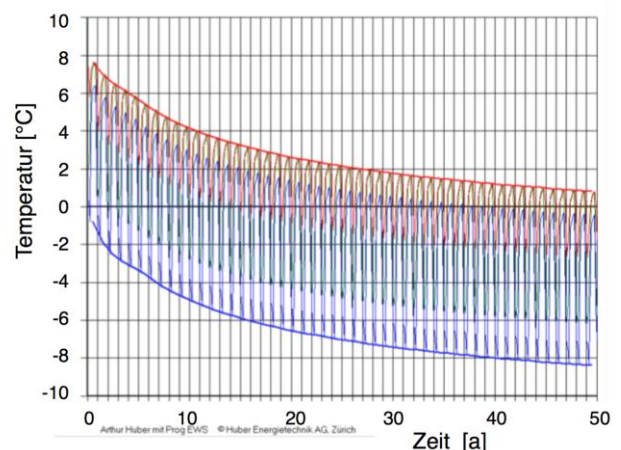


Bild 2.24 Temperaturabnahme eines Sondenfeldes während 50 Jahren [33]. Dargestellt ist das Monatsmaximum (rot) und -minimum (blau) der Sondereintrittstemperatur.

Erdkollektoren kommen aufgrund des grossen Flächenbedarfs von rund 25 m² pro kW meistens nur für Leistungen bis gegen 10 kW für Einzelgebäude zum Einsatz und sind entsprechend selten.

Bei der Tiefengeothermie wird zwischen dem Hot-Dry-Rock-Verfahren (HDR-Verfahren), den tiefen Erdwärmesonden und der hydrothermalen Geothermie unterschieden. Beim HDR-Verfahren wird die Erdwärme im trockenen, heissen Gestein genutzt, indem über eine Injektionsbohrung Wasser Gesteinsschichten in einigen Kilometern Tiefe gepresst wird. Dabei werden vorhandene Risse aufgeweitet und teilweise neue geschaffen. Durch dieses System zirkuliert das Wasser, das sich aufheizt und anschliessend über eine zweite Bohrung (Produktionsbohrung) an die Oberfläche gefördert wird. Das Wasser kann zur Stromerzeugung in ORC-Anlagen oder Dampfturbinen genutzt werden. Die Wärme kann auch direkt für Fernwärme genutzt werden, die Nutzung der Abwärme einer Stromerzeugung ist jedoch in der Regel vorteilhafter. Das HDR-Verfahren ist allerdings nur in Regionen interessant, in denen der Temperaturanstieg im Gestein Werte von 50°C pro Kilometer Tiefe übersteigt. Da die bisherigen Versuche zur Nutzung tiefer Geothermie in der Schweiz unerwartete Beben ausgelöst oder die Ertragsenerwartungen nicht erfüllt haben, hat diese Technologie bis anhin jedoch keine kommerzielle Bedeutung.

2.9 Wärme-Kraft-Kopplung (Heizkraftwerke)

2.9.1 Übersicht

Als Heizkraftwerk wird eine Energiezentrale bezeichnet, in der in einem thermischen Prozess Kraft erzeugt und die dabei anfallende Abwärme als Nutzwärme bereitgestellt wird. Dieses Prinzip wird als Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) bezeichnet und die Kraft dabei meist zur Stromerzeugung genutzt, wie Bild 2.25 am Beispiel eines Verbrennungsmotors mit Abwärmenutzung zeigt.

Da WKK-Anlagen hohe Investitionskosten aufweisen, werden sie in der Regel durch einen Heizkessel zur Spitzenlastabdeckung ergänzt. Bei Einsatz eines einzelnen BHKW erfolgt die Auslegung zum Beispiel auf rund 30 % des maximalen Wärmeleistungsbedarfs, so dass für den Bedarf über dem Bivalenzpunkt ein Spitzenlastkessel zum Einsatz kommt, wie Bild 2.26 zeigt.

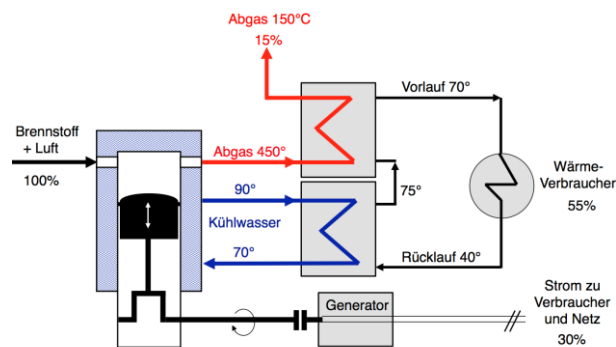


Bild 2.25 Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung am Beispiel eines Verbrennungsmotors.

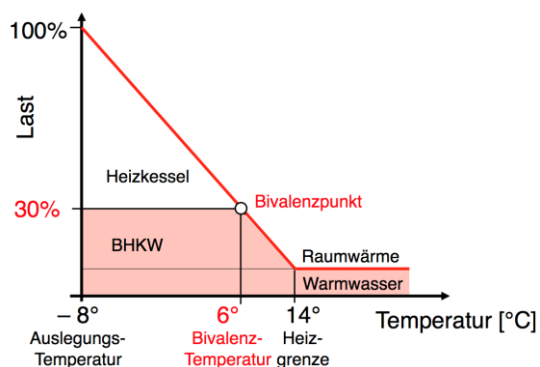


Bild 2.26 Auslegung eines BHKW.

2.9.2 Dampfturbinen

Dampfturbinen verwenden Wasser als Prozessmedium in einem geschlossenen Kreisprozess mit Verdampfung und Kondensation entsprechen dem Rankine-Prozess nach Bild 2.27. Wenn Dampfturbinen zur Wärme-Kraft-Kopplung eingesetzt werden, können sie als **Gegen-druckturbinen** mit Nutzung der gesamten Abwärme oder als **Entnahmekondensationsturbinen** mit regelbarer Abwärmenutzung ausgeführt werden. Im Gegensatz dazu produziert eine **Kondensationsturbine** ausschliesslich Strom, während die gesamte Abwärme, wie zum Beispiel in Kernkraftwerken, an die Umgebung abgeführt wird.

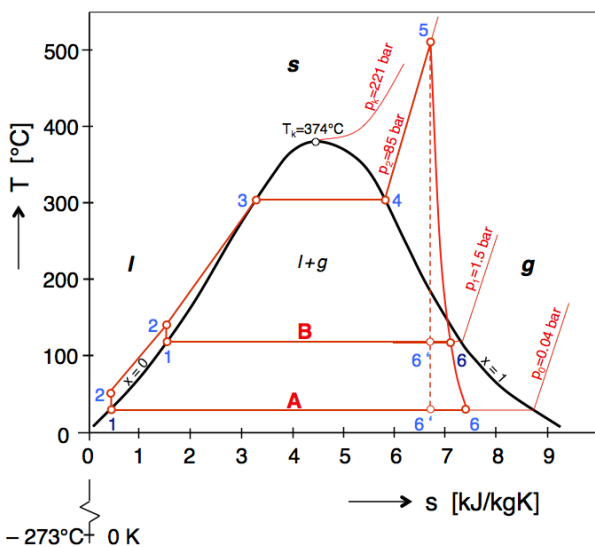
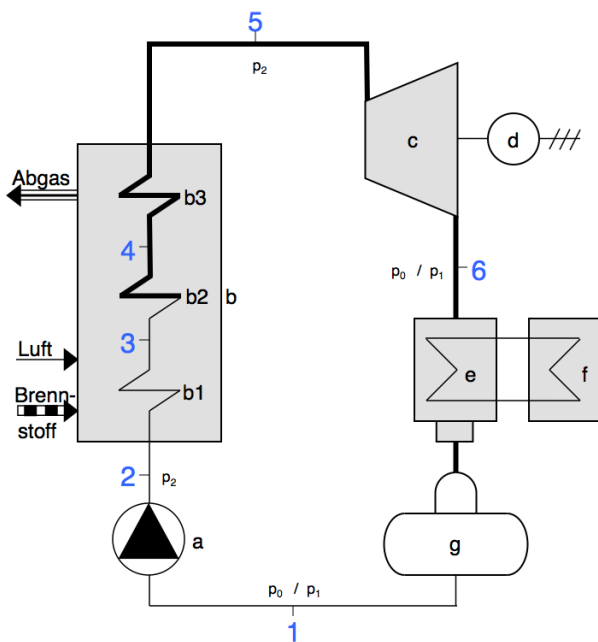


Bild 2.27 Aufbau eines Dampfturbinen-Kraftwerks (oben) und Rankine-Prozess im T,s-Diagramm. 1–2 Druckerhöhung des Wassers durch die Speisepumpe a, 2–3 Erwärmung des Wassers bis zur Verdampfungstemperatur im Kessel b, 3–4 Verdampfung bei konstanter Temperatur im Verdampferteil, 4–5 Überhitzung des Dampfes im Überhitzer, 5–6' Arbeitsabgabe durch reibungsfreie Expansion des Dampfes in der Turbine c, 5–6 Arbeitsabgabe mit nicht-idealer Turbine, 6–1 Kondensation des Dampfes im Kondensator e mit Wärmeabgabe an Kühler f und Rückführung in Sammelbehälter g.

Die elektrischen Netto-Wirkungsgrade von Dampfturbinen im Leistungsbereich typischer WKK-Anlagen mit Holz oder von KVA (1 MW_{el} bis 50 MW_{el}) betragen zwischen rund 10 % und 25 %. Wegen der niedrigen elektrischen Wirkungsgrade ist ein wärmegeführter Betrieb sinnvoll. Im Leistungsbereich von Kohlekraftwerken mit bis zu über 1 GW_{el} sind ohne Wärmeauskopplung elek-

trische Wirkungsgrade von bis zu über 45 % möglich. Allerdings ist für solche Anwendungen höchstens eine teilweise Wärmenutzung möglich. Zu beachten ist, dass der elektrische Wirkungsgrad von Dampfkraftanlagen durch Wärmeauskopplung reduziert wird, da die Nutzwärme auf einer Temperatur über der Umgebungstemperatur benötigt wird.

Obwohl auch Dampfanlagen bei Teillast betrieben werden können, ist der Regelbereich kleiner als bei reinen Wärmeerzeugern. Zudem sind rasche Laständerungen zu vermeiden und der Teillastbetrieb führt unterhalb einer gewissen Leistung zu einem deutlichen Wirkungsgradabfall. Soweit Dampfanlagen als Wärmeerzeuger in Fernheizwerken zum Einsatz kommen, werden sie deshalb meist auf die Grundlast ausgelegt und durch Spitzenkessel ergänzt. Zusammen mit den begrenzten elektrischen Wirkungsgraden wird der Beitrag von Dampfanlagen sowie Anwendungen der Wärme-Kraftkopplung zur Stromerzeugung damit begrenzt.

2.9.3 Dampfmotoren

Für kleine Leistungen (bis 1 MW_{el}) kommen nach dem gleichen Prinzip des Rankine-Prozesses auch **Dampfmotoren** zum Einsatz. Zur Verfügung stehen Dampfkolbenmaschinen und Dampfschraubenmotoren. Die elektrischen Netto-Wirkungsgrade betragen dabei um 10 % bis 12 %, weshalb ein wärmegeführter Betrieb vorausgesetzt wird.

2.9.4 Organic Rankine Cycle

Nebst mit Wasser betriebenen Dampfturbinen kommen für kleine und mittlere Leistungen (bis 2 MW_{el}) auch Prozesse mit bei tieferen Temperaturen siedenden organischen Medien zum Einsatz. Der Prozess wird dann als **Organic Rankine Cycle (ORC)** bezeichnet. Für Anwendungen mit Energieholz bietet dieses Prinzip den Vorteil, dass zwischen dem Wärmeerzeuger und dem Dampfgenerator ein mit einem Wärmeträgeröl betriebener Sekundärkreislauf möglich ist, wodurch der Anlagenbetrieb vereinfacht wird. Da der Hilfsenergieverbrauch relativ hoch ist, betragen die elektrischen Netto-Wirkungsgrade rund 10 % bis 15 %. Zudem sind die Abgastemperaturen nach dem Thermoölkessel höher als bei Wasserkesseln, weshalb in der Regel eine zusätzliche Wärmeauskopplung aus dem heißen Abgas erfolgt.

2.9.5 Verbrennungsmotoren

Im kleinen Leistungsbereich kommen für stationäre Anwendungen auch vorwiegend mit Gas betriebene Verbrennungsmotoren zum Einsatz. Diese werden nach dem Otto-Prozess mit Fremdzündung betrieben oder für kleinere Anwendungen mit Biogas und Holzgas teilweise auch als Zündstrahlmotoren mit Zugabe von Flüssigtreibstoff als Zündhilfe betrieben.

Die im Betrieb erzeugte Wärme aus Abgas (rund 60 % der Abwärme) sowie aus Kühlwasser und Schmieröl (rund 40 %) kann nach Bild 2.25 zur Wärmeversorgung genutzt werden. Kühlwasser und Schmieröl weisen meist Temperaturen von 80°C bis 90°C, bei heissge-

kühlten Motoren auch von über 100°C auf. Das Temperaturniveau der Abgase liegt mit über 350°C deutlich höher und ist vom Motorentyp abhängig.

Die Anwendung eines Motors zur Wärme-Kraft-Kopplung wird auch als Blockheizkraftwerk (BHKW) bezeichnet. Als Brennstoff dient zum Beispiel Biogas aus Vergärungsanlagen und in einzelnen Fällen auch Produktgas aus einer Holzvergasungsanlage. Um den Motor vor Verunreinigungen zu schützen und gleichzeitig die Schadstoffemissionen zu reduzieren, wird in beiden Fällen eine Gasreinigung benötigt. Während mit Biogasanlagen hohe Zuverlässigkeit erreicht werden kann, ist der Betrieb von Holzvergasungsanlagen und der dazu benötigten Gasreinigung aufwändig, was eine intensive Anlagenbetreuung verlangt. Zum Teil werden auch mit Erdgas betriebene BHKW als Grundlastwärmeerzeuger eingesetzt. Damit ist ein zuverlässiger Betrieb möglich, zur Erzeugung von weitgehend CO₂-freier Fernwärme ist jedoch nur ein geringer Anteil an Erdgas zulässig.

Gasmotoren erreichen typische Wirkungsgrade zwischen rund 25 % für Leistungen unter 50 kW_{el} und bis rund 35 % ab etwa 100 kW_{el} sowie bis zu über 40 % ab rund 1 MW_{el}. Beim Betrieb mit Holzgas ist für den Gesamtwirkungsgrad noch der Wirkungsgrad der Holzvergasung von rund 75 % zu berücksichtigen, womit für Holzgas-BHKW typische Netto-Wirkungsgrade von 15 % bis 25 % resultieren. Das gleiche gilt für Biogas, wobei die Vergärung zwar einen noch deutlich geringeren Wirkungsgrad erzielt, in der Regel aber in erster Linie zur Verarbeitung von organischen Rückständen dient.

Zur Erhöhung der elektrischen Wirkungsgrade besteht die Möglichkeit, die Abgaswärme in einem Kombiprozess zur Stromerzeugung in einem nachgeschalteten thermischen Prozess zu nutzen, wozu in erster Linie ORC-Anlagen infrage kommen. Motoren mit integrierten ORC-Anlagen sind bis anhin nicht als Serienmaschinen verfügbar. Um die immer strengeren Anforderungen an den Treibstoffverbrauch insbesondere für den Schwerverkehr zu erfüllen, sind jedoch Entwicklungen zur Abwärmenutzung mit ORC-Modulen für mit Diesel betriebenen Serienmotoren im Gang. Wenn entsprechende Seriengeräte verfügbar werden, ist denkbar, dass damit auch kostengünstige ORC-Module für BHKW-Abwärme verfügbar werden.

2.9.6 Offene Gasturbinen

Das gleiche Prinzip wie für Motoren kann für grössere Leistungen auch mit offenen **Gasturbinen** angewendet werden. Im Gegensatz zu Motoren fällt die Abwärme dabei praktisch ausschliesslich im Abgas bei Temperaturen von 400°C bis 600°C an. Obwohl diese Abwärme grundsätzlich für Fernwärme verwendet werden kann, ist deren Nutzung zum Antrieb eines nachgeschalteten Dampfprozesses sinnvoller. Wenn die Leistungen gross genug sind, kommt dafür eine Dampfturbine zum Einsatz und das Prinzip wird dann als Gas- und Dampf-Kombikraftwerk (GuD) oder kurz **Kombikraftwerk** bezeichnet. Mit Erdgas betriebene Kombikraftwerke weisen typische Gesamtleistungen um

600 MW_{el} auf und erzielen elektrische Wirkungsgrade von rund 60 %. Im Prinzip ist auch bei Kombikraftwerken eine weitere Abwärmenutzung möglich. Wegen der hohen elektrischen Wirkungsgrade ist dies jedoch von untergeordneter Bedeutung.

Daneben können Gasturbinen auch im Leistungsbe- reich der Gasmotoren zum Beispiel als Biogas-BHKW eingesetzt werden. Hauptvorteil ist dabei der geringere Aufwand für Service und Unterhalt. Demgegenüber erzielen kleine Gasturbinen, auch Mikrogasturbinen genannt, allerdings deutlich niedrigere Wirkungsgrade als Gasmotoren, weshalb Gasmotoren energetisch vorteilhaft sind.

2.9.7 WKK und Wärmepumpe

Während kleinere Wärmepumpen in der Regel elektrisch angetrieben werden, kommt für grössere Leistungen auch der mechanische Antrieb mit einem Verbrennungsmotor infrage. Zur Wärmenutzung steht dann Abwärme auf hohem und mittlerem Temperaturniveau des Motors zur Verfügung, während die mechanische Leistung zum Antrieb der Wärmepumpe dient, die Nutzwärme auf einem tieferen Temperaturniveau produziert. Entsprechende Anwendungen sind zum Beispiel dann von Interesse, wenn die Abwärme eines Biogas-BHKW nicht zur Wärmeversorgung ausreicht oder wenn ein gleichzeitiger Kältebedarf gegeben ist, der durch die kalte Seite der Wärmepumpe gedeckt werden kann.

2.9.8 Geschlossene Gasprozesse

Bei Verbrennungsmotoren und offenen Gasturbinen wird Brennstoff direkt in der Maschine verbrannt, so dass die Maschine mit möglichen Verunreinigungen aus dem Brennstoff in Kontakt kommt. Dampfkraftanlagen verfügen dagegen über eine externe Wärmezufuhr durch eine Wärmeübertragung, wobei als Wärmequelle ein Brennstoff oder andere Quellen wie Geothermie oder Solarthermie dient. Für die Maschine kritische Stoffe wie etwa Chlor in Siedlungsabfall, Kalium in Holz oder Schwefel in Biogas können zum Beispiel eine Dampfturbine damit nicht beschädigen. Wenn aus Biomasse oder Abfall ein Brennstoff produziert wird, müssen die kritischen Stoffe dagegen vor einer Verbrennungsmaschine in einer aufwändigen Gasreinigung entfernt werden. Aus diesem Grund kommen für Holz- kraftwerke bis anhin vor allem Dampfkraftanlagen zum Einsatz, die für kleine Leistungen aber sehr hohe spezifische Investitionskosten bei gleichzeitig niedrigen Wirkungsgraden aufweisen. Aus diesem Grund besteht ein Interesse an anderen Prozessen, die ebenfalls über eine externe Verbrennung mit Wärmeübergang betrieben werden, aber weniger aufwändig sind. Dazu kommen Stirlingmotoren und geschlossene (also extern befeuerte) Gasturbinen zum Einsatz. Der mechanische Aufbau dieser Maschinen ist mit demjenigen von Verbrennungsmotoren und offenen Gasturbinen vergleichbar, als Prozessmedium dient jedoch ein Gas wie Luft oder Helium das im Kreis geführt und extern erwärmt wird. Stirlingmotoren kommen für kleine Leistungen von weniger als 1 kW bis zu rund 100 kW zum Einsatz und erzielen in der genannten Leistungsklasse höhere Wir-

kungsgrade als geschlossene Prozesse. Geschlossene Gasturbinen kommen für Leistungen ab einigen kW bis zu über 100 kW zum Einsatz. Für beide Technologien existieren zahlreiche Entwicklungen für Anwendungen mit Biomassebrennstoffen sowie mit konzentrierender Solarenergie, die teils in Pilotanlagen in Betrieb stehen. Bis anhin weisen auch diese Anlagen sehr hohe spezifische Investitionskosten und deshalb nur wenige kommerzielle Anwendungen auf.

2.9.9 Systemvergleich

Wie Bild 2.28 zeigt, decken die Technologien zur Wärme-Kraft-Kopplung einen Bereich von wenigen kW bis

über 1 GW elektrischer Leistung ab. Die erzielbaren Netto-Wirkungsgrade umfassen eine Bandbreite von weniger als 10 % bis zu 60 %. Bei den etablierten Verfahren der Dampfkrafttechnik zeigen die elektrischen Wirkungsgrade eine ausgeprägte Skalenabhängigkeit von weniger als 10 % für Leistungen ab 10 kW bis zu rund 45 %. Alternative Techniken wie die Holzvergasung und Stirlingmotoren erzielen höhere Wirkungsgrade im kleinen und mittleren Leistungsbereich.

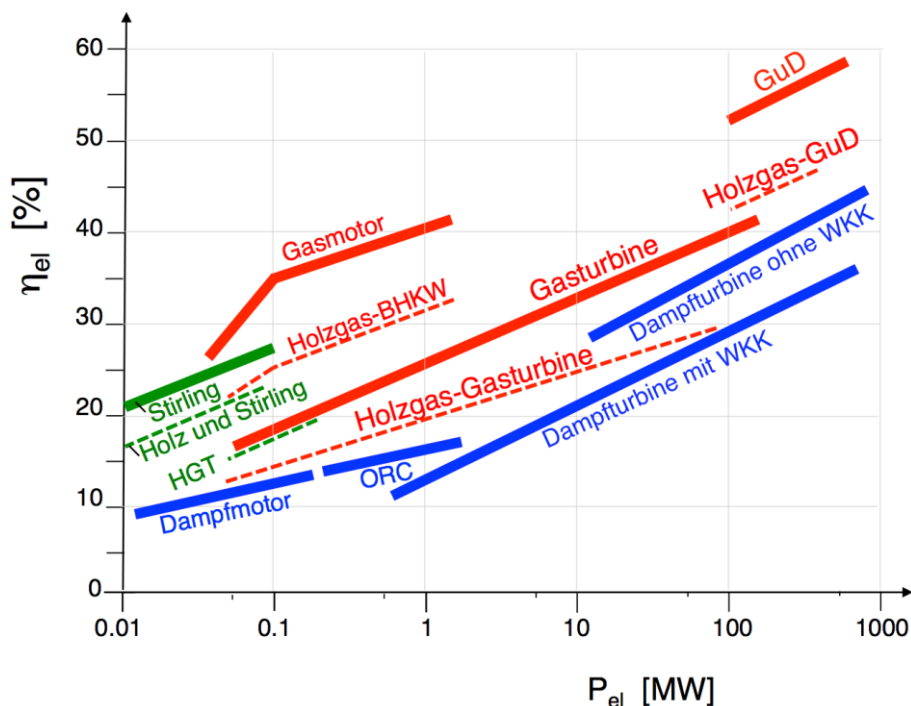


Bild 2.28 Netto-Wirkungsgrade verschiedener Techniken zur Stromerzeugung in Funktion der elektrischen Leistung. GuD = Gas- und Dampf-Kombikraftwerk, HGT = Heissgasturbine (mit Holzverbrennung).

2.10 Thermische Energiespeicher

Die grundsätzliche Aufgabe eines thermischen Energiespeichers ist die zeitliche Entkopplung der Wärmeerzeugung von der Wärmeabgabe. Dadurch lassen sich zum Beispiel Lastspitzen sowie Lastabsenkungen gut kompensieren. Je nach Dimensionierung des Energiespeichers lassen sich kürzere oder längere Zeiträume überbrücken. Bei Wärme-Kraft-Kopplung kann der Anlagenbetrieb flexibler gestaltet werden und vielfach lässt sich auch die Wärmeerzeugung kleiner dimensionieren.

Der Einsatz thermischer Energiespeicher bietet deshalb je nach System teilweise ein erhebliches Potenzial zur Optimierung des Anlagenbetriebs in Bezug auf Kosten und Primärenergieverbrauch. Die folgenden Ausführungen befassen sich mit den Grundlagen zur thermischen Energiespeicherung bis zum Speicherdesign und deren Anwendung bzw. Integration. Die Informationen basieren grossteils auf den Quellen [34] und [35].

2.10.1 Eigenschaften und Begriffe

Die thermischen Energiespeicher können aufgrund ihrer Einsatzgebiete und Eigenschaften wie folgt unterschieden werden:

- **Temperaturniveau:** Die Temperatur, bei der ein Wärmespeicher geladen und entladen wird, legt seinen Einsatzbereich massgeblich fest. Zur Anwendung bei Fernwärme liegt der Temperaturbereich meist zwischen 25°C für Flächenheizsysteme wie Fussbodenheizungen und bis zu 90°C für Radiatorheizungen. Für die Warmwassererwärmung sind aus hygienischen Gründen zeitweise Temperaturen von über 60°C notwendig. Für sehr ausgedehnte, grosse, Fernwärmenetze werden Vorlauf-Temperaturen von über 100°C benötigt. Für industrielle Prozesse, wie die Bereitstellung von Dampf werden ebenfalls Temperaturen von über 100°C (bis 250°C) benötigt. Hochtemperaturanwendungen von Speichern bei Temperaturen von über 300°C bis 600°C kommen zum Beispiel in solarthermischen Kraftwerken zur Anwendung. Kältespeicher für Kühlung und Klimatisierung werden in einem Temperaturbereich von 5°C bis 18°C benötigt. Für industrielle Kühlprozesse mit Anwendungen um 0°C wie etwa in der Lebensmittelindustrie sind vielfach Eisspeicher im Einsatz, während in industriellen Kältenetzen Speicher bis zu -20°C üblich sind.
- **Standort:**
 - Der Standort der Energiespeicherung im System ist ein wichtiges Kriterium zur Charakterisierung eines Energiespeichers. Dabei werden **zentrale** und **dezentrale** Energiespeichern unterschieden. In der Regel wird ein am Standort der Wärmeerzeugung aufgestellter Wärmespeicher als zentral bezeichnet, während Wärmespeicher bei den Wärmeabnehmern als dezentral bezeichnet werden.
 - Die meisten thermischen Energiespeicher sind **stationär** installiert. Dies gilt für zentrale oder dezentrale Wärmespeicher. Es gibt aber auch
- **mobile** Wärmespeicher, die nicht Wärme zu einem Wärmeabnehmer transportieren. Dabei spielt vor allem die Energiespeicherdichte eine grosse Rolle und es werden meist Latentwärmespeicher oder thermochemische Speichersysteme mobil eingesetzt, allerdings erst in wenigen Pilotanlagen
- **Speicherkapazität und thermische Leistung:**
 - Speicher mit **hoher Speicherkapazität** bzw. Energiedichte sind wichtig, wenn das Platzangebot gering ist oder grosse Energiemengen gespeichert werden müssen.
 - Speicher mit **hoher thermischer Leistung** werden in Bereichen wie zum Beispiel der Warmwasserbereitstellung und im Fernwärmebereich eingesetzt. Mit sensiblen Warmwasserspeichern, in denen das benötigte Warmwasser gleichzeitig das Speichermedium ist, ist dies gut möglich.
- **Speicherdauer:** Ein wesentliches Merkmal für alle Energiespeicher ist die Dauer des zu überbrückenden Zeitraums zwischen Laden und Entladen. **Kurzzeitspeicher** werden im Bereich von Stunden bis wenige Tage eingesetzt, während **Langzeitspeicher** Energie über Wochen bis zu einem Jahr speichern können. In der Regel müssen Langzeitspeicher grosse Mengen thermischer Energie bei relativ geringer Lade- und Entladeleistung speichern können, während Kurzzeitspeicher hohe thermische Leistungen und geringere gespeicherte Wärmemengen aufweisen.
- **Speicherkapazität:** Als Speicherkapazität wird die Energiemenge bezeichnet, die ein Speicher dem Verbraucher unter bestimmten Prozessbedingungen zur Verfügung stellen kann. Aus Sicht der Exergie hängt die Speicherkapazität entscheidend von der Umgebungstemperatur ab. Wird die Speicherkapazität von der technisch nutzbaren Seite bewertet, so hängt diese von der tatsächlichen Temperaturveränderung im Speicher ab (siehe Kapitel 2.10.3.1). Wird lediglich ein Speichermedium erwärmt, ist die Kapazität direkt proportional zum Temperaturunterschied. Findet bei der Temperaturerhöhung des Mediums ein Phasenwechsel statt, trägt die Schmelz- oder Verdampfungsenthalpie ebenfalls zur Kapazitätserhöhung bei. Die Speicherkapazität wird absolut in J oder kWh sowie als spezifische Grösse zum Beispiel volumetrisch in kWh/m³ angegeben. Für eine ökonomische Betrachtung muss die Speicherkapazität auf die Kosten des Speichers bezogen werden.
- **Lade- und Entladeleistung:** Die Lade- und Entladeleistung beschreibt, wie schnell ein Speicher eine bestimmte Wärmeleistung aufnehmen und wieder abgeben kann. Sie ist entscheidend für eine optimale Anpassung eines Speichers an das durch die Anwendung vorgegebene Lade- und Entladeprofil. Die Leistung hängt im Gegensatz zur Kapazität nicht von dem physikalischen Speichereffekt ab. Vielmehr spielt neben dem Temperaturunterschied der Massenstrom oder der Wärmeübergang eine entscheidende Rolle. Die Dimensionierung der zu- und abführenden Leitungsquerschnitte bzw. die technische Ausführung beispielsweise eines Wärmeübertragers oder Reaktors mit spezifischen Übertragungsflächen, ist dabei von Bedeutung. Die

Leistung eines Speichers wird oft unter Auslegebedingungen als Nennleistung angegeben. Die tatsächlichen Leistungen hängen dann von den aktuellen Prozessparametern ab. Die Leistung kann absolut in W oder auch auf das Volumen oder die Masse des Speichers in W/m^3 oder W/kg angegeben werden. Für eine wirtschaftliche Beurteilung eines Speichers muss auch hier die Leistung auf die Kosten bezogen werden. Eine ebenfalls übliche Darstellung, insbesondere für Latentwärmespeicher, ist der Bezug der Kapazität (in kWh) relativ zur Leistung (in kW). Dieser Quotient ergibt eine Zeit in Stunden, die zum Beladen oder Entladen benötigt wird und die für Beladen und Entladen unterschiedlich sein kann.

- **Nutzungsgrad:** Der Nutzungsgrad beschreibt das Verhältnis der nutzbaren Energie beim Entladen zur vom Speicher beim Laden aufgenommenen Energie. Die Nutzwärme ist wegen der Speicherverluste geringer als zugeführte Wärme. Ebenso nimmt die gespeicherte Exergie mit sinkender Temperatur ab. Der Nutzungsgrad ist dimensionslos und wird in der Regel in Prozent angegeben. Zum Begriff Nutzungsgrad siehe auch Kapitel 2.6.1.

- **Speicherzyklen:** Der Zeitraum zwischen dem Belade- und Entladevorgang wird als Speicherdauer (auch Speicherperiode) bezeichnet (Bild 2.29). Die Summe aus Lade-, Speicher- und Entladedauer (und unter Umständen noch einer Stillstandszeit im entladenen Zustand) bildet einen Speicherzyklus. Wie Speicherzyklen aussehen, hängt von den zeitlichen Profilen der Wärmequelle und der Verbraucher ab. Auch die Speicherkapazität und die möglichen Lade- und Entladeleistung spielt eine Rolle. Bei thermischen Energiespeichern liegen diese Zeiten in einem Bereich von Minuten bis zu einem Jahr. Finden innerhalb eines Speicherzyklus irreversible Prozesse statt, welche die Speicherkapazität beeinträchtigen, so ist die Anzahl der ausführbaren Speicherzyklen begrenzt. Die Stabilität thermischer Energiespeicher wird an ihrer Degradation über eine bestimmte Zyklenzahl bestimmt. Werden mit einem Speichersystem viele Zyklen pro Jahr gefahren, wirkt sich das positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus. Das System setzt dann viel Energie um, stellt oft die gespeicherte Energie bereit und wird damit schneller amortisiert.

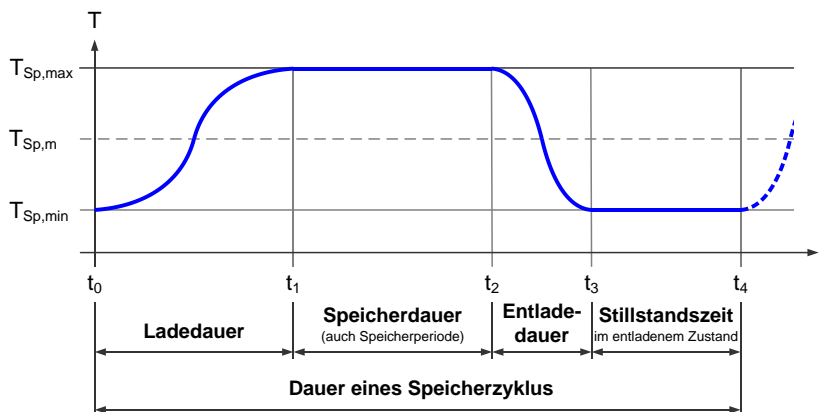


Bild 2.29 Speichertemperatur als Funktion der Zeit und Begriffe zur Beschreibung eines Speicherzyklus

2.10.2 Speichertechnologien

Die thermische Energie kann in verschiedene Speichertechnologien unterteilt werden. Für die Anwendung in Fernwärmenetzen kommt hauptsächlich die sensible Wärmespeicherung zur Anwendung, da diese Technologie am weitesten entwickelt und relativ kostengünstig ist. Vollständigkeitshalber werden auch die latente und die thermochemische Wärmespeicherung eingeführt, welche jedoch bei der Anwendung in Fernwärmenetzen praktisch keine Rolle spielen.

2.10.2.1 Sensible Wärmespeicherung

Bei der sensiblen Speicherung wird ein Speichermedium ohne Phasenwechsel erwärmt oder abgekühlt. Die Menge der gespeicherten Energie ist abhängig von der spezifischen Wärmekapazität des Stoffes in $kJ/(kg K)$. In den meisten Fällen wird Wasser eingesetzt, da es eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt und zudem umweltverträglich, kostengünstig, thermisch stabil und praktisch überall verfügbar ist.

Der Einsatzbereich von drucklosen Speichern mit Wasser liegt im Temperaturbereich von $0^{\circ}C$ bis $100^{\circ}C$. Über $100^{\circ}C$ stehen Speicher mit Wasser als Medium unter Druck. Typisch sind Temperaturen bis etwa $200^{\circ}C$ für Prozesswärme. Über $100^{\circ}C$ steigt der Dampfdruck stark an, was hohe Druckanforderungen an die Behälter stellt und zu entsprechend höheren Kosten führt.

Speicher mit Thermoöl können aufgrund der höheren Siedetemperatur auch bei höheren Temperaturen, je nach Thermoöl von bis etwa $400^{\circ}C$, betrieben werden. Die Wärmeleitfähigkeit von Thermoöl ist erheblich niedriger als die von Wasser und die Wärmekapazität beträgt etwa die Hälfte im Vergleich zu Wasser. Durch die Kombination von Thermoöl mit einer Gesteinsschichtung hoher Wärmekapazität kann die Speicherkapazität erhöht und die Menge an relativ teurem Thermoöl reduziert werden. Diese Kombination ist mit einem Kies/Wasser-Speicher für Niedertemperaturanwendungen vergleichbar. Für höhere Temperaturen kommen auch Feststoffspeicher wie Beton oder spezielle Keramiken infrage.

Für Temperaturen unter 0°C sind Wasser-Glykolmischungen im Einsatz.

In Abhängigkeit vom Temperaturhub und den anwendungsspezifischen Be- und Entladetemperaturen weisen latente und thermochemische Wärmespeicher in der Regel höhere Energiedichten auf als sensible Wärmespeicher. Für die sinnvolle Anwendung von Latentwärmespeicher liegt der maximale Temperaturhub bei rund 20 K (z.B. Eisspeicher). Bei einem Temperaturhub von über 50 K weist ein sensibler Wärmespeicher mit Wasser bereits eine höhere Energiedichte auf. Zudem verfügen sensible Wärmespeicher über eine ausgereifte Technik und sind deutlich kostengünstiger.

Bei sensiblen Energiespeichern ist in der Regel die Temperaturdifferenz zwischen dem Speichermedium und der Umwelt relativ gross, daher spielt die Wärmedämmung eine wichtige Rolle zur Reduktion der relativ hohen Selbstentladung während der Speicherdauer.

2.10.2.2 Latente Wärmespeicherung

Bei Latentwärmespeichern wird zusätzlich zur sensiblen Wärme die für einen Phasenwechsel notwendige Energie gespeichert. In der Praxis wird üblicherweise der Phasenübergang fest-flüssig genutzt. Die Volumenänderung beträgt dabei in der Regel weniger als 10 % und ist technisch beherrschbar. Zudem ist die Phasenänderungsenthalpie ausreichend hoch.

Latentwärmespeicher weisen gegenüber sensiblen Wärmespeichern einige Vorteile auf. So kann bei kleinen Temperaturunterschieden wesentlich mehr thermische Energie gespeichert werden. Sie weisen für solche Anwendungen also eine höhere Energiedichte auf und können dank der hohen Speicherkapazität somit wesentlich kompakter gebaut werden. Zudem ist die Temperatur beim Laden und Entladen über lange Zeit konstant, was z.B. den Einsatz von in die Gebäudestruktur integrierte Phase Change Materials (PCM) ermöglicht.

Für den Transport von thermischer Energie eignen sich sogenannte Phase Change Slurries (PCS), auch kurz Slurries genannt. Slurries haben den Vorteil, dass Sie unabhängig vom Aggregatzustand immer pumpfähig sind. Anwendung findet dies beispielsweise bei der Klimatisierung von Gebäuden oder in Industrieanlagen.

Nachteilig sind die relativ hohen Kosten und der Umstand, dass der jetzige Entwicklungsstand der Technologie noch nicht für die Anwendung im Fernwärmebereich geeignet ist.

2.10.2.3 Thermochemische Wärmespeicherung

Unter dem Begriff der thermochemischen Energiespeicherung sind chemisch reversible Reaktionen zu verstehen, bei denen die Reaktionsprodukte getrennt und über eine lange Zeit gespeichert werden können. Durch die Trennung treten keine Speicherverluste auf und erst bei der Entladung gibt die exotherme Reaktion die gespeicherte Energie wieder frei. Thermochemische Ener-

giespeicher erlauben sehr hohe Energiedichten, finden derzeit aber kaum Anwendung in der Praxis, da sich die Technologie grösstenteils noch in der Grundlagenforschung befindet.

2.10.3 Grundlagen der Energiespeicherung

2.10.3.1 Speichervorgang

Thermische Energiespeicher erhöhen durch die Energiezufuhr bzw. durch Zufuhr eines Energieträgers ihren Energieinhalt (Laden), speichern diesen Energieinhalt über einen bestimmten Zeitraum möglichst verlustfrei (Speichern) und geben bei Bedarf Energie bzw. den Energieträger wieder ab (Entladen). Beim Entladen reduziert sich der Energieinhalt des Speichers (Bild 2.30).

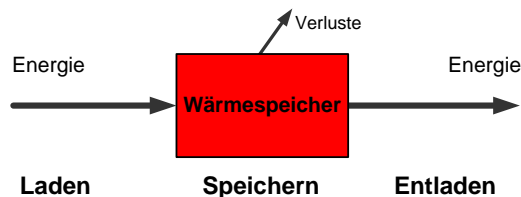


Bild 2.30 Prozess der thermischen Energiespeicherung. Laden – Speichern – Entladen

2.10.3.2 Thermische Energie

Eigentlich ist der Begriff Energiespeicher physikalisch betrachtet nicht korrekt, da Energie nicht verbraucht, sondern nur umgewandelt werden kann und in diesem Sinn Energie nicht gespeichert wird. Der Speicher besitzt vielmehr das thermodynamische Potenzial, um eine bestimmte Wärme- oder Kältemenge an ein anderes Medium abzugeben. Folglich beschreibt der Begriff der **Exergie** den Anteil der Energie, der unter Umgebungsbedingungen uneingeschränkt in andere Energieformen umgewandelt werden kann. Je höher die Differenz von Speicher- zu Umgebungstemperatur ist, umso grösser ist der Exergiegehalt und desto grösser ist die Wertigkeit der Wärme. Der Begriff **Anergie** beschreibt dagegen den Anteil der Energie, die an die Umgebung abgegeben wird und somit nicht mehr nutzbar ist. Bei der Betrachtung eines verlustbehafteten Beladungs-, Speicher- und Entladevorgangs eines thermischen Energiespeichers erhöht sich der Anergiegehalt und der Exergiegehalt nimmt ab (Bild 2.31). Die Summe aus Anergie- und Exergiegehalt bleibt konstant.

In der folgenden Gleichung ist die Berechnung des Exergiegehaltes dargestellt.

$$E_{ex} = Q \frac{T_{Sp} - T_U}{T_{Sp}} = Q \left(1 - \frac{T_U}{T_{Sp}} \right)$$

- E_{ex} = Exergiegehalt im Speicher [kWh]
- Q = Energieinhalt im Speicher [kWh]
- T_{Sp} = Speichertemperatur [K]
- T_U = Umgebungstemperatur [K]

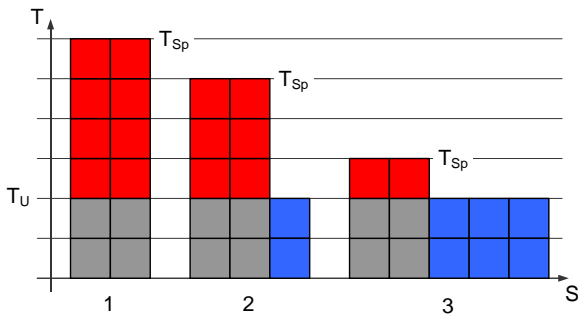


Bild 2.31 Energieinhalt im Wärmespeicher (T,s-Diagramm nach [34]). Der Exergiegehalt (rot) im Speicher wird während der Speicherung und Entladung in Anergie (blau) umgewandelt. Die Energie als Summe der beiden Terme bleibt konstant.
 1) Speicher durchgeladen
 2) Speicherung inkl. Wärmeverluste
 3) Wärmeabgabe (Entladung).

Es ist ersichtlich, dass der Exergiegehalt von der Wärmemenge Q, der Speichertemperatur T_{Sp} und der Umgebungstemperatur T_U abhängt. Der Bruchterm in der Klammer $(1-T_U/T_{Sp})$ entspricht dem Carnot-Wirkungsgrad, also der maximalen Arbeitsfähigkeit, die in der Wärme enthalten ist.

Für die Anwendung im Fernwärmebereich kommt praktisch nur die sensible Wärmespeicherung in Frage. Werden der Energieinhalt im Speicher bzw. die darin enthaltene Wärmemenge betrachtet, so wird als sensible Wärme die Wärmeaufnahme oder -abgabe verstanden, die eine fühlbare Änderung der Temperatur zur Folge hat. Das verwendete Speichermedium wird erhitzt oder abgekühlt. Der Zusammenhang zwischen der im Speicher enthaltenen Wärmemenge Q und der Temperaturänderung ΔT wird wie folgt beschrieben:

$$Q = m c_p \Delta T$$

- Q = Wärmemenge [kWh]
- m = Masse des im Speicher enthaltenen Wärmespeichermediums [kg]
- c_p = spez. Wärmekapazität Wärmespeichermedium [J/(kg K)]
- ΔT = Temperaturänderung im Speicher [K]

Neben der Temperaturänderung ΔT und der Stoffmasse m ist die Wärmemenge Q von der spezifischen Wärmekapazität c_p des Speichermediums anhängig. Eine hohe spezifische Wärmekapazität ist für die Wärmespeicherung hilfreich, da für eine zu speichernde Energiemenge eine geringere Menge des Speichermediums benötigt wird und der Speicher damit kleiner ausfällt. Wasser hat von allen praktisch einsetzbaren Speichermedien mit rund 4.2 kJ/(kg K) die höchste spezifische Wärmekapazität pro Masse. Auch auf das Volumen bezogen hat Wasser den höchsten Wert, also den höheren Wert als Metalle oder Naturmaterialien wie Stein. Der gelegentlich diskutierte Kiesbettspeicher weist in Summe also eine geringere Wärmekapazität auf als ein reiner Wasserspeicher.

2.10.3.3 Wärmedämmung

Zur Reduktion thermischer Verluste spielt die Wärmedämmung bei sensiblen Wärmespeichern eine besonders grosse Rolle. Der Zusammenhang zwischen Temperaturdifferenzen und **Wärmeverlusten** eines Speichers wie folgt beschrieben:

$$\dot{Q}_V = U A (T_{Sp} - T_U)$$

- \dot{Q}_V = Wärmeverlust Speicher [W]
- U = Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m² K)]
- A = Oberfläche Speicher [m²]
- T_{Sp} = Speichertemperatur [°C]
- T_U = Umgebungstemperatur [°C]

Neben der Oberfläche A des Speichers, der Speichertemperatur T_{Sp} und der Umgebungstemperatur T_U ist der Wärmedurchgangskoeffizient U der entscheidende Kennwert der Wärmedämmung. Der U-Wert wird in W/(m² K) angegeben und beschreibt, welche Leistung pro Kelvin Temperaturdifferenz durch einen Quadratmeter Oberfläche übertragen wird. Je nach Bauform des Speichers (Kugel, Zylinder, etc.) muss der Wärmedurchgangskoeffizient individuell berechnet werden. Für eine ebene Wand mit n-Schichten kann er wie folgt bestimmt werden:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

- U = Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m² K)]
- s = Schichtdicke der Dämmung [m]
- α = Wärmeübergangskoeffizient [W/(m² K)]
- λ = Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
- i = Innen (Speicher)
- a = Aussen (Umgebung)

Der Wärmedurchgangskoeffizient hängt somit von der Wärmeleitfähigkeit λ und den Schichtdicken s_i der Dämmmaterialien sowie von den Wärmeübergangskoeffizienten α auf der Innen- und Aussenseite ab. α ist dabei der Proportionalitätsfaktor, der die Intensität des Wärmeübergangs an einer Grenzfläche beschreibt. Der Wärmeübergangskoeffizient ist keine Materialkonstante, sondern er ist von der Strömungsgeschwindigkeit, der Art des Fluides, den geometrischen Verhältnissen und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig.

Bei üblichen **Dämmmaterialien** wie porösen Schäumen oder Faserdämmstoffen wird die Luftkonvektion durch einen kleinporigen Aufbau unterdrückt. Das Dämmmaterial selbst muss dabei grundsätzlich ein schlechter Wärmeleiter sein. Die Dämmmaterialien werden entweder als Platten oder auch als schüttfähiges Pulver angeboten, wodurch sie sich einer beliebigen Speichergeometrie optimal anpassen können. Auch biegbare Vliesdämmstoffe, wie Mineral- oder Glaswolle sind verbreitet, haben jedoch die nachteilige Neigung, Feuchtigkeit aufzunehmen und zu speichern. Handelsübliche Dämmmaterialien weisen eine Wärmeleitfähigkeit von 0.025 bis 0.07 W/(m K) auf.

Neben der Auswahl des Dämmmaterials sind in der Praxis noch folgende Aspekte zu beachten, um eine gute Wärmedämmung zu erreichen:

- Wasserdampfdiffusion (oder kleine Leckagen) führen zu feuchten Dämmschichten, die damit schlechter dämmen.
- Das Dämmmaterial kann durch Sonneneinstrahlung und durch Temperaturbelastung altern.
- Bei Plattenmaterialien können bei nachlässiger Installation, aber auch durch thermische Ausdehnung im Betrieb irreversible Luftspalte und damit Konvektion und Kamineffekte entstehen.
- Bei Pulverschüttungen kann eine Setzung des Materials stattfinden, so dass gerade im oberen Bereich mit meist höchster Temperatur ein ungeämmter luftgefüllter Raum mit hohem Wärmeverlust entsteht.
- Die Dämmung des unteren Speicherbereichs sollte nicht vernachlässigt werden, da dort bei höheren Rücklauftemperaturen und bei durchgeladenem Speicher temporär grosse Verluste auftreten können.
- Durch eine grosse Anzahl und/oder schlecht gedämmte Anschlüsse und der im Bodenbereich zur Aufstellung notwendigen Standzarge können Verluste in der Grössenordnung bis zur Hälfte der gesamten Hüllverluste der Wanddämmung auftreten.
- Schliesslich ist natürliche Konvektion in den Zuleitungen (Einrohrzirkulation) vorzugsweise durch Thermosyphons oder durch den Einbau von Konvektionsbremsen auszuschliessen.

Eine besonders hohe Dämmwirkung kann durch ein Vakuum erreicht werden (analog zur doppelwandigen Thermoskanne), welches das Dämmmaterial ersetzt. Wegen der Grösse der im Fernwärmebereich eingesetzten Wärmespeicher kommt diese Dämmart in der Regel jedoch nicht zur Anwendung.

2.10.3.4 Auskühlung über die Zeit

Die Auskühlung eines sensiblen Speichers wird mit der Exponentialfunktion über folgende Gleichung beschrieben:

$$\Delta T(t) = \Delta T_0 \cdot e^{-\frac{A \cdot U}{V \cdot \rho \cdot c_p} t}$$

- $\Delta T(t)$ = Temperaturdifferenz zum Zeitpunkt t [K]
- ΔT_0 = Temperaturdifferenz am Anfang [K]
- A = Oberfläche Speicher [m²]
- V = Volumen Speicher [m³]
- U = Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m² K)]
- ρ = Dichte Wärmespeichermedium [kg/m³]
- c_p = spez. Wärmekapazität Wärmespeichermedium [J/(kg K)]
- t = Betrachtungsdauer [s]

Wobei $\Delta T(t)$ die Temperaturdifferenz zwischen der Speichertemperatur und der Umgebungstemperatur zum Zeitpunkt t ist und ΔT_0 die Temperaturdifferenz zwischen der Speichertemperatur und der Umgebungstemperatur am Anfangszeitpunkt darstellt. Es ist ersichtlich, dass für die bei der Speicherung möglichst

langen Abkühlzeiten nicht nur der Wärmedurchgangskoeffizient, sondern auch das Oberflächen-Volumen-Verhältnis (A/V) des Speichers sowie die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_p des Wärmespeichermediums eine wichtige Rolle spielen.

Beispielhaft ist in Bild 2.32 die Auskühlung eines Speichers für einen Wärmeleistungsbedarf von 1'000 kW zu sehen. Bei durchgeladenem Speicher und einer Temperaturdifferenz von 30 K kann der Wärmeleistungsbedarf für eine Stunde gedeckt werden, wenn der Speicher ein Volumen von 29 m³ aufweist. Basierend auf einem zylindrischen Speicher mit einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von knapp 7.3 (siehe auch Beispiel nächste Seite: Durchmesser 1.1 m, Höhe 8 m) ergibt sich ein Oberflächen-Volumen-Verhältnis A/V von 2.10. Es wird angenommen, dass der Speicher bei einer Temperatur von 80°C durchgeladen ist und die mittlere Umgebungstemperatur 10°C beträgt. Der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient der Speicherhülle beträgt 0.2 W/(m² K).

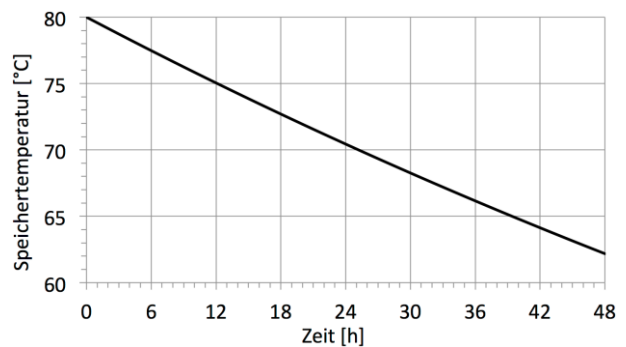


Bild 2.32 Auskühlung der Speichertemperatur in Funktion der Zeit. Speicherdimensionierung für einen Leistungsbedarf von 1'000 kW, Kompensation für eine Stunde bei einer Temperaturspreizung von 30 K. Start bei einer Speichertemperatur von 80°C und einer Umgebungstemperatur von 10°C.

2.10.4 Speicherdesign und Auslegung

Thermische Energiespeicher können in einer Vielzahl verschiedener Bauformen realisiert werden. Die Bauformen ergeben sich aus der genutzten Speichertechnologie und den Anforderungen der jeweiligen Anwendung. Für die im Fernwärmebereich eingesetzte sensible Wärmespeicherung hat sich die sogenannte **direkte Beladung** als einfachste **Bauform** bewährt. Dabei ist das Wärmespeichermedium auch gleichzeitig das Wärmeträgermedium, es gibt also keine hydraulische Trennung. Der Speicher enthält chemisch gesehen nur eine Komponente, die ihre Temperatur ändert, aber nicht ihren Aggregatzustand. Vorteil einer solchen Direkt-Beladung ist die einfache Bauweise und mit Ausnahme von Einbauten für eine optimale Einströmung auch der Verzicht auf innere Einbauten. Damit wird der Raum nur durch aktives Speichermedium ausgefüllt. Bei der **indirekten Beladung** wird Wärme über Wärmeübertrager an das Speichermedium abgegeben.

Dieses Konzept wird dann verwendet, wenn bei der Wärmeversorgung unterschiedliche Flüssigkeiten verwendet werden (zum Beispiel Wasser-Glykol/Wasser) und/oder unterschiedliche Systemdrücke zwischen Netz und Speicher herrschen. Ein Vorteil ist auch der Schutz vor Korrosion, Verschmutzung und Speicher-materialverlust, da die Speicher als geschlossene Systeme keine Stoffanbindung an die Umwelt aufweisen. Nachteilig ist der relativ hohe Exergieverlust über die Wärmeübertrager.

Die **Lade- und Entladeleistung** eines direkt oder indirekt beladenen Speichers hängt gemäss der Grundgleichung der Wärmeleistung neben der Temperaturspreizung hauptsächlich vom maximalen Massenstrom des Speichermediums ab:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T = \dot{V} \rho c_p \Delta T = w A \rho c_p \Delta T$$

Die maximale Strömungsgeschwindigkeit im Speicher hat somit einen direkten Einfluss auf den **Durchmesser** eines zylindrischen Speichers (Bild 2.33). Als Richtwert, um die Temperaturschichtung im Speicher zu erhalten, wird die nutzbare Lade- und Entladeleistung durch eine maximale Strömungsgeschwindigkeit im Speicher von 6 m/h (0.0017 m/s) bis 10 m/h (0.0028 m/s) begrenzt.

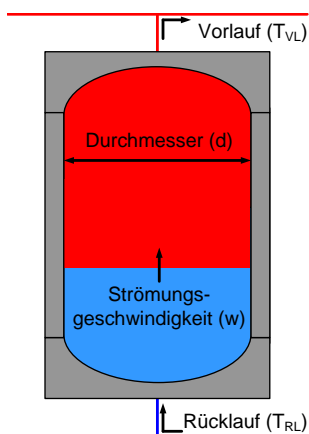


Bild 2.33 Darstellung von Strömungsgeschwindigkeit und Durchmesser eines direkt beladenen Energiespeichers mit idealer Temperaturschichtung (rot = hohe Temperatur, blau = tiefe Temperatur).

Je nach Dimensionierung und verfügbarem Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf können somit hohe Lade- und Entladeleistungen erreicht werden. Auf Basis der Grundgleichung der Wärmeleistung ergibt sich für den Durchmesser in einem Rohr bzw. einem zylindrischen Speicher folgender Zusammenhang mit $A = d^2 \pi/4$:

$$d = \sqrt{\frac{\dot{Q} \cdot 4}{w \Delta T \rho c_p \pi}} \approx 0.0176 \sqrt{\frac{\dot{Q}}{w \Delta T}}$$

- d = Durchmesser im Speicher in (m)
- \dot{Q} = Lade- oder Entladeleistung Speicher in (kW)
- w = Strömungsgeschwindigkeit im Speicher in (m/s);
0.0017 m/s (6 m/h) bis 0.0028 m/s (10 m/h)
- ρ = Dichte von Wasser in (kg/m³)
Vereinfachung bei Wasser von 60°C (983 kg/m³)
- c_p = Wärmekapazität von Wasser in (kJ/(kg K))
Vereinfachung bei Wasser von 60°C (4.183 kJ/(kg K))
- ΔT = Temperaturspreizung bzw. Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf in (K)

Berechnungsbeispiel: Für eine Lade- und Entnahmeleistung von 1'000 kW, einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit im Speicher von 0.0022 m/s (8.0 m/h) und einer Temperaturspreizung von 30 K folgt ein Durchmesser des Speichers von rund 2.2 m (Bild 2.34). Um diese Lade- und Entnahmeleistung für eine Stunde zur Verfügung zu stellen, muss ein zylindrischer Speicher mindestens 8 Meter hoch sein. Damit ergibt sich ein Volumen von rund 29 m³.

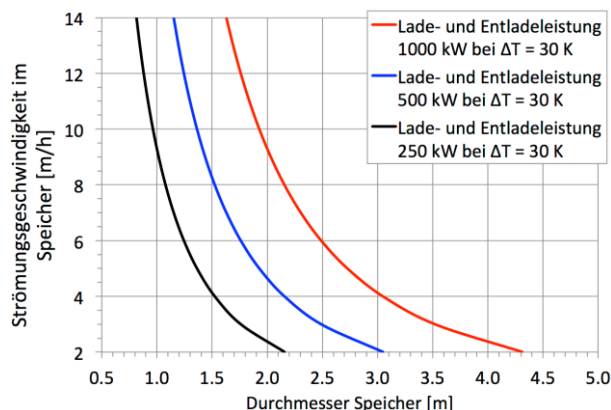


Bild 2.34 Vergleich der Durchmesser des Speichers in Funktion der Strömungsgeschwindigkeit im Speicher gemäss obiger Gleichung für eine Lade- und Entladeleistung von 250 kW, 500 kW und 1'000 kW bei einer Temperaturspreizung von 30 K.

Um Wärmespeicher optimal zu nutzen, ist ein Temperaturengleich zwischen heissen und kalten Zonen in Speichern notwendig. In Wasserspeichern ist dazu insbesondere die durch Dichteunterschiede auftretende **Temperaturschichtung** zu erhalten, wie sie in Bild 2.33 mit einer heissen Schicht in der oberen Zone und einer kalten Schicht am unteren Ende des Speichers dargestellt ist. Besonders entscheidend ist dazu die Gestaltung der **Einströmung** oder auch der **Ausströmung** eines Speichers. Der durch den einströmenden Massenstrom erzeugte Impuls bewirkt eine Verwirbelung im Speicher, welche die thermische Schichtung zerstören kann. Die Stärke der bei der Einströmung entstehenden Verwirbelung hängt dabei von der Art der Einströmung, der Ausbildung der thermischen Schichtung und dem Einströmimpuls ab.

Bevorzugte Bauformen der Ein- und Ausströmung sind gemäss Bild 2.35 z.B. Düsenrohre oder kreisförmige Prallplatten mit horizontalem Strömungsaustritt (auch Beladetasen genannt). Ungünstig erweisen sich hingegen direkt angeschlossene Rohrleitungen, Bogenrohre in der Nähe von Böden oder mit Prallblechen. Um bei ungünstigen Bauformen die Einströmung zu beruhigen, sind Einbauten wie Lochbleche und/oder trichterförmige Austritte (Diffusor) vorzusehen. Allgemein betrachtet sind Anschlüsse und Einbauten jeglicher Art genügend gross zu dimensionieren um die Einströmgeschwindigkeit und somit die Wirbelbildung gering zu halten. Als Praxiswert wird eine Einströmgeschwindigkeit von 0.1 m/s bis 0.2 m/s empfohlen.

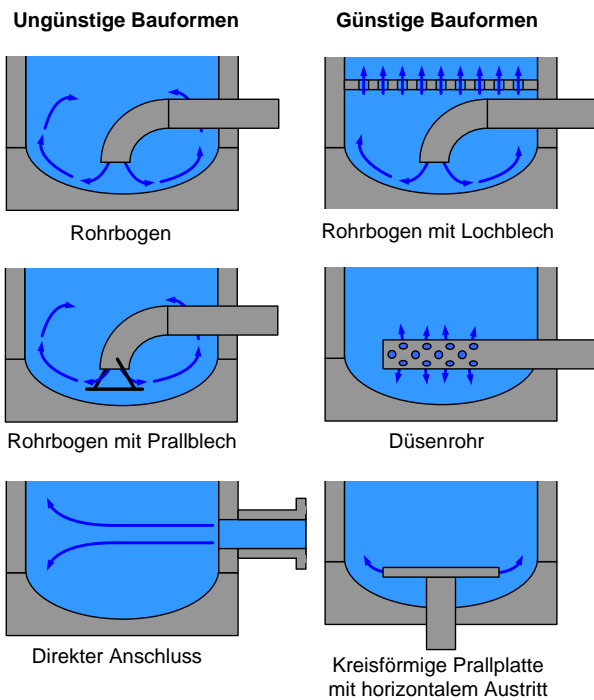


Bild 2.35 Gestaltung der Ein- und Ausströmung eines Speichers. Ungünstige Bauformen links, günstige Bauformen rechts.

Das **Höhen-Durchmesser-Verhältnis** ist eine weitere Kennzahl die sich durch die Dimensionierung und Auslegung des Speichers ergibt oder vom Lieferanten zu beachten ist. Es gibt bei der Betrachtung zwei gegenläufige Punkte zu beachten. Einerseits kann ein optimales Oberflächen-Volumen-Verhältnis mit minimalen Wärmeverlusten angestrebt werden. Auf der anderen Seite gibt es Richtwerte für die optimale Ausbildung einer Temperaturschichtung im Speicher z.B. zur Erfassung des Speicherladezustandes.

In Bild 2.36 ist die Auskühlung des Speichers für unterschiedliche Speichergrossen bzw. Oberflächen-Volumen-Verhältnisse dargestellt. Die Speicherdimensionierung wurde beispielhaft für einen Wärmeleistungsbedarf von 1'000 kW erstellt. Die Speichervolumen wurden für die Kompensation der benötigten Wärme für 1-, 12- und 24-Stunden bei einer Temperaturdifferenz von

30 K bestimmt. Die Speicher weisen dabei ein Volumen von 29 m³, 350 m³ und 700 m³ respektive ein Oberflächen-Volumen-Verhältnis von 1.8, 0.79 und 0.62 m²/m³ auf. Das Oberflächen-Volumen-Verhältnis basiert auf einem zylindrischen Wärmespeicher mit einem **Höhen-Durchmesser-Verhältnis** von 1. Dadurch ergibt sich ein optimales Oberflächen-Volumen-Verhältnis, das demjenigen einer Kugel am nächsten kommt.

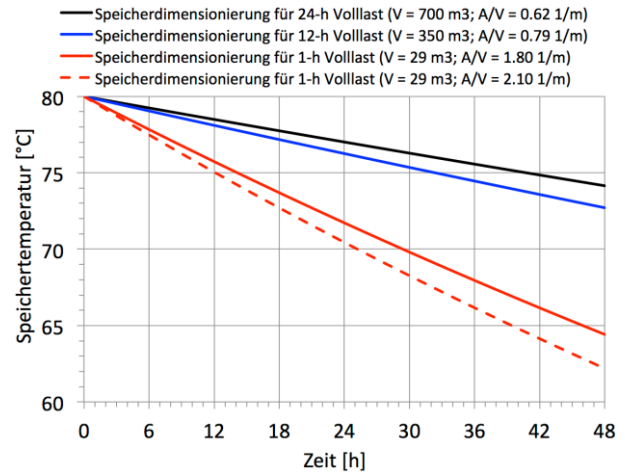


Bild 2.36 Auskühlung der Speichertemperatur in Funktion der Zeit. Speicherdimensionierung für einen Wärmeleistungsbedarf von 1'000 kW, Kompensation für 1-, 12- und 24-Stunden unter Vollast und einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 1. Die gestrichelte Linie entspricht einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 7.3. Start bei einer Speichertemperatur von 80°C und einer mittleren Umgebungstemperatur von 10°C. 1/m = m²/m³.

Weiter wird angenommen, dass der Speicher bei einer Temperatur von 80°C durchgeladen ist und die mittlere Umgebungstemperatur 10°C beträgt. Der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient der Speicherwand beträgt für alle drei Speicher 0.2 W/(m² K). Als Vergleich ist der Speicher aus Bild 2.32 mit einem Oberflächen-Volumen-Verhältnis von 2.10 m²/m³ und einem Volumen von 29 m³ zu sehen.

Es ist gut erkennbar, dass das Oberflächen-Volumen-Verhältnis bzw. das Höhen-Durchmesser-Verhältnis einen erheblichen Einfluss auf das Abkühlverhalten aufweist. Auf der anderen Seite wird für die optimale Ausbildung einer Temperaturschichtung ein **Höhen-Durchmesser-Verhältnis** von 5 bis 10 empfohlen. Beispielhaft zu sehen ist dies an der roten gestrichelten Linie in Bild 2.36. Dies entspricht den gleichen Attributen wie die rote ausgezogene Linie, jedoch mit einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 7.3 statt von 1. Mit einer dickeren Dämmschicht lassen sich bei grösseren Höhen-Durchmesser-Verhältnissen die höheren Wärmeverluste kompensieren. Dies ist in der Regel jedoch nur bei kleineren Speichern wirtschaftlich.

Je nach Anwendung, Platzbedarf und notwendigem Volumen des Speichers sind mehrere Speicher notwendig. Dabei ist zwischen **seriellem** und **parallelem Betrieb** zu unterscheiden. Ein **serieller** Betrieb der Speicher

wird nur empfohlen, wenn die maximale Strömungsgeschwindigkeit im Speicher von 6 m/h bis 10 m/h nicht überschritten wird (siehe Lade- und Entladeleistung). Ansonsten wird ein paralleler Betrieb empfohlen. Beim **parallelen** Betrieb muss auf das Prinzip des konstanten Druckabfalls geachtet werden (Tichelmann-Prinzip). Das Prinzip besteht darin, dass das durchfliessende Medium überall die gleiche Länge zurücklegen muss (gleiche Rohrdurchmesser, gleiche Länge). In Folge dessen entstehen über jedem Element die gleichen Druckverluste, so dass alle Teile gleichmässig durchströmt und warm werden oder aber gleichmässig befüllt bzw. entladen werden wie z.B. bei parallel geschalteten Speichern. Es ist auch möglich mehrere Speicher über Klappen entweder im seriellen oder im parallelen Betrieb zu bewirtschaften. Das kann zum Beispiel sinnvoll sein, wenn die effektive Lade- und Entladeleistung nicht abschliessend ermittelt werden kann. Dies ist jedoch aufwändiger und kostenintensiver.

Speichergrössen bis 4.5 m Durchmesser sind für den **Transport** auf Strassen geeignet. Grössere Wärmespeicher (Durchmesser) müssen vor Ort geschweisst oder betoniert werden und sind in der Regel auch nicht mehr druckfest. Bei einem Durchmesser von 4.5 m und einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 5 (Höhe 22.5 m) ergibt das ein Volumen von knapp 358 m³.

Die **Druckfestigkeit** des Speichers sollte nur so hoch angesetzt werden wie notwendig. Da ein Speicher in der Regel im Rücklauf eingebunden ist, kann sich der Speicher am tieferen Rücklaufdruck orientieren. Handelsübliche Speicher werden in der Regel für eine Druckfestigkeit von 6 bar bis 10 bar (selten 15 bar) angeboten. Darüber werden die notwendigen Wandstärken zu gross, um noch wirtschaftlich zu sein. Speicher bis 100°C werden drucklos mit Gaspolster ausgeführt (z.B. mit Stickstoff (N₂)). Speicher über 100°C (Druckspeicher) werden ohne Druckpolster ausgeführt.

Langzeitspeicher für Heiz- und Kühlanwendungen im Temperaturbereich von 0°C bis 100°C eignen sich die sogenannten Untergrund-Wärmespeicher:

- Aquiferspeicher
- Erdwärmesonden-Speicher
- Kavernenspeicher
- Kies/Wasser- oder Erdreich/Wasser-Speicher.

Aquifer- und Erdwärmesonden-Speicher besitzen den Nachteil, dass sie nicht wärmedämmend werden können. Daher besitzen sie grössere Wärmeverluste als gedämmte Heisswasser-Speicher und Kies/Wasser-Speicher. Zu beachten ist zudem, dass sie einige Jahre für einen eingeschwungenen Zustand benötigen, um wirtschaftlich arbeiten zu können. Daher ist am Anfang der Nutzungsgrad nicht sehr hoch. Dies hat seinen Grund darin, dass am Anfang das Speichervolumen und das umgebende Erdreich auf Betriebstemperatur erwärmt werden müssen. Im Bereich der Langzeit-Speicherung, wie zum Beispiel für die saisonale Speicherung solarer Wärme oder bei WKK-Anlagen zur Kraftwerks-Flexibilisierung, stehen zwei Themen im Vorder-

grund: innovative Dämmkonzepte, die sich vor allem durch Kostenreduktion auszeichnen müssen und geeignete Schichtladeeinheiten, die bei direkter Beladung das Wärmeträgerfluid in der passenden Temperaturschicht einspeichern.

2.10.5 Integration und Anwendung

In der Wärmeversorgung nehmen die thermischen Energiespeicher wichtige Aufgaben ein. Für die Anwendung thermischer Energiespeicher im Fernwärmebereich kommt einerseits die alleinige Anwendung im Wärmesektor und andererseits die sektorenübergreifende Anwendung im Strom- und Wärmesektor infrage.

2.10.5.1 Integration im Wärmesektor

Die Anwendung thermischer Energiespeichern im Wärmesektor und insbesondere im Fernwärmebereich kann sehr vielseitig sein. Das Augenmerk wird hier auf die Anwendung in einem Heizwerk gelegt, wo zentral an einem Standort Wärme erzeugt und anschliessend am Standort oder über ein Wärmeverteilnetz die Wärme verteilt wird. Hier besteht die Aufgabe des thermischen Energiespeichers hauptsächlich darin, Leistungsspitzen sowie Leistungssenkungen zu kompensieren, damit die Wärmeerzeugungsanlage genügend Zeit hat, um auf die ändernden Anforderungen zu reagieren. Dies ist insbesondere für Energieerzeuger mit grosser Trägheit wie zum Beispiel Holzfeuerungen notwendig. Automatische Holzfeuerungsanlagen erzielen je nach Brennstoffwassergehalt eine Leistungsänderung von ungefähr einem Prozent pro Minute. Dies bedeutet, dass die Holzfeuerung aus dem Regelbetrieb von etwa 30 % Leistung rund 70 Minuten benötigt bis die volle Wärmeleistung von 100 % abgegeben werden kann. Mit einem thermischen Energiespeicher kann das Betriebsverhalten des Holzkessels wesentlich verbessert werden, indem Lastspitzen und Lastabsenkungen durch den Wärmespeicher ausgeglichen werden, während der Holzkessel dem mittleren Wärmeleistungsbedarf nachfahren kann. Somit kann der Holzkessel kleiner dimensioniert werden, weist längere Laufzeiten auf, läuft effizienter und verursacht geringere Schadstoffemissionen. Gemäss QM Holzheizwerke [21] wird eine Speicherkapazität zur Kompensation der Nennwärmeleistung des Holzkessels für eine Stunde bei einer Temperaturspreizung von 30 K empfohlen. Bei Mehrkesselanlagen sollte die Speicherkapazität individuell den Anforderungen angepasst werden, im Minimum aber der Nennwärmeleistung des grösseren Holzkessels entsprechen. Beträgt die Temperaturspreizung über dem Speicher weniger als 30 K, sollte das Speichervolumen dementsprechend angepasst werden.

Dem Betrieb des Speichers sollte ebenfalls genügend Aufmerksamkeit geschenkt werden. Wichtig bei der Bewirtschaftung eines thermischen Energiespeichers ist, wie in Kapitel 0 beschrieben, dass die Temperaturschichtung im Speicher nicht gestört wird. Dies kann mit geeigneten Einbauten und grosszügig dimensionierten Ein- und Austrittsquerschnitten sowie einem hydraulischen Abgleich gewährleistet werden. Bei Wär-

meerzeugern mit einem trägen Betriebsverhalten, wie dem Beispiel der Holzkessel, ist auch auf die Erfassung des Speicherladezustandes und die daraus resultierende Leistungsvorgabe an die Holzkessel zu achten. Für diesen Fall gibt QM Holzheizwerke [22] Empfehlungen, die auch für andere Anlagen anwendbar sind.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von Speichern bietet die sogenannte thermische Vernetzung (Anergie-Netze oder LowEx-Anwendung) unterschiedlicher Wärmequellen und Wärmesenken auf relativ tiefem Temperaturniveau mit Erdwärmesonden- oder Erdkollektorfeld-Speichern zur saisonalen Speicherung und unter Einsatz von zentralen oder dezentralen Wärmepumpen. Weiter kommen zum Beispiel in Deutschland und Dänemark auch grosse saisonale Wärmespeicher in der Solarthermie zur Anwendung [36], [37], [38]. In diesem Fall ist die Hauptaufgabe des Energiespeichers, die Asynchronität von Wärmeanfall und Wärmebedarf zu kompensieren. Je nach Anwendung sind dies Speicher mit einer Speicherdauer von Tagen, einigen Wochen oder bis zu einem Jahr.

Neben dem konventionellen Speicherlademanagement wie z.B. konstanter Speicherladenzustand bei 60 %, kann auch das zukünftige Wetter Einfluss auf das Speicherlademanagement nehmen. Dies kommt insbesondere da zur Anwendung, wo die klimatischen Bedingungen einen erheblichen Einfluss auf den Wärmebedarf haben wie etwa bei Gewächshäusern. Mit der Berücksichtigung der Klimaprognose kann der klimatische Einfluss auf maximal 5 bis 7 Tage im Voraus bestimmt und in das Speicherlademanagement einbezogen werden. Wenn der Speicher genügend gross dimensioniert ist und eine Kapazität in der Grössenordnung von etwa 4 bis 8 Stunden der Nennleistung der Wärmeerzeugung bei gegebener Temperaturspreizung aufweist, kann die Wärmeerzeugung wesentlich kleiner dimensioniert und mit deutlich höherer Auslastung betrieben werden als ohne Speicher. Weitere Anwendungsgebiete für die Berücksichtigung der Klimaprognose sind z.B. die thermische Vernetzung unterschiedlicher Energiequellen, insbesondere der Solarthermie.

Der Einsatz thermischer Energiespeicher bietet damit je nach System teilweise ein erhebliches Potenzial zur Optimierung des Anlagenbetriebs in Bezug auf Kosten und Primärenergieverbrauch. Die wichtigsten Anwendungen im Wärmesektor sind:

- Wärmespeicher reduzieren Wärmebedarfsspitzen
- Wärmeerzeugungsanlage kann kleiner ausgelegt werden.
- Wärmespeicher haben einen positiven Einfluss auf das Betriebsverhalten der Wärmeerzeugungsanlage
- Wärmespeicher bilden eine Energiereserve für Störungen oder kurzzeitige Unterbrechungen
- Abwärme kann auch dann genutzt werden, wenn sie nicht zeitgleich zum Wärmebedarf anfällt
- dezentrale Wärmespeicher können an neuralgischen Stellen im Fernwärmenetz das Netz entlasten und in einem ausgelasteten Netz den Anschluss weiterer Abnehmer ermöglichen.

2.10.5.2 Integration in WKK-Anlagen

Für WKK-Anlagen werden ein wärmegeführter oder ein stromgeführter Betrieb unterschieden. In der Schweiz werden dezentrale WKK-Anlagen in der Regel wärmegeführt betrieben, da die elektrischen Wirkungsgrade gering sind und die Abgabe der Abwärme an die Umgebung durch die Anforderungen der kostendeckenden Einspeisevergütung wie in Bild 2.9 beschrieben eingeschränkt werden. Bei wärmegeführtem Betrieb folgt die WKK-Anlage der Wärmelast, während Strom als Nebenprodukt erzeugt wird. Dies ist allerdings mit dem Nachteil verbunden, dass Strom teilweise auch zu Zeiten erzeugt werden kann, wenn er im Netz nicht benötigt wird. Wärmegeführte WKK-Anlagen können damit den Speicherbedarf im Stromsektor erhöhen. Dies kann vermieden werden, indem die Produktion von Wärme und Strom in WKK-Anlagen durch Einsatz von Wärmespeichern und anderen Massnahmen teilweise entkoppelt wird. Mit einer solchen Flexibilisierung des WKK-Betriebs bietet sich ein Potenzial zur Optimierung des Anlagenbetriebs in Bezug auf Kosten und Primärenergieverbrauch. Zur Flexibilisierung kommen nebst der Wärmespeicherung weitere Komponenten wie Spitzenlastkessel und Wärmepumpen, einem Anlagenbetrieb mit Umgehung der Dampfturbine [39] oder dem Einsatz von dezentralen Stromspeichern. Eine Umgehung der Stromproduktion ist allerdings energetisch unerwünscht, während Stromspeicher deutlich teurer sind als Wärmespeicher. Wenn für die Stromerzeugung kein fixer Einspeisetarif vergütet wird, was ohne kostendeckende Einspeisevergütung zutrifft, wird deshalb der Einsatz von Wärmespeichern in WKK-Anlagen zunehmend interessant. WKK-Anlagen können damit mindestens teilweise zur bedarfsgerechten Produktion von teurer Regelenergie (Power-on-Demand) eingesetzt werden, während das Fernwärmenetz teilweise ab Wärmespeicher versorgt wird. Gleichzeitig bieten Wärmespeicher Einsparmöglichkeiten bei der Dimensionierung der Anlagenleistung.

3 Verbindung Wärmebereitstellung – Wärmeverteilung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen und Komponenten für die Einspeisung und Verteilung der Wärme vorgestellt, die vorwiegend in der Wärmzentrale vorzufinden sind.

Als Verbindung zwischen der Wärmebereitstellung und der Wärmeverteilung werden die Pumpeneinheit mit der zugehörigen Regeleinrichtung und die Expansions- und Druckhalteanlage betrachtet. Für gewisse Anforderungen kann es notwendig sein, dass eine Netztrennung oder eine Druckerhöhungsstation eingesetzt wird.

3.1 Netztemperaturen

Die Vor- und Rücklauftemperaturen des Netzes ergeben sich aufgrund der Anforderungen der Wärmeabnehmer an die Vorlauftemperaturen und der Forderung nach möglichst grosser Temperaturspreizung oder der Forderung nach einer möglichst tiefen Rücklauftemperaturen.

3.1.1 Vorlauftemperaturen

Die **Anforderungen der Wärmeabnehmer** sind sehr unterschiedlich (Tabelle 3.1) und die Vorlauftemperaturen des Fernwärmenetzes muss sich grundsätzlich nach dem Wärmeabnehmer mit der höchsten notwendigen Vorlauftemperaturen richten. Je nach Situation können die Wärmeabnehmer in verschiedenen Temperaturniveaus gruppiert werden (z.B. Hochtemperaturen bei Radiatoren und Niedertemperaturen bei Bodenheizungen). In diesem Fall kann eine Kaskadierung der Vorlauftemperaturen vorteilhaft sein, indem der Rücklauf eines Wärmeabnehmers mit hoher Temperaturen als Vorlauf für nachgeschaltete Wärmeabnehmer mit tieferen Vorlauftemperaturen dient.

Tabelle 3.1 Erforderliche primäre Vorlauftemperaturen für verschiedene Wärmeabnehmer.

Wärmeabnehmer	Vorlauf-temperaturen
Prozesswärme	
Krankenhaus mit Sterildampferzeugung 3 bar	≥ 160°C
Trocknungsprozess aus Lebensmitteltechnik	≥ 130°C
Industriebetrieb mit sek. Warmwassernetz 80/60	≥ 85°C
Bäder und Wellnessanlage (Hygieneschaltung)	≥ 70°C
Gewächshäuser mit Lufterwärmung	≥ 60°C
Gewächshäuser mit Bodenheizung	≥ 40°C
Raumwärme und Warmwasser	
Gebäude mit Radiatoren (mit oder ohne WW)	≥ 65°C
Gebäude mit Niedertemperaturheizungen (ohne WW)	≥ 40°C

Bei **geografisch ausgedehnten Netzen** hat die Temperaturspreizung einen starken Einfluss auf die Investitions- und die Betriebskosten. Bei Halbierung der

Temperaturspreizung wird der erforderliche Volumenstrom bei gleicher Leistung verdoppelt, sodass auch der Energieaufwand für die Pumpleistung entsprechend zunimmt. Vorab muss aber eine Auslegung auf einen um ungefähr Faktor 1,3 grösseren Rohrdurchmesser erfolgen, was die Investitionskosten erhöht. Als Folge davon nehmen auch die Wärmeverluste des Netzes zu, was die Wärmeeerzeugungskosten zusätzlich erhöht.

Aus diesen Rahmenbedingungen resultiert für die Wirtschaftlichkeit von Netzen auch die Forderung, dass die erforderliche Temperaturspreizung und somit die Vorlauftemperaturen mit zunehmender Länge des Netzes zunimmt. Höhere Vorlauftemperaturen führen aber auch zu höheren Wärmeverlusten.

Die **Randbedingungen der Wärmequelle** haben folgende Einflüsse auf die Vorlauftemperaturen:

- Die Vorlauftemperaturen ist durch die Temperaturen der verfügbaren Abwärme gegeben.
- Begrenzung der Vorlauftemperaturen bei einer Dampfenntnahme aus einem Prozess bei definiertem Dampfdruck. Eine hohe Entnahmetemperaturen kann somit nur mit einer Verminderung der Stromerzeugung gewährleistet werden.
- Eine Wärmeauskopplung an der Quelle besteht bereits auf einem definierten Temperaturniveau (z.B. Geothermie, Wärmepumpe, WKK-Anlage).

Die Wahl der **Vorlauftemperaturen** hat technisch einen Einfluss auf die Wahl der Druckstufe, die Dimensionierung der Rohrquerschnitte, die Förderleistung der Pumpe und die Wärmeverluste. Eine hohe Vorlauftemperaturen ermöglicht unter Umständen eine niedrigere Druckstufe oder andernfalls kleinere Leitungsquerschnitte und geringere Förderleistungen der Pumpen. Gleichzeitig steigen die Wärmeverluste und je nach Art des Wärmeeerzeugers steigt dessen Energieverbrauch. Dies gilt insbesondere für Wärme-Kraft-Kopplung und Wärmepumpen. Aus diesem Grund ist eine wirtschaftliche Optimierung von Vorlauftemperaturen und Rohrquerschnitt vorzunehmen.

3.1.2 Rücklauftemperaturen

Die Rücklauftemperaturen ergeben sich aus den Randbedingungen wie, Alter und Zustand der zu beheizen den Bausubstanz, Art der Warmwasseraufbereitung, Art der hydraulischen Einbindung bei den Wärmeabnehmern. Weiter bestehen Anforderungen an die Rücklauftemperaturen von Seite der Wärmequelle. In bestimmten Fällen setzt die Wärmenutzung tiefe Rücklauftemperaturen voraus. Dies gilt z.B. für Abgaskondensationsanlagen.

Aus der Tabelle 3.2 können Praxiswerte und Zielwerte für Rücklauftemperaturen entnommen werden.

Die maximalen Rücklauftemperaturen sollten im Wärmeliefervertrag bzw. in den Technischen Anschlussvorschriften TAV definiert werden (siehe Kapitel 5.3). Dabei wird eine differenzierte Forderung der maximalen Rücklauftemperaturen für den Heizfall und zur Brauchwarmwassererwärmung empfohlen.

Um möglichst tiefe Rücklauftemperaturen zu generieren, könnte ein von der Rücklauf-temperatur anhängiger Energiepreis den Anreiz dazu schaffen. Für bestehende und auch neue Fernwärmenetze sollte die Rücklauf-temperatur bzw. die Temperaturspreizung ausgewertet werden. Anhand dieser Auswertung sind Optimierungspotenziale und Fehlfunktionen in Übergabestationen schnell erkennbar. Eine einfache Methode ist in Kapitel 10, mit der Erfassung des Mehrverbrauchs detailliert beschrieben.

Tabelle 3.2 Richtwerte und Praxiswerte für Rücklauf-temperaturen.

Wärmeverbund	Rücklauf-temperatur
KVA > 10 MW	Praxiswert 55-65°C
Holzfeuerung mit Abgaskondensation	Praxiswert > 45°C
	Zielwert ≤ 45°C
Neubau-Quartier	Praxiswert > 38°C
	Zielwert ≤ 35°C

3.2 Netzfahrweise

Die Anpassung und der Verlauf der Vorlauf-temperatur sollten in den Technischen Anschlussvorschriften (TAV) des jeweiligen Wärmelieferanten festgehalten werden. Für den Verlauf der Netzvorlauf-temperatur sind grundsätzlich drei Fahrweisen gebräuchlich (Bild 3.1).

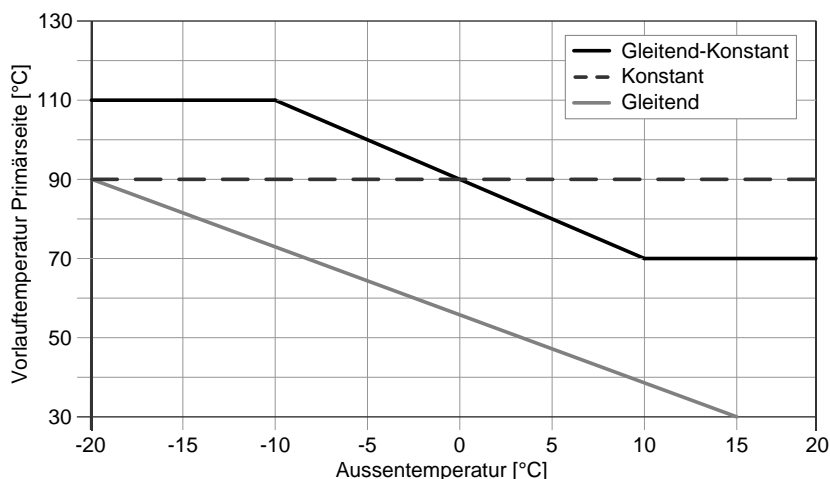


Bild 3.1 Vorlauf-temperatur ab Wärmezentrale in Funktion der Aussentemperatur für die drei unterschiedlichen Fahrweisen von Fernwärmenetzen (gleitend-konstant, konstant, gleitend).

3.2.1 Gleitende Fahrweise

Die Netzvorlauf-temperatur wird in Abhängigkeit der Aussentemperatur geregelt. Bei sinkender Aussentemperatur wird die Netzvorlauf-temperatur gleitend bis zum Maximalwert angehoben. Steigt die Aussentemperatur, so wird die Netzvorlauf-temperatur gleitend gesenkt, bis die Heizgrenze erreicht und die Wärmeversorgung eingestellt wird. Die gleitende Fahrweise ist nur zur Versorgung von Raumwärme geeignet. Für witterungsunabhängige Verbraucher wie Prozesswärme und Warmwasser ist gleitende Fahrweise ungeeignet.

3.2.2 Gleitend-Konstante Fahrweise

Die Netzvorlauf-temperatur wird innerhalb festgelegter Grenzwerte in Abhängigkeit von der Witterung geregelt. Bei fallender Aussentemperatur wird die Netzvorlauf-temperatur gleitend bis zum Maximalwert angehoben. Bei steigender Aussentemperatur wird sie gleitend bis zum Minimalwert abgesenkt. Der Minimalwert wird durch die mindestens vorzuhaltende Netzvorlauf-temperatur (z.B. Warmwassererwärmung) bestimmt. Die gleitend-

konstante Fahrweise ist die gebräuchlichste Fahrweise und sie erlaubt die gleichzeitige Versorgung für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme. Durch eine Nachregelung auf die für den Verbraucher notwendige sekundärseitige Vorlauf-temperatur in der Hausstation ist eine vom Wärmelieferanten unabhängige Betriebsweise hinsichtlich Vorlauf-temperatur und Heizzeit möglich.

Als Führungsgrösse für die Netzvorlauf-temperatur wird nur selten die aktuell gemessene Aussentemperatur verwendet. Je nach Grösse des Netzes kann es zweckmässig sein, die über eine längere Zeit gemittelte Aussentemperatur, allenfalls unter Einbeziehung von Aussentemperaturvoraussagen, zugrunde zu legen.

3.2.3 Konstante Fahrweise

Die Netzvorlauf-temperatur wird unabhängig von der Aussentemperatur konstant gefahren. Prinzipiell können alle gebräuchlichen Wärmeabnehmer angeschlossen werden, wenn die angebotene konstante Vorlauf-temperatur für den Verwendungszweck ausreicht. Eine Vorlauf-temperaturregelung entsprechend den Anforderungen des jeweiligen Wärmeabnehmers ist in der Haussta-

tion vorzusehen. Aufgrund der konstanten Fahrweise ist es möglich, die vorzuhaltende Wärmeleistung auch bei höheren Aussentemperaturen anzubieten, was insbesondere bei Prozesswärme und Warmwassererwärmung von Bedeutung ist. Diese Fahrweise führt allerdings in der Übergangszeit und im Sommerbetrieb zu erhöhten Wärmeverteilverlusten.

3.3 Pumpen

Für den Wasserumlauf in Fernwärmenetzen werden Umwälzpumpen verwendet, die von einem Elektromotor angetrieben werden. Diese werden entweder bei konstanter Drehzahl betrieben oder sie sind – was heute vorgeschrieben ist – stufenlos regelbar. Bild 3.2 zeigt einen typologischen Überblick der Bauarten und Einsatzgebiete der verschiedenen Pumpentypen in Abhängigkeit der Förderhöhe und des Volumenstroms. Nebst der Unterscheidung zwischen axialer und radialer Bauform wird dabei auch zwischen Trockenläufer- und Nassläuferpumpen unterschieden.

3.3.1 Bauarten

Für grössere Fernwärmenetze kommen **Trockenläuferpumpen** zum Einsatz. Diese sind über Welle und Kupplung mit einem Norm-Motor verbunden, wobei zwischen den Bauarten *Sockelpumpe* (Motor und Pumpe auf einem Sockel montiert) und *Inline-Pumpe* (Motor an eine Rohreinbaupumpe montiert) unterschieden wird. Die Tabelle 3.3 zeigt die typischen Förderhöhen und Volumenströme der Pumpentypen, wobei die Werte für eine Einzelpumpe gelten. Je nach Konfiguration in Serie- oder Parallelschaltung sind höhere Werte erreichbar, wie aus Bild 3.2 hervorgeht. In der Gebäudetechnik und auch in kleinen Fernwärmenetzen kommen auch **Nassläuferpumpen** zum Einsatz, bei denen die Rohreinbaupumpe mit dem sogenannten Spaltrohrmotor eine Einheit bilden. Das geförderte Medium schmiert dabei die Lager und kühlt gleichzeitig den Motor.

Tabelle 3.3 Typische Förderhöhen und Volumenströme der verschiedenen Pumpentypen.

Pumpentyp	Förderhöhe m	Volumenstrom m³/h
Trockenläufer		
Sockelpumpe	> 200	> 1000
Inline-Pumpe	> 80	> 600
Nassläufer		
	< 19	> 76

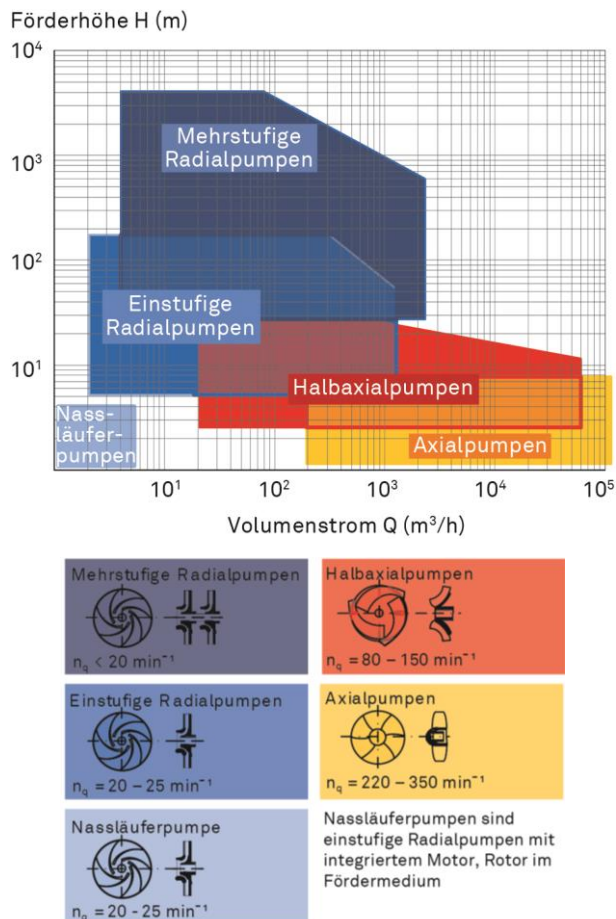


Bild 3.2 Typologie von Pumpen unterteilt nach Förderhöhe und Volumenstrom. Die Drehzahl n_q charakterisiert die Pumpenbauform [74].

3.3.2 Energieeffizienz

Für die in **Trockenläuferpumpen** eingesetzten Elektromotoren gilt die EU-Verordnung (EG) 640/2009 [73]. Dabei sind neue Effizienzklassen [113] definiert worden, in der die bisher beste Kategorie EFF1 durch die Effizienzklassen IE2 und IE3 in drei Stufen gemäss Tabelle 3.4 abgelöst wird. Die Anpassung der Effizienzklassen erfolgt in drei Stufen:

- Stufe 1 Ab dem 16. Juni 2011 müssen mit Ausnahme weniger Bauarten und Einsatzbereiche von allen neu verkauften Elektromotoren die Anforderungen der Klasse IE2 eingehalten werden. Pumpenmotoren der Effizienzklasse EFF2 dürfen seit diesem Zeitpunkt nicht mehr auf den Markt gebracht werden.
- Stufe 2 Ab dem 1. Januar 2015 gilt die noch strengere Effizienzklasse IE3, zunächst für Motoren mit einer Nennausgangsleistung zwischen 7,5 kW bis 375 kW. Alternativ müssen solche Motoren den IE2-Anforderungen genügen und mit einer Drehzahlregelung ausgestattet sein.
- Stufe 3 Ab dem 1. Januar 2017 gelten die Anforderungen von Stufe 2 auch für Motoren ab 0,75 kW.

Tabelle 3.4 Energieeffizienzklassen bei Trockenläuferpumpen.

Stichtag	Elektrische Motoren 0.75 kW bis < 7.5 kW	Elektrische Motoren 7.5 kW bis 375 kW
1. Juni 2011	IE2 oder besser	IE2 oder besser
1. Januar 2015	IE2 oder besser	IE4 IE3 oder IE2 mit Drehzahlregelung (FU)
1. Januar 2017	IE4 IE3 oder IE2 mit Drehzahlregelung (FU)	IE4 IE3 oder IE2 mit Drehzahlregelung (FU)

Nassläuferpumpen kamen bisher fast ausschliesslich unregelt zum Einsatz und haben einen sehr hohen Energieverbrauch. Grundlage für den Einsatz künftiger Nassläuferpumpen ist der Energie-Effizienz-Index (EEI) nach einer in der Verordnung (EG) 641/2009 [72] definierten Berechnungsmethode. Dabei erfolgt ein Vergleich der Leistungsaufnahme innerhalb eines Lastprofils mit einer Referenzpumpe. Die Umsetzung der neuen Richtlinie ist in drei Stufen nach Tabelle 3.5 vorgesehen. Ausgenommen davon sind Trinkwasserzirkulationspumpen.

Tabelle 3.5 EEI-Grenzwerte bei Nassläuferpumpen

Stichtag	Externe Pumpen für Heizung und Kühlung	Pumpen integriert in Produkte	Ersatz von integrierter Pumpen*
1. Januar 2013	0.27	keine Anforderungen	keine Anforderungen
1. August 2015	0.23	0.23	keine Anforderungen
1. Januar 2020	0.23	0.23	0.23

* gilt für Pumpen die vor 1. August 2015 in Verkehr gebracht wurden

3.3.3 Pumpenregelung

Grundsätzlich wird zwischen unregelt und geregelten Umwälzpumpen unterschieden. Unregelt Pumpen weisen zwar bei Teillastbetrieb oft einen höheren Wirkungsgrad auf als geregelte, sie eignen sich aber nur, wenn der Durchfluss um weniger als einen Faktor 2 variiert wie etwa als Heizungsumwälzpumpe mit Leistungen von maximal 400 W [69].

In Fernwärmenetzen kommen dagegen praktisch ausschliesslich Pumpen mit **Drehzahlregelung** zur Anwendung. Bei der Auslegung ist darauf zu achten, dass die Pumpen im Praxisbetrieb einen hohen Wirkungsgrad aufweisen. Für geregelte Umwälzpumpen sollte der Auslegungsbetriebspunkt dazu im hinteren Drittel der Pumpenkennlinie liegen, um einen grossen Regelbereich zu ermöglichen und, wie aus Bild 3.3 erkennbar, gleichzeitig bei der im Praxisbetrieb wichtigen Teillast einen hohen Wirkungsgrad sicher zu stellen. Daneben ist grundsätzlich auf die effizienteste Energieklasse der Motoren zu achten.

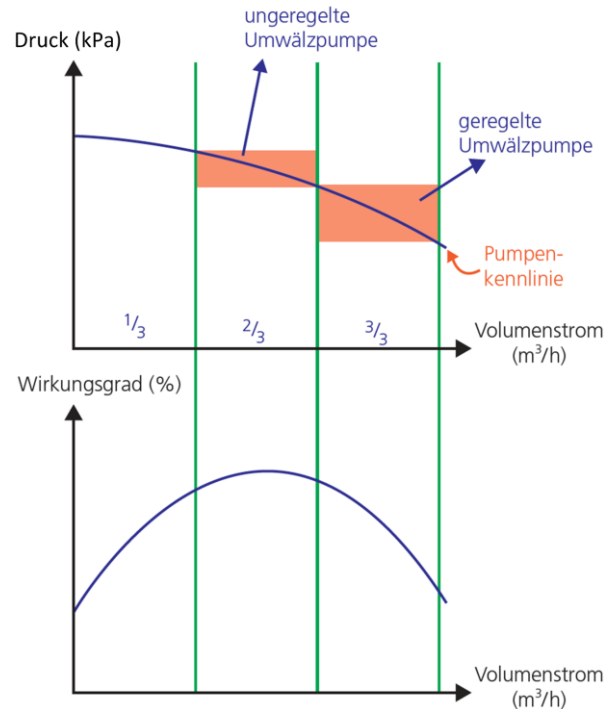


Bild 3.3 Empfohlene Bereiche zur Auslegung von unregelt und geregelten Pumpen [69]. Die Unterteilung erfolgt in einem vorderen, mittleren und hinteren Bereich (Grüne Linien).

Unregelt Umwälzpumpen (Bild 3.4 oben)

Bei unregelt Umwälzpumpen befindet sich der Betriebspunkt immer auf der Pumpenkennlinie. Das heisst, der Volumenstrom und die Förderhöhe verändern sich nicht. Unregelt Umwälzpumpen werden eingesetzt, wenn die hydraulischen Parameter während eines Ladevorgangs konstant bleiben, also zum Beispiel bei Warmwasserladung oder einer Hauptpumpe bei differenzdruckloser Verteilung.

Geregelte Umwälzpumpen (Bild 3.4 Mitte und unten)

Geregelte Umwälzpumpen passen die Förderhöhe bei ändernden Lastzuständen im hydraulischen Kreis laufend an. Die Pumpendrehzahl wird dabei stufenlos mittels eines Frequenzumrichters geregelt. Die Drehzahl der Pumpe wird den geforderten Bedingungen der Anlage angepasst und stellt sich für jeden Teillastbetriebspunkt wieder neu ein und passt so die elektrische Leistungsaufnahme an, wodurch die Effizienz der Umwälzpumpe deutlich erhöht wird. Dafür ist eine volumenstromabhängige Differenzdruckregelung notwendig, mit welcher der Bedarf umso effizienter gedeckt werden kann, je näher die Differenzdruckmessung bei den massgebenden Verbrauchern und damit oft bei den weitest entfernten Wärmeabnehmern ist.

Bei der Differenzdruckregelung über der Pumpe wird grundsätzlich zwischen folgenden verschiedenen Betriebsarten unterschieden:

- Regelung mit **konstantem Betriebsdruck** oder auch **Konstantdruckregelung** (Bild 3.4 Mitte): Dabei wird der Differenzdruck über der Pumpe bei sich änderndem Volumenstrom konstant gehalten. Der Betriebspunkt folgt im Teillastbereich der konstant gehaltenen

nen Pumpenregelkennlinie horizontal nach links. Diese Betriebsart kommt in der Regel bei kleineren Heizungsanlagen zum Einsatz.

- Regelung mit **proportionalem Betriebsdruck** oder auch **Proportionaldruckregelung** (Bild 3.4 unten): Bei dieser Regelungsart sinkt der Differenzdruck über der Pumpe mit abnehmendem Volumenstrom und steigt mit zunehmendem Volumenstrom an. Der Betriebspunkt folgt im Teillastbereich der proportionalen Pumpenregelkennlinie abfallend nach links. In der Regel sind Pumpen mit Proportionaldruckregelung effizienter als Pumpen mit Konstantdruckregelung.

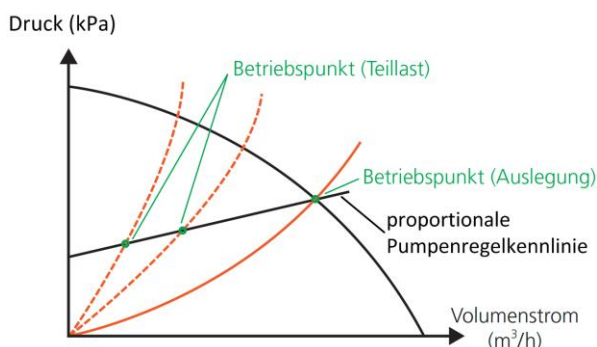
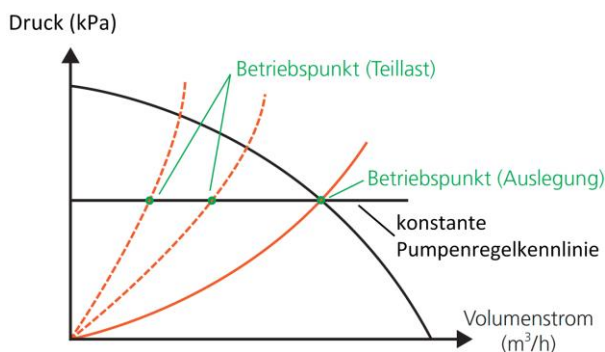
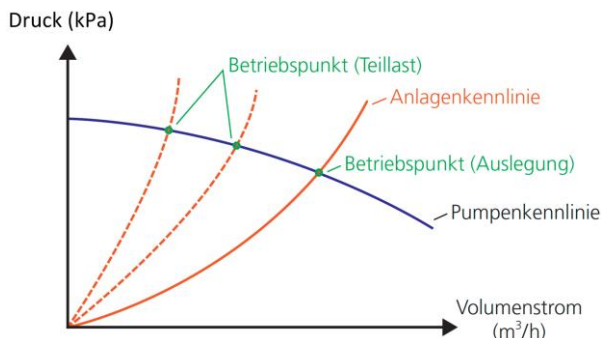


Bild 3.4 Pumpendiagramm mit Darstellung des Betriebs mit unterschiedlicher Regelung [69].
 Oben: unregelte Pumpe
 Mitte: Konstantdruckregelung
 Unten: Proportionaldruckregelung.

3.4 Pumpenschaltung

In Fernwärmenetzen werden grundsätzlich mehrere Netzpumpen in einer Pumpeneinheit eingesetzt, sofern folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Parallelschaltung zweier Pumpen, wenn jeweils nur eine Pumpe in Betrieb ist. Die zweite Pumpe wird als Reserve-Pumpe (Redundanz) gebraucht.
- Parallelschaltung mehrerer Pumpen, wenn mehrere Pumpen zur Erreichung des geforderten Volumenstromes günstiger sind (Wirkungsgrad, Kosten).
- Serienschaltung mehrerer Pumpen, wenn mehrere Pumpen zur Erreichung der geforderten Förderhöhe günstiger sind (Wirkungsgrad, Kosten).

Die Betriebssicherheit (Redundanz) kann mit einer oder mehrerer parallel angeordneten Reservepumpen gewährleistet werden, (siehe Kapitel 3.4.3).

3.4.1 Parallelschaltung

Die Parallelschaltung von Fernleitungspumpen ist in Wärmenetzen mit hohem Volumenstrom und verhältnismässig geringer Förderhöhe (flache Netzkennlinie) vorteilhaft. Die parallel angeordneten Pumpen (inklusive einer Reservepumpe) sollten dabei den gleichen Pumpentyp aufweisen. Sie können lastabhängig mit einer Differenzdruckregelung anhand einer Druckdifferenzmessung im Netz wie folgt betrieben werden:

- Kleine Last: Drehzahlgesteuerter Betrieb einer einzelnen Pumpe (Regelbereich A in Bild 3.5)
- Grössere Last: Ansteuerung beider in Betrieb stehender Pumpen mit synchroner Drehzahl (Regelbereich B in Bild 3.5).

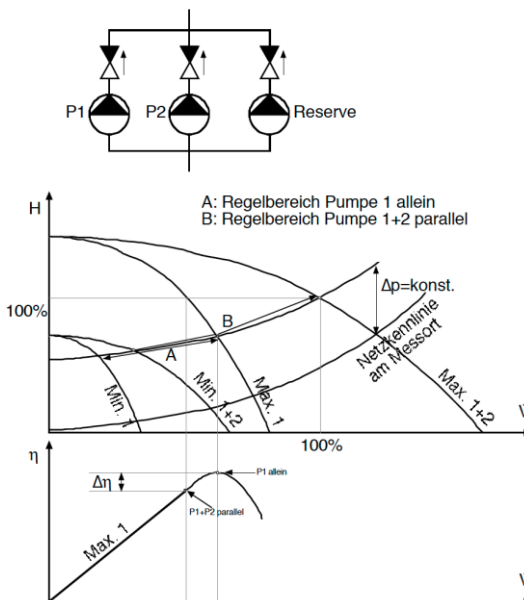


Bild 3.5 Parallelschaltung von zwei Pumpen und einer Reservepumpe [21]. $\Delta p = \text{konstant}$ entspricht dem Druckverlust über die Übergabestation beim massgebenden Wärmeabnehmer (i.d.R. entferntester Wärmeabnehmer).

Ein gemischter Betrieb (eine Pumpe drehzahlgesteuert, die zweite Pumpe auf Maximaldrehzahl) ist bei Parallelschaltung nicht zulässig.

3.4.2 Serienschaltung

Die Serienschaltung (Reihenschaltung) von Fernleitungspumpen ist in Wärmenetzen mit grosser Förderhöhe und verhältnismässig geringem Volumenstrom (steile Netzkennlinie) vorteilhaft.

Zum Beispiel ist auch eine Druckerhöhungspumpe im Netz mit der Hauptpumpe in Serie geschaltet.

Bei einer Serienschaltung der Pumpen als Einheit nach Bild 3.6 wird parallel zu jeder Pumpe ein Bypass mit automatischer Absperrklappe angeordnet. Eine Reservepumpe wird dabei so angeordnet, dass sie die Funktion jeder einzelnen Pumpe übernehmen kann und die in Serie geschalteten Pumpen gegenseitig umschaltbar sind. Alle Pumpen sollten den gleichen Pumpentyp aufweisen.

Die Differenzdruckregelung mit einer Druckdifferenzmessung im Netz kann lastabhängig wie folgt erfolgen:

- Kleine Last: Eine drehzahlgesteuerte Pumpe allein (Regelbereich A in Bild 3.6)
- Grössere Last: Gemeinsame Ansteuerung beider in Betrieb stehender Pumpen mit synchroner Drehzahl (Regelbereich B in Bild 3.6)
- Grössere Last (als Alternative): Drehzahlsteuerung einer Pumpe, die zweite Pumpe wird mit Maximaldrehzahl betrieben.

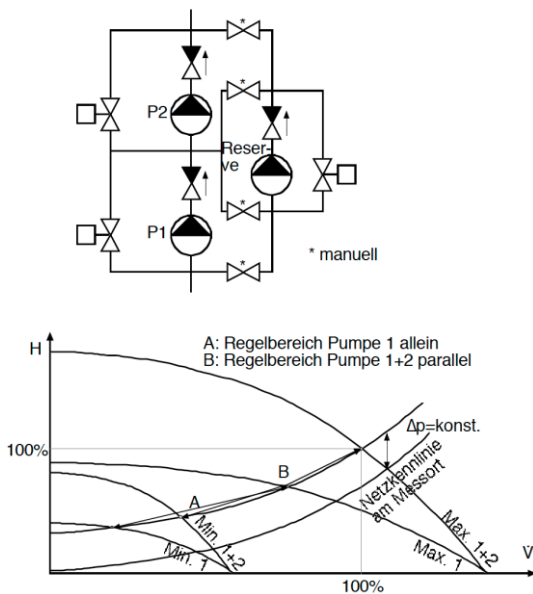


Bild 3.6 Serienschaltung von zwei Pumpen und einer Reservepumpe [21]. $\Delta p = \text{konstant}$ entspricht dem Druckverlust über die Übergabestation beim massgebenden Wärmeabnehmer (i.d.R. entferntester Wärmeabnehmer).

3.4.3 Redundanz

Die Pumpen sind für den Betrieb einer Fernwärmanlage von zentraler Bedeutung. Daher wird eine Redundanz der Netzpumpen empfohlen. Bei Ausfall einer Pumpe kann das Netz vollumfänglich weiter betrieben werden. Als Redundanzstellungen sind gebräuchlich:

- 2 x 100 % der Nominalleistung
- 3 x 50 % der Nominalleistung
- 4 x 33 % der Nominalleistung.

Die Anordnung 3 x 50 % oder 2 x 100 % usw. ist Gegenstand einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Gerade bei grossen Netzen bietet sich 3 x 50 % bzw. 4 x 33 % an, da bei grossen Pumpen die Investitionskosten überproportional ansteigen und da Bedienung und Wartung für kleinere Pumpeneinheiten einfacher sind. Hinzu kommt, dass bei in Entwicklung befindlichen Netzen in den ersten Betriebsjahren oft nur ein Bruchteil der Pumpleistung des Vollausbaus benötigt wird. Somit kann für die ersten Jahre oft eine Pumpengruppe mit 2 x 33 % Pumpleistung installiert werden. Damit können die Anfangsinvestitionen reduziert und die Pumpen effizienter betrieben und später weitere Pumpen bei Bedarf installiert werden.

Für kleine Netze kann aus Kostengründen auch eine Redundanzstellung 2 x 80 % verwendet werden, so dass bei Ausfall einer Pumpe nur 80 % der Pumpleistung zur Verfügung steht.

3.5 Netzregelung

In einem Fernwärmenetz benötigen die indirekt angeschlossenen Wärmeabnehmer einen Differenzdruck über die Wärmeübergabestation. Dieser **minimale Differenzdruck** beträgt in der Regel zwischen 0.4 und 1 bar. Das Netz wird so geregelt, dass an jeder Wärmeübergabestation der minimal erforderliche Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf vorhanden ist.

An einer Stelle im Netz befindet sich der geringste Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf. Diese Stelle wird **Netzschlechtpunkt** oder kurz **Schlechtpunkt** genannt. Dieser kann in Funktion des momentanen Wärmebedarfs im Netz wandern. Im Bereich des Netzschlechtpunktes treten am ehesten Versorgungsengpässe auf.

Der Differenzdruck wird von den Netzpumpen aufgebracht. Für die Regelung der Netzpumpen bieten sich verschiedene Konzepte an:

- Drehzahlregelung der Fernwärmepumpen mit einer Differenzdruckmessung über die Pumpen und Regelung anhand einer konstanten oder proportionalen Pumpenregelkennlinie.
- An einer oder mehreren Referenzmessstellen kann im Netz eine Differenzdruckmessung installiert werden, die auf die Drehzahlregelung der Fernwärmepumpen in der Zentrale wirken. Referenzmessstellen sind von der Zentrale entfernt liegende Stellen im Netz (Netzschlechtpunkt/e oder kurz Schlechtpunkte).
- Als Alternative oder als Führungsgrösse für einen Führungsregler kann bei ausgewählten Übergabestationen auch die Ventilstellung des Primärventils (z.B. Kombiventil) erfasst werden (mit einem Leitsystem können z.B. die Ventilstellungen aller Primärventile erfasst und ausgewertet werden). Anhand der Auswertung der Ventilstellung erfolgt dann die Regelung der Netzpumpe auf den erforderlichen Differenzdruck. Wichtig ist, dass der erforderliche minimale Wirkdruck (Ventil), in jedem Betriebszustand, gewährleistet ist.

Bei sternförmig **verzweigten Verteilnetzen** bietet sich eine pro Netzweig separate Druckregelung an. Für jeden Netzweig wird eine individuelle Druckregelung realisiert. Dadurch wird vermieden, dass einzelne Netzweige mit zu grossen Differenzdrücken und erhöhtem Strombedarf der Pumpen betrieben werden. Es muss jedoch für jeden Zweig eine eigene Pumpengruppe installiert werden.

Bei Netzanordnungen mit **mehreren Einspeisepunkten** muss regelungstechnisch ein Einspeisepunkt für die Druckregelung als Master deklariert werden. Der zweite und jeder weitere Einspeisepunkt fördert nach einem Kennfeld bzw. nach Vorgabe eine bestimmte Wärmeleistung in das Netz. Der Algorithmus der Einspeisung von mehreren Punkten in das Netz muss zudem berücksichtigen, dass zwischen den Einspeisepunkten keine Unterversorgungen durch Strömungsstillstand auftreten.

3.5.1 Regelkonzept

Der Netzbetrieb erfolgt, wie in Kapitel 3.2 gezeigt, in der Regel witterungsgeführt und zeitprogrammgesteuert. Die Realisierung der Vorregelung kann dabei folgendermassen erfolgen:

- übergeordnetes MSR-System
- SPS der Feuerung
- separaten Einzelregler

Werden mehrere Pumpen eingesetzt, gilt es beim regelungstechnisch anspruchsvollen Zu- und Wegschalten der einzelnen Pumpen folgendes zu beachten:

- Minimierung der Druckschwankungen im Netz im Umschaltzeitpunkt durch möglichst verzögerungsfreie Anpassung der geforderten Drehzahl. Die nachfolgenden Punkte stehen teilweise im Widerspruch zu dieser Forderung.
- Verhinderung von Pumpenüberlastungen im Umschaltzeitpunkt: Wenn Pumpe 1 eine gewisse Zeit auf Maximaldrehzahl betrieben wird, diese zuerst auf die erforderliche Drehzahl für den Einsatz mit Pumpe 2 runterfahren und erst dann die Pumpe 2 auf die geforderte Drehzahl hochfahren.
- Unter allen Umständen muss ein Betrieb im hinteren Drittel der Pumpenkennlinie verhindert werden, weil dies zur Beschädigung der Pumpe infolge elektrischer Überlastung führen kann.
- Verhinderung von zu häufigem Zu- und Wegschalten der Pumpen durch geeignete Umschaltkriterien und entsprechende Zeitverzögerungen.

Dieses Zu- und Wegschalten bewirkt, dass sich die Betriebspunkte der einzelnen Pumpen und damit auch deren Wirkungsgrade ändern. Damit stellt sich die Frage, wie die Pumpen am effizientesten betrieben werden können. Eine eindeutige Antwort gibt es nicht, allgemein gilt jedoch:

- Das Wirkungsgrad-Optimum liegt in der Regel im mittleren Drittel der Kennlinie für die höchste Drehzahlstufe. Wenn der Arbeitspunkt in diesen Bereich gelegt wird, bedeutet dies für drehzahlgesteuerte Pumpen:
 - Solange sich die Regelbereiche A «Pumpe 1 allein» und B «Pumpe 1 + 2» überschneiden, ist «Pumpe 1 allein» besser (Bild 3.5 und Bild 3.6).
 - Bei Serienschaltung ist von Fall zu Fall abzuklären, ob es sich lohnt, die Differenzdruckregelung für eine Pumpe allein auszulegen und die zweite Pumpe mit Maximaldrehzahl zu betreiben.
- Das Wirkungsgrad-Optimum ist für den Betriebsfall mit der höchsten Betriebsstundenzahl zu wählen. Wenn bei der Parallelschaltung «Pumpe P1 allein» auf das Wirkungsgrad-Optimum bei der Maximaldrehzahl ausgelegt wird, ergibt der gemeinsame Betrieb «P1 + P2 parallel» auf Maximaldrehzahl eine Wirkungsgradeinbusse.
- Um den Verschleiss baugleicher Pumpen ausgeglichen zu verteilen, sollten die Betriebszeiten durch das Umschalten der Prioritäten gleichmässig verteilt werden.

3.5.2 Messort der Differenzdruckregelung

Der Messort oder die Messorte der Differenzdruckregelung sind so zu wählen, dass die Druckdifferenzschwankung im Netz nur so gross ist, dass in jedem Betriebspunkt ein einwandfreier Betrieb ohne Über- und Unterversorgung gewährleistet ist. Je nach Wahl des Messortes können Störungen unterschiedlich kompensiert werden:

- Bei der **Druckdifferenzmessung im Fernwärmenetz** wird die Druckdifferenz parallel zur Netzkennlinie am Messort konstant gehalten (Bild 3.7). Damit ergibt sich bezüglich der Fernleitungspumpe eine nach hinten geneigte Pumpenregelkennlinie. Sobald der Durchfluss im Netz sinkt, wird die Förderhöhe der Pumpe in ähnlichem Mass reduziert, wie der Druckabfall im Netz abnimmt und somit der Betriebspunkt der Pumpe der Anlagenkennlinie folgt. Vergleichbar ist das Verhalten mit einer proportionalen Pumpenregelkennlinie wie in Bild 3.4 unten.
- Bei der Konstantdruck- oder Proportionaldruckregelung erfolgt die **Druckdifferenzmessung** zwangsläufig **über die Pumpe**. Dies ergibt eine horizontale respektive eine nach hinten abfallende Pumpenregelkennlinie. Es werden also nur Störungen kompensiert, die durch die Steilheit der Pumpenkennlinie verursacht werden.
- Bei der **Druckdifferenzmessung im Vorlauf und Rücklauf** bei der Fernleitungspumpe in der Wärmehauptzentrale werden auch Störungen kompensiert, die durch das hydraulische Netz vor dem Messort (Druckabfall über Armaturen, Wärmezähler etc.) verursacht werden.

Fazit:

Die Drehzahlregelung der Pumpen über einen konstanten Differenzdruck im Wärmenetz (Schlechtpunkt) ist die effizientere aber aufwändigere Lösung als über den Pumpen mit einer Konstantdruck- oder Proportionaldruckregelung.

Bei einer Veränderung der Abnehmerstruktur (Verdichtung oder Stilllegung) oder auch im Teillastfall kann der Netzslechtpunkt bzw. der massgebende Wärmeabnehmer ‚wandern‘. Insbesondere bei einer Veränderung der Abnehmerstruktur muss geprüft werden, ob die Pumpenregelkennlinie der neuen Situation angepasst werden muss.

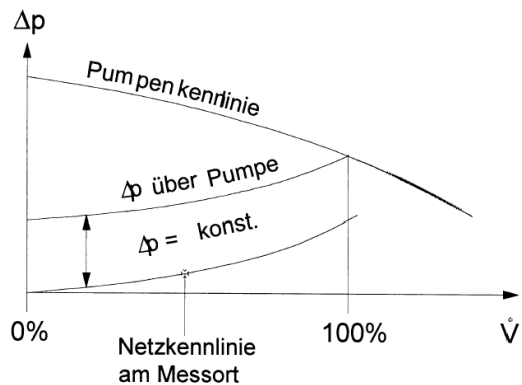


Bild 3.7 Beispiel einer Druckdifferenzmessung in einem Wärmenetz [21].
 $\Delta p = \text{konstant}$ entspricht dem Druckverlust über die Übergabestation beim massgebenden Wärmeabnehmer (i.d.R. entferntester Wärmeabnehmer).

3.5.3 Wärmenetze mit stark variablem Durchfluss und hoher Vorlauf-temperatur

Der Durchfluss in grossen Fernwärmenetzen mit mehreren Fernleitungspumpen ist oft sehr stark variabel, während die Vorlauf-temperatur nur mit vergleichsweise kleinen Änderungen in Abhängigkeit der Aussentemperatur verändert werden kann (siehe Bild 3.8). In diesem Fall ist es vorteilhaft, wenn die beiden Dreiwegeventile zu- und wegschaltbar sind. Beim Zu- und Wegschalten eines Dreiwegeventils ergibt sich ein Durchfluss-Sprung, der durch eine Sequenz-Regelung entschärft werden kann. Die beiden parallel geschalteten Dreiwegeventile werden über den Sequenz-Regler mit zwei Ausgängen zwischen 0 % und 100 % angesteuert. Die Sequenz und die Zu- und Wegschaltung der beiden Dreiwegeventile erfolgt nach den nachstehenden Punkten:

- Regelung des kleineren Dreiwegeventils über Reglerausgang 1.
- Zuschaltung des grösseren Dreiwegeventils und Wegschalten des kleineren Dreiwegeventils, wenn Durchfluss Fernleitung (Signal Durchfluss-Messung Wärmezähler Fernleitung) > Durchfluss bei maximal vorgegebenen Druckabfall über kleineres Dreiwegeventil.
- Regelung des grösseren Dreiwegeventils über Reglerausgang 2.
- Zuschaltung des kleineren Dreiwegeventils, wenn Durchfluss Fernleitung (Signal Durchfluss-Messung Wärmezähler Fernleitung) > Durchfluss bei maximal vorgegebenem Druckabfall über grösseres Dreiwegeventil.
- Regelung beider Dreiwegeventile gemeinsam über Reglerausgang 2.
- Wegschaltung des kleineren Dreiwegeventils, wenn Durchfluss Fernleitung (Signal Durchfluss-Messung Wärmezähler Fernleitung) < Durchfluss bei minimal vorgegebenen Druckabfall über beide Dreiwegeventile.
- Regelung des grösseren Dreiwegeventils über Reglerausgang 2.
- Wegschaltung des grösseren Dreiwegeventils und Zuschalten des kleineren Dreiwegeventils, wenn Durchfluss Fernleitung (Signal Durchfluss-Messung Wärmezähler Fernleitung) < Durchfluss bei minimal vorgegebenem Druckabfall über grösserem Dreiwegeventil.
- Regelung des kleineren Dreiwegeventils wieder über Reglerausgang 1.

Das Zu- und Wegschalten der Dreiwegventile kann alternativ über das Erfassen der Druckdifferenz über die Dreiwegventile erfolgen, wobei die gleiche Logik wie beschrieben zur Anwendung kommt.

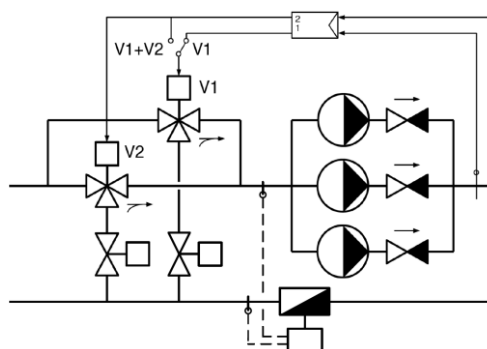


Bild 3.8 Parallel geschaltete Netzpumpen mit zwei Regelventilen zur Verbesserung der minimal regelbaren Wärmeleistung. [21].

3.5.4 Getrennte Fernleitungsgruppen für Winter- und Sommerbetrieb

Für einen energetisch optimalen Sommerbetrieb mit wesentlich kleinerem Volumenstrom (weniger als 20 % des GesamtVolumenstroms) ist der getrennte Betrieb einer parallel dazu angeordneten drehzahlgesteuerten Sommerpumpe vorteilhaft (siehe Bild 3.9):

- Der regelungstechnische Aufwand kann einfacher gestaltet werden (keine Sequenz, sondern manuelle Umschaltung zwischen Sommer- und Winterbetrieb).
- Die Fernleitungspumpe für den Winterbetrieb sollte beim Auslegepunkt den Wärmeverbund zu 100 % mit Wärme versorgen können (keine Parallelschaltung von zwei Fernleitungspumpen, evtl. Ersatzpumpe installieren).
- Das Dreiwegeventil und die Fernleitungspumpe für den Sommerbetrieb können entsprechend der Anforderung im Sommer dimensioniert werden.
- Bei der Vorregulierung einer Fernleitung mit Sommerbetrieb wird der Einbau von zwei Ventilen empfohlen, wenn der maximale Sommer-Wärmeleistungsbedarf $\leq 10\%$ des maximalen Winter-Wärmeleistungsbedarfs ist.

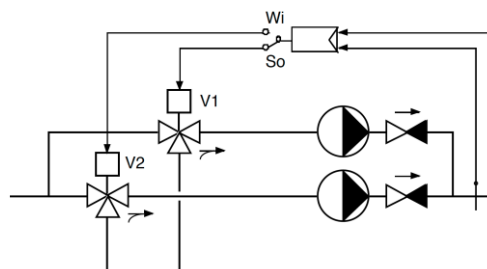


Bild 3.9 Parallel geschaltete Sommer- und Winterpumpe mit zwei Regelventilen zur Verbesserung der minimal regelbaren Wärmeleistung. [21].

3.6 Nenndruck

Rohrleitungen sowie Komponenten wie Flansche, Ventile, Schieber und andere Armaturen sind nach SN EN 1333 [99] in bestimmten Nenndruckstufen festgelegt, die mit PN für „Pressure Nominal“ bezeichnet werden. Die Nenndruckstufe bestimmt die minimale Wandstärke und Abmessungen der Rohre, Flansche, Armaturen, etc.

Für die Auslegung aller unter Druck stehenden Rohre und Komponenten ist der maximal zulässige Betriebs- und Prüfdruck zu berücksichtigen, der gemäss Druckgeräteverordnung [66] mit PS oder auch MOP (Maximum Operating Pressure) bezeichnet wird. Der maximal zulässige Betriebsdruck wird vom Hersteller des Bauteils festgelegt. Fernleitungen aus einem Rohr oder einem Rohrsystem mitsamt der letzten Absperrvorrichtung im Bereich der Anlage, einschliesslich aller Nebenausrüstungen fallen jedoch nicht unter die Druckgeräteverordnung. Hingegen gilt die Druckgeräteverordnung für Standarddruckgeräte wie solche die sich in Druckregel- und in Kompressorstationen befinden können.

Die Druckgeräteverordnung [66] entspricht sinngemäss der Europäischen Druckgeräte-Richtlinie 97/23/EG (DGRL) auf deren Basis Leitlinien [68] erarbeitet wurden. Zum Begriff Standarddruckgeräte und Bezug nehmend auf den Artikel 1 Abs. 3 Ziffer b der Druckgeräteverordnung [66] macht die Leitlinie 1/17 folgende Aussage: Ein Standarddruckgerät muss nicht speziell für eine Fernleitung zur Durchleitung von Fluiden ausgelegt und gebaut worden sein, sondern ist zur Verwendung in einer Reihe von Anwendungen vorgesehen. Typische Beispiele für Standarddruckgeräte bei Fernleitungen, Druckregel- oder Kompressorstationen sind:

- Messvorrichtungen
- Ventile
- Druckregler
- Sicherheitsventile
- Filter
- Wärmeübertrager
- Behälter

Fernwärmenetze mit Stahl-Medienleitungen (KMR und MMR) werden, sofern keine anderen Anforderungen vorliegen, auf PN 16 festgelegt obwohl die Rohrleitungen bis PN 25 einsetzbar sind. Komponenten (Armaturen, Ventile, etc.) bis DN 150 sind in Ausführung PN 16 entweder baugleich oder nicht wesentlich aufwändiger bzw. kostenintensiver als solche mit niedrigerer Druckstufe. Bei grösseren Nenndurchmessern oder grösseren Nenndruckstufen (z.B. PN 25) erhöhen sich die Komponentenpreise. Hausanlagen und Wärmeübergabestationen in höheren Druckstufen als PN 16 sind deshalb teurer und auch im Betrieb aufwändiger. Wichtige Kriterien für die Wahl des Nenndruckes sind die geodätischen Gegebenheiten, die maximalen Vorlaufdrücke und die erforderliche Drucküberlagerung des Netzes.

Fernwärmenetze mit Kunststoff-Medienleitungen (PMR) weisen eine geringe Druckstufe von PN 6 auf und sind auch nur in relativ kleinen Nenndurchmessern (max. DN 150) erhältlich.

Im Einzelfall kann auf einen höheren Druck als der Nenndruck (PN) ausgelegt werden, falls die äusseren Randbedingungen bekannt sind und ein Berechnungsnachweis zeigt, dass die maximal zulässigen Drücke (PS) eingehalten werden. Ansonsten gelten die Nenndruckangaben (PN) der Rohre und Armaturen als maximal zulässiger Betriebsdruck.

3.7 Druckverlauf im Fernwärmenetz

Das Druckschaubild stellt die Druckverhältnisse im Netz in Funktion der Distanz zwischen der Wärmezentrale (ab Netzpumpe) und dem Schlechtpunkt (weitest entfernter Abnehmer) dar. Im Beispiel in Bild 3.11 ist die Fernleitungspumpe im Vorlauf angebracht. Die Druckhaltung befindet sich im Rücklauf und sorgt für einen konstanten Druck in der Zentrale vor den Fernwärmepumpen (Vordruckhaltung). Mit sich ändernder Abnahmeleistung schwanken der Mitteldruck im Netz und damit der Druckverlauf bei allen Wärmeübergabestationen. Das gestapelte Druckschaubild ist in unterschiedliche Bereiche unterteilt:

- **Prüfdruck:** Der Druck bei der das gesamte Fernwärmenetz oder Abschnittsweise auf Dichtheit geprüft wird. Der Prüfdruck entspricht in der Regel dem 1.3-fachen des maximal zulässigen Betriebsdruckes und wird über eine Dauer von 24 Stunden beaufschlagt.
- **Grenzdruck im Störfall (MIP):** Maximaler durch Sicherheitseinrichtungen begrenzter Druck, der in einem System kurzfristig auftreten kann (Maximum Incidental Pressure).
- **Maximal zulässiger Betriebsdruck (MOP):** An keiner Stelle im Netz darf der Druck den maximal zulässigen Betriebsdruck der Leitung und der installierten Anlagenteile im normalen Betrieb überschreiten (Maximum Operating Pressure). Der maximal zulässige Betriebsdruck richtet sich nach der Nenndruckstufe und ist abhängig von der Netzlänge, der Betriebstemperatur und nach den geodätischen Verhältnissen im Netz. Dieser sollte aus wirtschaftlichen Gründen möglichst tief gewählt werden. Typische Nenndruckstufen bei Fernwärmenetzen sind PN16 bis PN25. Rohre und insb. Anlagenkomponenten ab PN25 verteuern das Netz erheblich und sollten nur eingesetzt werden, wenn die Bedingungen es zwingend erfordern (siehe auch Kapitel 3.6 Nenndruck). Fehlfunktionen bei der Netzdruckregelung können zu überhöhten Drücken führen. Bei Pumpen welche bei maximaler Förderhöhe und statischem Druck über den maximal zulässigen Betriebsdruck gehen können, wird empfohlen einen Sicherheitspressostaten einzusetzen, welcher direkt die Netzpumpe(n) verriegelt.
- **Druckverlauf Vorlauf:** Stellt den Druckverlauf des Vorlaufs von der Wärmezentrale bis zum Hausanschluss, welcher als Schlechtpunkt definiert wurde, dar (entspricht dem Druckabfall infolge Druckverlust in den Leitungen und Einbauten).
- **Differenzdruck Hausstation:** Der Druckunterschied zwischen Vor- und Rücklauf am Ende beim Hausan-

schluss ist durch den minimal notwendigen Differenzdruck über der Hausstation definiert. Der minimale Differenzdruck bei einer Hausstation kann 0.7 bis 1.0 bar betragen.

- **Druckverlauf Rücklauf:** Stellt den Druckverlauf des Rücklaufs vom Hausanschluss bis zur Wärmezentrale dar (entspricht dem Druckabfall infolge Druckverlust in den Leitungen und Einbauten).
- **Druckverlust Netz:** Der dynamische Druck ändert sich je nach Last und ist durch die Fernleitungspumpe aufzubringen. Er setzt sich zusammen aus den Leitungsverlusten und dem minimalen Differenzdruck des massgebenden Wärmeabnehmers (i.d.R. die weitest entfernte Hausstation). Der maximale dynamische Druck ist im Auslegepunkt zu erwarten.
- **Statischer Druck:** Der statische Druck ergibt sich aus der Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Punkt (Höhendifferenz) im Fernwärmenetz (Druck der Wassersäule).

- **Minimaler Betriebsdruck:** Setzt sich zusammen aus dem statischen Druck und einem Sicherheitszuschlag zur Vermeidung von Unterdruckbildung, Verdampfung und Kavitation. Das heisst, an der höchsten Stelle des Netzes muss der Druck des Fernwärmewassers um mindestens 0,5 bar höher sein als der Dampfdruck bei der maximalen Netztemperatur (siehe Bild 11.1). Wegen gewissen Regeltoleranzen der Druckhaltung und für instationäre Übergangs- und Einschwingvorgängen bei unerwarteten Ereignissen wird eine zusätzliche Sicherheit von rund 1 bar empfohlen. Kann je nach Situation dem Ruhedruck der Druckhaltung entsprechen.
- **Gesamtdruck Netz:** Der maximale Netzdruck (statischer und dynamischer Anteil) ergibt sich bei maximaler Last im Auslegepunkt und bei maximaler Netztemperatur. Der maximale Netzdruck darf in diesem Fall den maximalen Betriebsdruck nicht überschreiten.

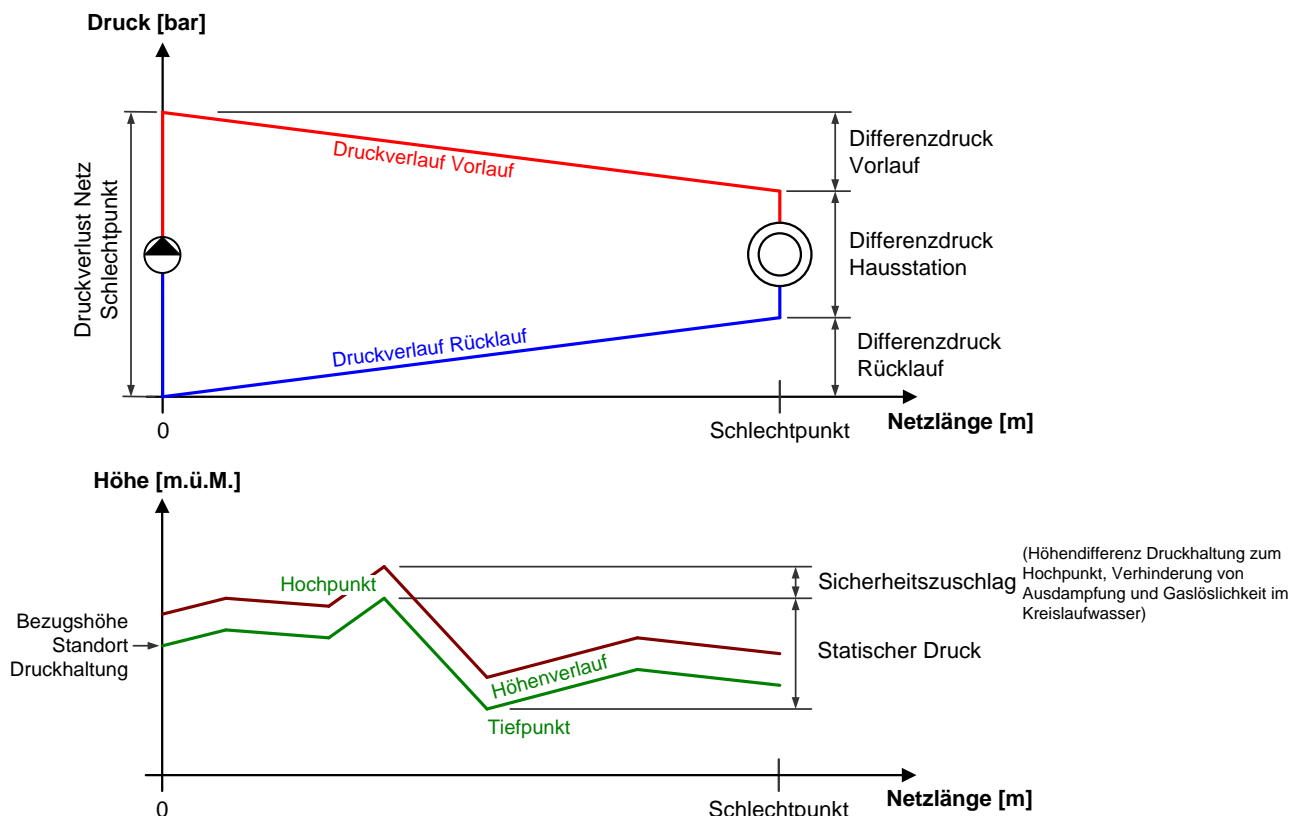


Bild 3.10 Qualitative Darstellung der Netzkennlinie (oben) als Druck in bar und des statischen Druckes (unten) als Höhenkurve in m.ü.M in Funktion der Netzlänge zum Schlechtpunkt.

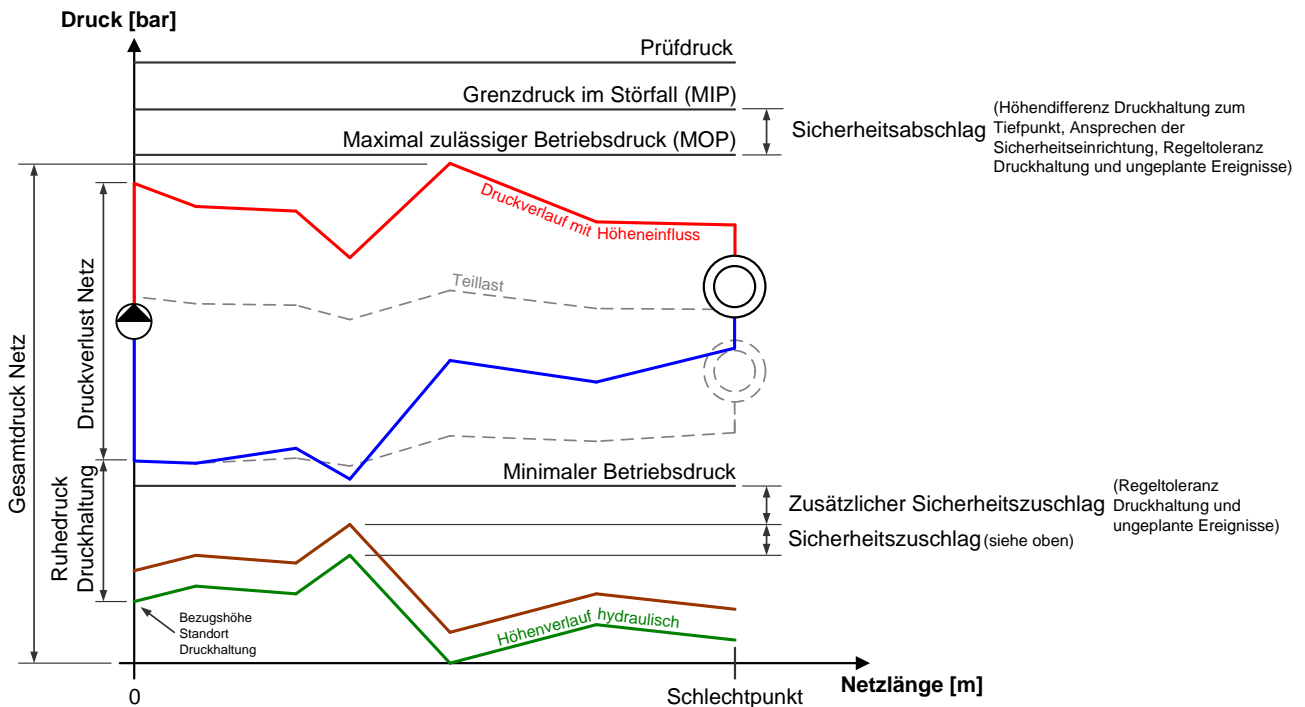


Bild 3.11 Gestapeltes Druckschaubild für ein Wärmenetz mit der Überlagerung der Höhenkurve und der Netzkennlinie in Funktion der Netzlänge zum Schlechtpunkt.

3.8 Druckerhöhung und Netztrennung

Bei grösseren und ausgedehnten Netzen (Nenndrücke PN25 oder gar PN40 anstatt PN16) empfiehlt sich eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, ob der Druckverlust im Netz von den zentralen Fernleitungspumpen aufgebracht werden soll, oder ob dezentrale Druckerhöhungsstationen oder Systemtrennungen vorteilhaft sind. Mit dem Einsatz von Druckerhöhungsstationen und Systemtrennungen können je nach Situation Betriebs- und Investitionskosten eingespart werden.

zeigt, dass mit einer Druckerhöhungspumpe ein tieferer Netzdruck als ohne Druckerhöhungspumpe vorliegt.

Eine Netztrennung beschreibt eine hydraulische Trennung zweier sonst verbundener Systeme bei der Fernwärmeversorgung. Mögliche Gründe für eine Netztrennung sind:

- Absicherung gegenüber zu hohen Drücken (Hausanschluss, geodätischer Höhenunterschied, Leitungslänge, etc.)
- Trennung bei unterschiedlichen Medien (z.B.: Dampf-Wasser oder Thermoöl-Wasser)
- Andere Netzparameter (Druck und Temperatur)
- Sekundär Netze.

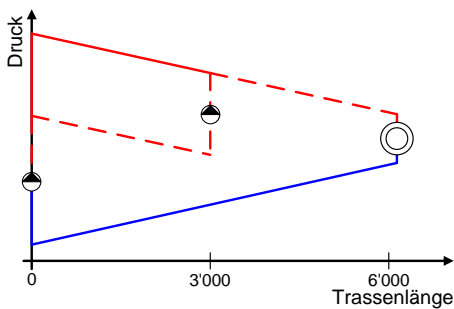


Bild 3.12 Beispiel Druckverlauf mit und ohne Druckerhöhungspumpe.

Nachteilig zu betrachten ist der dabei entstehende Exergieverlust bei der Wärmeübertragung. Dieser sollte im Auslegefall möglichst klein gehalten werden, indem auf eine minimale Grädigkeit im Wärmeübertrager geachtet wird.

Soll wie im Beispiel von Bild 3.12 dargestellt, wird nach einer Trassenlänge von 3000 m nur noch ein Teil des Volumenstroms bis zum weitest entfernten Wärmeabnehmer mit einer Druckerhöhungspumpe mit entsprechend geringerer Leistung gefördert. Dieses Beispiel

3.9 Druckhaltung

Wärmeträgermedien erfahren mit der Temperaturänderung eine vom Volumenausdehnungskoeffizienten abhängige Volumenänderung. Wasser, das mehrheitlich als Wärmeträgermedium eingesetzt wird, weist bei 4°C die höchste Dichte und somit das kleinste Volumen auf, sodass mit zunehmender Temperatur eine Volumenzunahme eintritt. Im Temperaturbereich zwischen 4°C und 30°C ist diese jedoch nur gering, während sie bei höheren Temperaturen stärker in Erscheinung tritt. In einem geschlossenen System muss deshalb die Volumenänderung kompensiert werden, um den Druck konstant zu halten. Die dazu eingesetzten Expansions- und Druckhalteanlagen haben daher eine zentrale Bedeutung in Heiz- und Kühlkreisläufen und erfüllen drei grundlegende Aufgaben:

- Den Druck an jeder Stelle des Anlagensystems in zulässigen Grenzen zu halten, d.h. keine Überschreitung des maximal zulässigen Betriebsüberdruckes, aber auch Sicherstellung eines Mindestdruckes zur Vermeidung von Kavitation (Unterdruck, Verdampfung, Gaslöslichkeit).
- Kompensation von Volumenschwankungen des Wärmeträgermediums (Wasser) infolge von Temperaturschwankungen.
- Vorhalten von systembedingten Wasserverlusten in Form einer Wasservorlage.

Eine sorgfältige Berechnung, Inbetriebnahme und Wartung ist Grundvoraussetzung für das richtige Funktionieren der Druckhaltung. Weitere Hinweise und Empfehlungen zur Umsetzung können dem AGFW Arbeitsblatt FW 442 Druckhaltung in Heizwasser-Fernwärmenetzen [104] entnommen werden. Nachfolgend wird auf die einzelnen Druckhaltesysteme, die Einbindung der Druckhaltung sowie auf das Nennvolumen und den Nachspeisemassenstrom der Expansionsanlage eingegangen.

3.9.1 Druckhaltesysteme

Es existieren unterschiedliche Druckhaltesysteme. Jedes benötigt einen Ausgleichsbehälter und ein System zum Aufrechterhalten des Ruhedruckes (z.B. Kompressor bei Gasen oder Pumpe bei Flüssigkeiten). Eine Druckhaltung mit offenem oder geschlossenem Gefäß wird als statische Druckhaltung bezeichnet, eine Druckhaltung mit Druckdiktierpumpe wird dynamische Druckhaltung genannt.

Die Druckhaltesysteme sind in der Regel so abzusichern, dass bei Ausfall einer Einheit entsprechende Reservekapazitäten zur Verfügung stehen.

Druckhaltung mit offenem Gefäß

Bei der Druckhaltung mit einem offenen Hochgefäß wird als Ausgleichsbehälter ein offener Behälter an einem erhöhten Standort im Netz aufgestellt. Die Druckhaltetreibmittel in diesem System sind:

- der Luftdruck, der auf die Wasseroberfläche des offenen Gefäßes drückt,
- und die Gewichtskraft des Wassers im Ausgleichsbehälter.

Vorteil dieses Prinzips ist die kostengünstige Bauweise, da so gut wie keine Armaturen, Regeleinrichtungen und Pumpen benötigt werden. Problematisch am offenen Hochgefäß sind das Auftreten von Korrosion im Fernwärmenetz durch den permanenten Sauerstoffeintritt über die Entlüftungsleitung sowie die Gefahr der Abkühlung durch die Aussenluft. Als schwierig stellt sich zudem oft die Herausforderung dar, einen ausreichend hohen Standort für die Aufstellung des Hochgefäßes zu finden, um den entsprechenden Druck sicher zu stellen. Die Druckhaltung mit offenem Gefäß wird heute weitgehend vermieden und in der Regel nicht mehr angewendet.

Druckhaltung mit geschlossenem Gefäß

Gase lassen sich komprimieren und als Druckhaltetreibmittel in einem geschlossenen Gefäß einsetzen. Diese Eigenschaft wird bei der Druckhaltung von Fernwärmenetzen genutzt. Treten im Netz Wasserverluste auf, drückt das komprimierte Gaspolster in dem Ausgleichsbehälter auf die Wasseroberfläche. Durch den Druck gegen die Wasseroberfläche wird bei Wassermangel im Fernwärmenetz die benötigte Wassermenge aus dem Ausgleichsbehälter in das Netz nachgespeist. Wegen der Korrosionsgefahr durch Luft wird in der Regel ein inertes Gas wie zum Beispiel Stickstoff als Druckhaltetreibmittel verwendet. Eine weitere Massnahme ist die beiden Medien über eine Membran zu trennen (Membran-Ausdehnungsgefäß MAG).

Druckhaltung mit Druckdiktierpumpe

Die Druckdiktierpumpe ist zwischen Behälter und Fernwärmenetz eingebaut. Bei Wassermangel und damit verbundenem Druckabfall im Fernwärmenetz pumpt die Druckdiktierpumpe die fehlende Menge an Wasser aus dem Behälter in das Netz. Ein Zurückströmen des Fernwärmewassers wird durch eine Rückschlagklappe verhindert. Bei steigendem Druck im Fernwärmenetz öffnet sich ein Überströmventil, damit das Fernwärmewasser aus dem Netz in den Behälter fließen kann.

3.9.2 Einbindung der Druckhaltung

Die hydraulische Einbindung der Druckhaltung in das Anlagensystem hat grundlegenden Einfluss auf den Verlauf des Arbeitsdruckes. Der Arbeitsdruck setzt sich zusammen aus dem Ruhedruckniveau der Druckhaltung und dem Differenzdruck, der bei laufender Umwälzpumpe erzeugt wird. Dabei werden grundsätzlich drei Arten der Druckhaltung unterschieden:

- Vordruckhaltung
- Nachdruckhaltung
- Mitteldruckhaltung

Wobei in der Praxis allerdings auch noch weitere Varianten angewendet werden.

Vordruckhaltung

Die Druckhaltung wird vor der Umwälzpumpe, also saugseitig, eingebunden. Aus diesem Grund wird auch der Begriff Saugdruckhaltung verwendet. Diese Art wird fast ausschliesslich angewendet, da sie am einfachsten zu beherrschen ist.

Vorteile:

- geringes Ruhedruckniveau
- Arbeitsdruck > Ruhedruck, somit keine Gefahr von Unterdruckbildung.

Nachteil:

- bei hohem Umwälzpendruck (Grossanlagen) hoher Arbeitsdruck, Netzbelastung p_{zul} beachten.

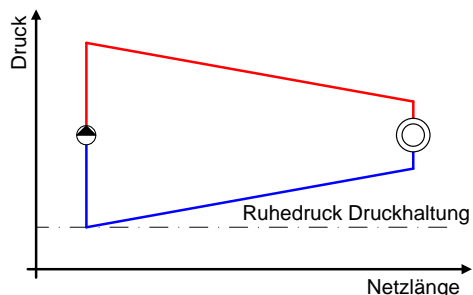


Bild 3.13 Vordruckhaltung.

Nachdruckhaltung

Die Druckhaltung wird nach der Umwälzpumpe, also druckseitig, eingebunden. Bei der Ruhedruckbestimmung muss ein anlagenspezifischer Differenzdruckanteil der Umwälzpumpe (50 % bis 100 %) eingerechnet werden. Die Anwendung beschränkt sich auf wenige Einsatzfälle wie zum Beispiel Solaranlagen.

Vorteil:

- geringes Ruhedruckniveau, falls nicht der gesamte Pumpendruck aufgelastet werden muss.

Nachteil:

- hohes Ruhedruckniveau
- es muss besonders auf die Einhaltung des erforderlichen Zulaufdruckes gemäss Herstellerangaben für die Umwälzpumpe geachtet werden, ansonsten droht Kavitationsgefahr.

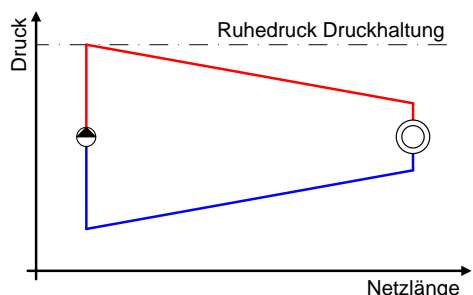


Bild 3.14 Nachdruckhaltung.

Mitteldruckhaltung

Der Messpunkt für das Ruhedruckniveau wird durch eine Analogiemessstrecke in die Anlage „verlegt“. Ruhe- und Arbeitsdruckniveau können damit optimal aufeinander abgestimmt und variabel gestaltet werden (symmetrische, asymmetrische Mitteldruckhaltung). Aufgrund des relativ hohen apparatetechnischen Aufwandes beschränkt sich der Einsatz auf Anlagen mit komplizierten Druckverhältnissen meist im Fernwärmebereich.

Vorteil:

- optimale, variable Abstimmung von Arbeits- und Ruhedruck.

Nachteil:

- hoher apparatetechnischer Aufwand

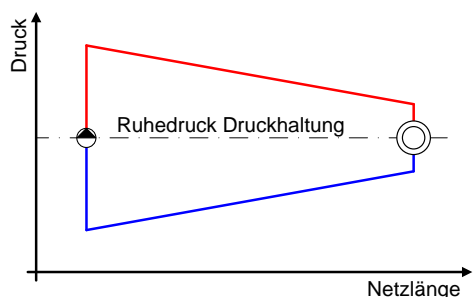


Bild 3.15 Mitteldruckhaltung.

3.9.3 Expansionsvolumen und Nachspeisemenge

Die relevanten Parameter der Expansionsanlage und Druckhaltung einer Fernwärmanlage sind das Nennvolumen und die Nachspeiseleistung der Expansionsanlage.

Das Nennvolumen der Expansionsanlage bzw. des Ausdehnungsgefässes setzt sich aus dem theoretischen Expansionsvolumen und der zusätzlichen Wasservorlage zur Deckung von Leckagen zusammen. Weil der Druck im Ausdehnungsgefäss in der Regel durch ein Gaspolster erzeugt wird und der Wasserstand und Druck im Gasraum im Zusammenhang stehen ($p \times V = \text{konstant}$), ist es nicht möglich das gesamte Volumen des Ausdehnungsgefässes zur Wasseraufnahme zu nutzen. Das Nennvolumen wird daher um einen Faktor erweitert.

$$V_N = (\Delta V + V_{wv}) \frac{p_e + 1}{p_e - p_0}$$

Das theoretische Expansionsvolumen einer Fernwärmanlage ist das Nachspeisevolumen bei Energieabfuhr oder das Überströmvolumen bei Energiezufuhr durch die Temperaturänderung des Wärmeträgermediums. Das Nachspeisevolumen berechnet sich folgendermassen:

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho(T_x)} - 1 \right)$$

Wichtig ist die korrekte Erfassung des Wasserinhaltes V_0 , welches die für die Berechnung des Nachspeisevolumens notwendig ist (siehe Berechnungsbeispiel). Dies beinhaltet das gesamte Wasservolumen im geschlossenen System, an welchem die Expansionsanlage angeschlossen ist (Wärmeübertrager, Energiespeicher, Heizkessel, Rohrleitungen, Zwischengefäss Expansion, etc.). Die Wasservorlage kompensiert allfällige Wasserverluste im System und sollte ungefähr 0.5 % des Wasserinhaltes V_0 betragen.

$$V_{wv} = 0.005 V_0$$

Der Nachspeisemassenstrom der Expansionsanlage ist abhängig von der zugeführten oder abgeführten Wärmeleistung, dem Volumenänderungskoeffizienten und der spezifischen Wärmekapazität des Wärmeträgermediums. Der Nachspeisemassenstrom ist für die Auslegung des Überströmventils und/oder der Druckdicktierpumpe notwendig und berechnet sich folgendermassen:

$$\dot{M} = \gamma(T_x) \frac{\dot{Q}}{c_p}$$

Der für die Berechnung des Nachspeisemassenstroms benötigte Volumenänderungskoeffizient ist abhängig vom Temperatur- und Dichteunterschied des Wärmeträgermediums und berechnet sich folgendermassen:

$$\gamma(T_x) = -\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \frac{1}{\Delta T} = -\frac{\rho(T_x) - \rho_0}{\rho_0 (T_x - T_0)}$$

Bei der Auslegung der Expansions- und Druckhalteeinrichtung sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Leistung der Heizeinrichtungen und der Wärmebezügler
- Vor- und Rücklauftemperatur, Maximaltemperatur, und Fülltemperatur
- Druckverhältnisse im System
- Medium (Wasser, Wasser-Glykol, andere).

Je nach Anwendung und Grösse der Anlage empfiehlt sich eine Expansions- und Druckhalteeinrichtung mit fester Gasfüllung (kleine Anlagen), mit Kompressoren (präzise Druckhaltung möglich) oder mit Pumpen (Transfero-Pumpen für grosse Anlagen).

Als ausreichende Regelgüte in einem Netz gilt eine Druckschwankung von $\pm 0,2$ bar. Innerhalb dieser Bandbreite muss mit den Kompressoren oder Transfero-Pumpen eine Nachspeisung in das Netz erzielt werden.

In folgendem Berechnungsbeispiel wird das Expansionsvolumen und daraus das Nennvolumen sowie der theoretische Nachspeisemassenstrom der Expansionsanlage (Vordruckhaltung) exemplarisch für ein Fernwärmenetz mit 1 MW Erzeugerleistung durchgerechnet.

V_N	= Nennvolumen [m ³]
ΔV	= Nachspeisevolumen [m ³]
V_{wv}	= Volumen Wasservorlage [m ³]
V_0	= Wasserinhalt [m ³]; Gesamtes Wasservolumen im geschlossenen System
p_0	= minimaler Betriebsdruck [bar]; Zur Vermeidung von Unterdruckbildung, Verdampfung und Kavitation.
p_e	= Gesamtdruck Netz [bar]; Für die Auslegung ist der Druck bei der höchsten Temperatur entscheidend.
$\rho(T_x)$	= Dichte des Mediums bei der End-Temperatur [kg/m ³]
ρ_0	= Dichte des Mediums bei der Start-Temperatur [kg/m ³]
\dot{M}	= Nachspeisemassenstrom Expansion (kg/s)
$\gamma(T_x)$	= Volumenänderungskoeffizient [1/K]
T_x	= End-Temperatur [°C]; in der Regel die höhere Temperatur (z.B. Maximale Vorlauftemperatur)
T_0	= Start-Temperatur [°C]; in der Regel die tiefere Temperatur (z.B. Fülltemperatur)

Die Drücke werden als Überdrücke angegeben.

Berechnungsbeispiel Expansionsvolumen und Nachspeisemenge

Ausgangslage – Auslegeparameter für Berechnungsbeispiel

	Temperaturen:	Dichte (gemäss Tabelle 11.1)
Fülltemperatur:	$T_F = 10^\circ\text{C}$	$\rho_F = 1000 \text{ kg/m}^3$
Maximale Vorlauftemperatur:	$T_{VL} = 75^\circ\text{C}$	$\rho_{VL} = 975 \text{ kg/m}^3$
Maximale Rücklauftemperatur:	$T_{RL} = 45^\circ\text{C}$	$\rho_{RL} = 990 \text{ kg/m}^3$
Sicherheitsbegrenzung:	$T_S = 90^\circ\text{C}$	$\rho_S = 965 \text{ kg/m}^3$
Spezifische Wärmekapazität (konstant angenommen)		$c_p = 4.205 \text{ kJ/(kg K)}$
Gesamtdruck Netz bei maximaler Vorlauftemperatur		$p_e = 12 \text{ bar}$
Minimaler Betriebsdruck (Vorhaltdruck)		$p_0 = 3 \text{ bar}$

Berechnung Nennvolumen Ausdehnungsgefäss

Wasserinhalt V_0

Für die Berechnung ist die korrekte Erfassung des *Wasserinhaltes* V_0 notwendig. Dies beinhaltet das gesamte Wasservolumen im geschlossenen System, an welchem die Expansionsanlage angeschlossen ist. Beispielhaft ist hier eine Auflistung dargestellt.

Heizkessel 1 MW	1 Stk.	3'500 L	=	3'500 L
Rohrleitungen Wärmeerzeugung DN 80	100 m	5.35 L/m	=	535 L
Wärmespeicher	1 Stk.	27 m ³	=	27'000 L
Wärmeübertrager Wärmeerzeugung	0 Stk.	0 L	=	0 L
Zwischengefäss Expansion	0 Stk.	0 L	=	0 L
Rohrleitungen VL DN 100	150 m	9.01 L/m*	=	1'352 L
Rohrleitungen RL DN 100	150 m	9.01 L/m*	=	1'352 L
Rohrleitungen VL DN 65	350 m	3.88 L/m*	=	1'358 L
Rohrleitungen RL DN 65	350 m	3.88 L/m*	=	1'358 L
Rohrleitungen VL DN 25	265 m	0.64 L/m*	=	170 L
Rohrleitungen RL DN 25	265 m	0.64 L/m*	=	170 L
Wärmeübertrager Wärmeabnehmer	10 Stk.	250 L	=	2'500 L
		<i>Wasservolumen V_0 Total</i>	=	<i>39'295 L</i>

*Spezifisches Volumen der Rohrleitung in L/m gemäss Tabelle 13.1

Expansionsvolumen (Füll- bis Maximale Vorlauftemperatur)

Die Berechnung des Expansionsvolumens erfolgt in der Regel für die Maximale Vorlauftemperatur und ergibt ein Volumen von 1'008 Liter.

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho(T_x)} - 1 \right) = 39295 L \left(\frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{975 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} - 1 \right) \approx 1008 L$$

Wasservorlage

Die Berechnung der Wasservorlage ergibt ein Volumen von ungefähr 200 Liter.

$$V_{wv} = 0.005 V_0 = 0.005 \times 39295 L \approx 200 L$$

Nennvolumen Ausdehnungsgefäss

Die Berechnung des Nennvolumens des Ausdehnungsgefässes ergibt ein Volumen von ungefähr 2000 Liter.

$$V_N = (\Delta V + V_{wv}) \frac{p_e + 1}{p_e - p_0} = (1008 L + 200 L) \frac{12 + 1}{12 - 3} = 1744.9 L \approx 2000 L$$

Berechnung Nachspeisemassenstrom

Das Berechnungsbeispiel berechnet den Nachspeisemassenstrom bei Ausfall der Erzeugerleistung von 1 MW bei Maximaler Vorlauf-temperatur von 75°C auf eine Vorlauftemperatur von 65°C.

Volumenänderungskoeffizient

Die Berechnung des Volumenänderungskoeffizienten ergibt einen Wert von $6.12 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$.

$$\gamma(T_x) = - \frac{\rho(T_x) - \rho_0}{\rho_0 (T_x - T_0)} = - \frac{975 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 981 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{981 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (75 - 65) \text{K}} = 0.000612 \frac{1}{\text{K}}$$

Nachspeisemassenstrom

Die Berechnung des Nachspeisemassenstroms ergibt einen Wert von ungefähr 0.52 m³/h.

$$\dot{M} = \gamma(T_x) \frac{\dot{Q}}{c_p} = 0.000612 \frac{1}{\text{K}} \frac{1000 \text{ kW}}{4.205 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}} \approx 0.145 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 0.52 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

4 Wärmeverteilung – Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt die einzelnen Komponenten, den Aufbau, die Verlegemethoden und die typischen Verlege-Situationen beim Bau eines Fernwärmenetzes. Die Auslegung und Berechnung werden in Kapitel 7 behandelt.

4.1 Entwicklung

Aufgrund der historischen Entwicklung der Technologien zur Fernwärmeverteilung wird heute zwischen drei etablierten Generationen der Fernwärmeverteilung unterschieden [3]. Diese sind in Bild 4.1 beschrieben und wie folgt charakterisiert:

- Die erste Generation basiert auf der Verteilung von Dampf in Rohren, welche in Betonkanälen verlegt sind.
- Die zweite Generation basiert auf der Verteilung von Heisswasser (> 110°C) in Rohren, welche mehrheitlich in Betonkanälen verlegt sind. Verfahren mit erdverlegten und unverbundenen Rohren sowie verfüllbare Wärmedämmmaterialien haben sich bis heute nicht durchgesetzt.
- Die dritte und aktuelle Generation basiert auf direkt in der Erde verlegten, festverbundenen Rohren zur Verteilung von Wasser in einem breiten Temperaturbereich (bis 160°C im Dauerbetrieb).

Daneben besteht seit einigen Jahren auch ein Interesse an der Verteilung von Wärme auf niedrigem, nicht direkt nutzbarem Temperaturniveau, was gerne auch als vierte Generation bezeichnet wird.

Von besonderem Interesse ist die Entwicklung erdverlegter Rohrsysteme, da dies die am meisten eingesetzte Technologie ist. In den letzten mehr als hundert Jahren gab es unterschiedliche Ansätze. Einige davon werden seit langer Zeit erfolgreich eingesetzt, während andere die prognostizierte Lebensdauer nicht erreicht oder die Forderungen an die Energieeffizienz nicht erfüllt haben.

Das Hauptziel der Weiterentwicklung der Wärmeverteilung ist grundsätzlich eine Reduktion von:

- Investitionskosten
- Raumbedarf
- Installationszeit
- Betriebs- und Wartungskosten.

Einige dieser Parameter sind voneinander abhängig. So führt zum Beispiel ein reduzierter Raumbedarf zu kürzeren Installationszeiten und zu tieferen Investitionskosten. Ein zusätzlicher Effekt kann eine erhöhte Akzeptanz der Fernwärme sein, wenn die kürzere Installationszeit auch die Beeinträchtigung von öffentlichem Raum verkürzt.

4.2 Verteilarten mit abnehmender Temperatur

Ausgehend von Dampf über Heisswasser zu Warmwasser zeigt die historische Entwicklung der Fernwärme einen Trend zu abnehmenden Vorlauftemperaturen und somit abnehmendem Exergieinhalt der Wärme (Bild 4.4). Eine Fortsetzung dieses Trends ist durch Entwicklungen zur Verteilung von Wärme bei niedrigen Vorlauftemperaturen im Gang.

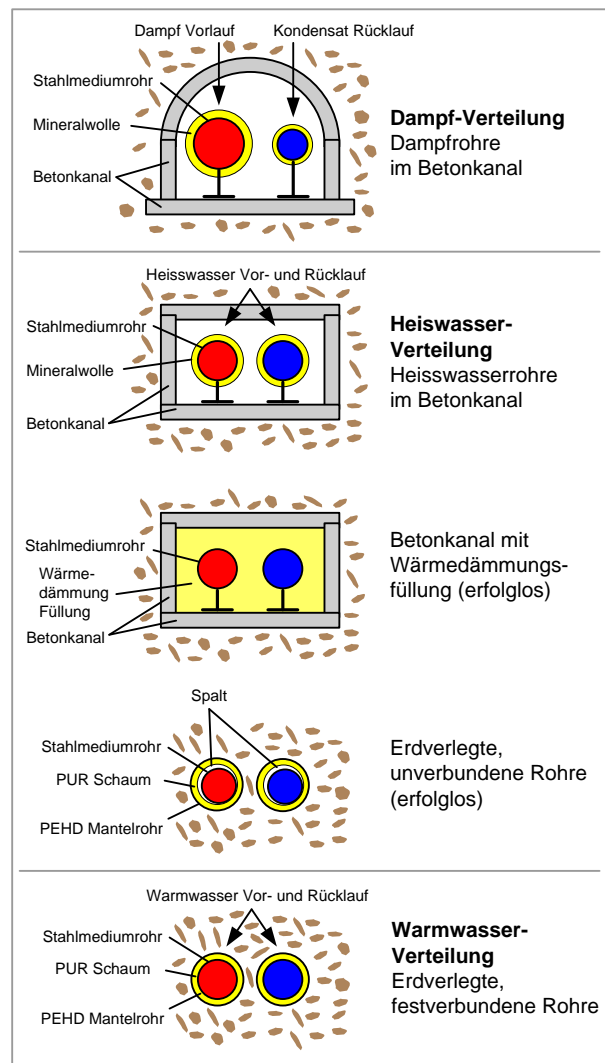


Bild 4.1 Historische Entwicklung der Wärmeverteilungstechnologie. Die Warmwasser-Verteilung gilt für starre und flexible Rohre wie auch für Doppelrohre (nach [3]).

4.2.1 Dampf-Verteilung

Dampf war vor über hundert Jahren eine logische Wahl als Wärmeträgermedium, da Dampf oft schon von bestehenden Dampfkraftwerken einfach zur Verfügung stand. Die Wärmenutzung des Dampfes war damit die erste Anwendung der Wärme-Kraft-Kopplung.

Heutzutage dominiert in Europa jedoch Wasser als Wärmeträgermedium in Fernwärmenetzen, obwohl auch immer noch Dampfnetze im Einsatz sind. Diese werden aber nach und nach durch Wassernetze ersetzt. Daneben besteht weiterhin ein Nischenmarkt für Dampfnetze für Anwendungen, bei denen ein hoher Energieinhalt gefordert wird. Dies gilt zum Beispiel für bestimmte industrielle Prozesse oder z.B. zur Sterilisation in Spitälern.

In Deutschland beträgt der Anteil von Dampf an der Verteilung von Wärme in Fernwärmenetzen lediglich 11 % mit abnehmender Tendenz [3]. Demgegenüber wird in USA oft Dampf als Wärmeträgermedium eingesetzt, etwa in New York in einem der grössten Fernwärmesysteme der Welt, bei dem weder Pläne für einen Ersatz durch ein Wassernetz bestehen, aber voraussichtlich auch keine relevanten Erweiterungen erfolgen. Dampfnetze existieren aber auch in zahlreichen weiteren Städten der USA, wo bestehende Dampfnetze weiterhin betrieben und wenn nötig Dampfkessel neuester Generation eingesetzt werden.

Dampfnetze werden als offene oder geschlossene Systeme konzipiert. Bei einem offenen System wird das Kondensat abgeleitet und muss durch frisches Wasser ersetzt werden. In einem geschlossenen System wird das Kondensat zum Dampferzeuger zurückgeführt. Das offene System hat den Vorteil, dass keine Rücklaufleitung für das Kondensat benötigt wird. Demgegenüber ist der Energieverlust in Form von Wärme mit etwa 15 % und der Aufwand das Kondensat zu ersetzen sehr hoch.

Neben den Vorteilen des hohen Energieinhaltes von Dampf und der höheren Vorlauftemperatur als Wassernetze, haben Dampfnetze erhebliche Nachteile:

- Der kondensierende Dampf im offenen System absorbiert Sauerstoff und Kohlendioxid, womit das Kondenswasser sehr korrosiv ist und die Rücklaufleitung damit stark belastet wird.
- In einem geschlossenen System braucht es bei jedem Wärmeabnehmer (Kondensator) eine Kondensatrückfördereinrichtung.
- Der Druckverlust auf der Dampfseite ist in der Regel deutlich grösser als auf der Wasserseite.
- Für die Kondensatabscheidung sind kostenintensive Vorrichtungen notwendig.

4.2.2 Heisswasser-Verteilung

Die Gestaltung der zweiten Generation von Fernwärmenetzen ist der ersten Generation ähnlich bis auf den Unterschied, dass im Vorlauf Wasser statt Dampf als Wärmeträgermedium genutzt wird. Die Verlegung der Rohre erfolgt ebenfalls in Kanälen. Zu Beginn der Fernwärmeversorgung mit Dampf wurden die Kanäle noch gemauert und oft begehbar ausgeführt. Später wurden die Kanäle viel kompakter in Beton ausgeführt wie in Bild 4.1 dargestellt ist. Begehbare Energiekanäle (z.B. Tunnel) werden auch heute noch eingesetzt, zum Beispiel in grossen Städten, wo neben der Fernwärme auch

Fernkälte, Wasser und andere leitungsgebundene Energieträger geführt werden.

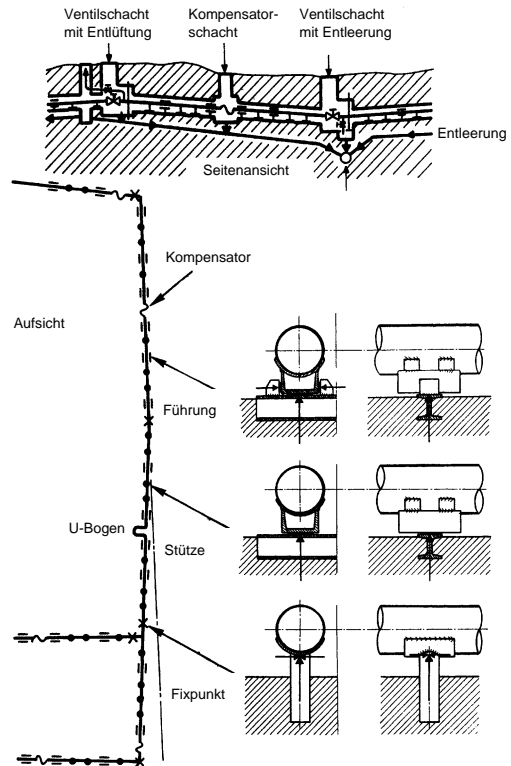


Bild 4.2 Zweite Generation der Wärmeverteilung: Heisswasser-Verteilung im Betonkanal [3].

Vorgefertigte Betonkanäle beschleunigen die Verlegung, wobei Ventil- und Kompensationsschächte vielfach noch vor Ort betoniert werden müssen. Die Wärmedämmung wird in Form von Mineralwolle direkt vor Ort angebracht. Voraussetzung für eine funktionierende Wärmedämmung ist, dass die Mineralwolle trocken bleibt, was im Falle von Kondensation in den Kanälen und Undichtigkeiten nicht immer gewährleistet werden kann, da die Wärmedämmung nicht vor Feuchtigkeit geschützt wird.

Damit die starren Rohrleitungen unter der thermischen Expansion und Kontraktion keinen Schaden nehmen, werden die Rohre in sogenannten Festpunkten fixiert. Zwischen diesen Festpunkten müssen die Rohrleitungen gestützt und geführt werden. Eine weitere Möglichkeit der thermischen Kompensation bieten metallische Balgenkompensatoren oder die Verlegung mit U-Rohr wie in Bild 4.2 dargestellt.

Die Erfahrungen zeigen, dass sorgfältig geplante und betriebene Fernwärmenetze der zweiten Generation immer noch betrieben werden und einwandfrei funktionieren.

4.2.3 Warmwasser-Verteilung

Die teure und zeitintensive Bauweise von Rohrleitungen in Betonkanälen war der Hauptgrund für die Weiterentwicklung der Rohrleitungen und der Verlegungsmethode von der Betonkanal-Verlegung zur Erdverlegung.

Zwischen der zweiten und der dritten Generation gab es zwei Zwischenschritte, die schliesslich zur dritten Generation führten (Bild 4.1, dritte und vierte Grafik von oben). Der erste Schritt war eine Modifikation bei der Kanalverlegung, wo verschiedene Füllmaterialien als Wärmedämmung getestet wurden. Der zweite Schritt betrifft die Entwicklung von direkt im Erdboden verlegten Kunststoffmantelrohren mit einem Spalt zwischen Wärmeträgerrohr und Wärmedämmung zur Kompensation der thermischen Ausdehnung. Diese zwei Entwicklungsschritte haben sich nicht durchgesetzt, weil die Kosten zu hoch waren oder die Methode Mängel aufwies wie etwa Korrosion der Wärmeträgerrohre aus Stahl infolge von Feuchtigkeit.

Aufgrund dieser Erfahrungen wurden schliesslich die Kunststoffmantelrohre weiterentwickelt, bei denen das Wärmeträgerrohr mit der Wärmedämmung und diese mit dem Mantelrohr fest verbunden sind (Bild 4.3). Damit konnte das Korrosionsproblem weitgehend gelöst werden. Kunststoffmantelrohre werden fertig vorgefertigt und können somit direkt verlegt werden. Die Ausführung erfolgt starr (als Stangen) oder flexibel (als Rollen und Stangen).



Bild 4.3 Dritte Generation der Wärmeverteilung:
Starres Kunststoffverbundmantelrohr (KMR)
Quelle: Brugg Rohrsystem AG

Als Material für die Wärmeträgerrohre kommen je nach Einsatzzweck Stahl, Nichteisenmetalle und Kunststoffe zum Einsatz. Die Wärmedämmung besteht heute aus einem Polyurethan-Hartschaum (PUR), der mit einem langzeitbeständigen und umweltfreundlichen Treibgas geschäumt wird und sehr gute Dämmeigenschaften aufweist. Das Mantelrohr muss gegen praktisch alle im Erdboden vorkommenden chemischen Verbindungen resistent und dabei gleichzeitig schlagfest und bruchstark sein. Dazu werden nahtlos extrudierte Rohre aus hochverdichtetem Polyethylen (PEHD) eingesetzt.

Sowohl starre als auch flexible Rohre werden in einfacher und mehrfacher Ausführung (z.B. Doppelrohr) angewendet. Bei mehrfacher Ausführung werden in einem Mantelrohr zwei oder mehrere Wärmeträgerrohre geführt.

Flexible Rohre sowie Mehrfach-Rohre werden jedoch nur in einem kleinen Durchmesserbereich angeboten (siehe Kapitel 4.3.1.6).

Eine Besonderheit der dritten Generation der Wärmeverteilung ist, dass neben der vereinfachten Verlegungsmethode direkt im Erdboden auch weniger Komponenten zur Kompensation der thermischen Ausdehnung eingesetzt werden. Während metallische Balgenkompensoren praktisch nicht mehr eingesetzt werden, wird die Elastizität der Rohre zur thermischen Kompensation genutzt und durch zusätzliche Bögen (Richtungsänderungen) im Trasse unterstützt.

Ein weiteres Merkmal der dritten Generation ist die Möglichkeit der Warnung bei Leckage. Die Methode ermöglicht nicht nur die Indikation einer Leckage sondern auch eine auf wenige Meter genaue Ortung.

4.2.4 Niedertemperatur-Verteilung

Für die Verteilung von Wärme auf tiefem Temperaturniveau werden auch Begriffe wie „LowEx-Fernwärme“, „Anergie-Netze“ oder „kalte Fernwärme“ verwendet und sie kann Teil sein einer weitergehenden Vernetzung, die auch als „thermische Arealvernetzung“ beschrieben wird. Die Wärmeverteilung bei tiefer Temperatur kann anstelle eines klassischen Fernwärmenetzes oder in Ergänzung dazu erfolgen. Obwohl bereits einige Anwendungen existieren, ist diese weitere Anwendung, die auch als vierte Generation bezeichnet wird und in Bild 4.4 dargestellt ist, noch im Entwicklungsstadium. Verfolgt werden damit unter anderem folgende Ansätze:

- eine erweiterte Anwendung von Fernwärme auf tiefem Temperaturniveau
- eine Wärmeverteilung auf tiefer Temperatur zur Speisung von dezentralen Wärmepumpen
- die Vernetzung von Energieerzeugung, Energieverteilung und Energieverbrauch
- Zweiweg-Fernwärme, bei welcher die Wärmeabnehmer gleichzeitig als Energieproduzenten in Erscheinung treten.

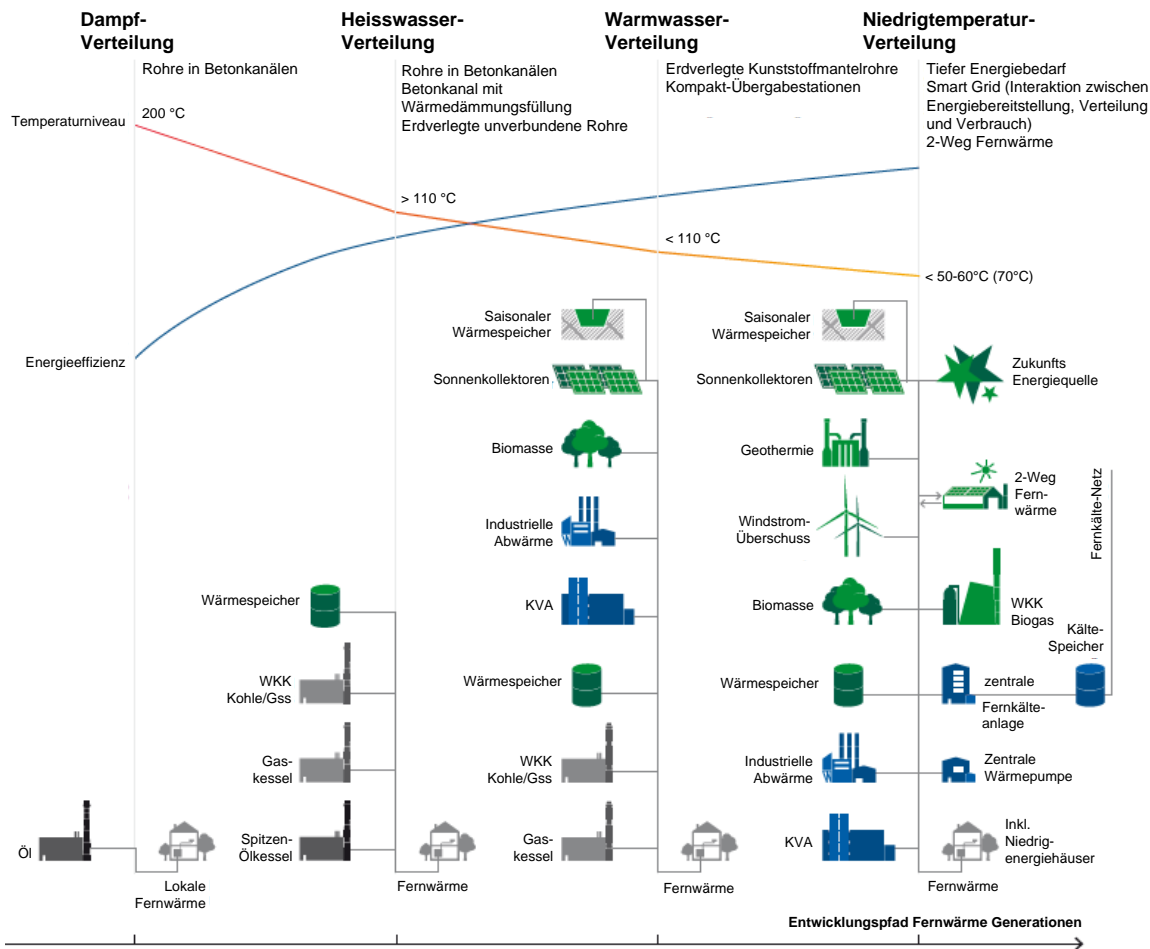


Bild 4.4 Entwicklungspfad der Fernwärme in vier Generationen mit zunehmendem Angebot an Energiequellen und steigender Komplexität bei sinkendem Temperaturniveau des Vorlaufs und zunehmender Energieeffizienz (adaptiert nach [42]).

4.3 Komponenten

4.3.1 Rohrsysteme

Die Wahl des Rohrsystems und der geeigneten Verlegetechnik hängt neben der Netztemperatur und dem Netzdruck von Anforderungen ab, die weitgehend von den Standortbedingungen bestimmt werden. Diese sind:

- Werkleitungen
- Umgebung
- Bauten
- Strassen
- Gleise
- Unterquerungen
- Grundwasser
- Bodenbeschaffenheit
- Baumbestand

Kunststoffverbundmantelrohrre (KMR) sind aufgrund der Standardisierung, der Robustheit und des geringen Materialpreises das meistverlegte Rohrsystem. Daneben

kommen hauptsächlich im Bereich der Unterverteilung und Hausanschlussleitungen auch flexible Rohrsysteme wie Kunststoffmediumrohr (PMR) und Metallmediumrohr (MMR) zum Einsatz. Weitere Rohrsysteme sind Stahlmantelrohrre und GFK-Rohre.

4.3.1.1 Kunststoffverbundmantelrohr (KMR)

Die Kunststoffverbundmantelrohrre (KMR) sind die am häufigsten eingesetzten Fernwärmeleitungen. Aufgrund ihrer hohen Druck- und Temperaturbeständigkeit können sie in vielen Situationen eingesetzt werden. Die starren KMR bestehen aus einem Stahlmediumrohr, das mit einer Dämmschicht aus Polyurethan-Hartschaum (PUR) verbunden ist. Das Mantelrohr ist aus hochverdichtetem Polyethylen (HDPE) (Bild 4.3). Die einzelnen Materialien sind kraftschlüssig miteinander verbunden. Es handelt sich somit um ein nicht selbstkompensierendes Rohrsystem, weshalb die Wärmedehnung auf das Gesamtrohrsystem übertragen wird.

Die maximale Dauerbelastung für eine Lebensdauer von 30 Jahren wird gemäss SN EN 253 [96] bis zu einer Temperatur von 120°C sicher gewährleistet. Laut Herstellerangaben werden Dauerbetriebstemperaturen bis

140°C bei einem Druck bis 25 bar garantiert. In diesem Fall müssen die Hersteller die thermische Lebensdauer von 30 Jahren nach Anhang C von SN EN 253 [96] prüfen.

Um die damit auftretenden Spannungen und Dehnungen aufzunehmen sind eine aufwändige Rohrnetzstatik und geeignete Kompensationsmassnahmen notwendig. Je nach Anforderungsprofil werden KMR mit und ohne Vorwärmung, mit Einmal- und Dauerkompensatoren oder kalt verlegt. Ziel der Verlegemethoden ist, die Wärme- dehnung der Stahlleitungen aufzunehmen, so dass die zulässigen Spannungen im Stahlrohr nicht überschritten werden. Die Verlegeart muss in Zusammenhang mit Auslegung und Trassierung sowie der Berechnung der Rohrnetzstatik erfolgen. Das AGFW-Arbeitsblatt FW 401 [100] bietet eine vereinfachte Planung der Rohrnetzstatik an, indem es eine korrekte Auslegung mittels Diagrammen ermöglicht und der detaillierte rechnerische Nachweis auf wenige Spezialfälle reduziert wird. Zugleich wird die Kaltverlegung der Rohrleitungen bis DN400 statisch zugelassen.

Bei einer komplizierten Trassenführung und erschwerten Bedingungen (Werkleitungen, etc.) sind z.T. viele Formstücke erforderlich, was die Verlegung relativ teuer macht. Da die Materialkosten jedoch niedrig sind und eine hohe Betriebssicherheit erzielt wird, haben sich KMR insbesondere bei grösseren Durchmessern ab DN 100 weitgehend als Standardlösung durchgesetzt.

Der Rohrleitungsbau erfolgt in der Regel durch verschweissen der einzelnen Rohre miteinander. Dies erfordert neben zertifizierten Schweisser auch einen nicht zu unterschätzenden Aufwand zur Prüfung der Schweissnähte (Röntgen und Druckprüfung). Als Alternative zum Schweissen können die Rohre bei geringen Nennweiten (bis DN 100) auch mit Pressverbindungen (z.B. System Haelok) miteinander verbunden werden.

4.3.1.2 Kunststoffmediumrohr (PMR)

Flexible Kunststoffmediumrohre (PMR) bestehen aus einem Mediumrohr aus vernetztem Polyethylen (PEX) oder Polybuten (PB). Die Wärmedämmung und der Mantel sind ähnlich wie bei KMR ausgeführt. Die Mediumrohre aus PEX und PB weisen eine Diffusionssperre für Sauerstoff auf.

Die Einsatztemperatur ist bei maximal 95°C begrenzt und die Druckgrenze beträgt 6 bar (Heizung) sowie 10 bar (Sanitär, Trinkwasser). Für eine Lebensdauer von 30 Jahren beträgt die Dauerbetriebstemperatur 80°C und der maximale Druck 6 bar. Bei einer Begrenzung auf 70°C und 6 bar verlängert sich die theoretische Standzeit auf 50 Jahre, während ein Dauerbetrieb bei der Temperaturobergrenze von 95°C die Lebenserwartung wesentlich verkürzt.

Die Verbindung einzelner Rohrabschnitte erfolgt mittels Presskupplungen, die mit Spezialwerkzeugen montiert werden. Für Rohre aus Polybuten (PB) besteht auch die Möglichkeit, die Rohre zu verschweissen. Hausanschlüsse werden mit T-Stücken realisiert. Spätere Anschlüsse können jedoch nur durch Einfrieren oder Ab-

quetschen der Leitung ausgeführt werden, während ein Anbohren wie bei KMR nicht möglich ist. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, T-Stücke für mögliche spätere Anschlüsse bereits von Beginn weg einzubauen.

Der Einsatz von PMR ist wegen der begrenzten Betriebsparameter von Temperatur und Druck auf kleine bis mittlere Fernwärmenetze beschränkt. Ein Vorteil gegenüber KMR ist die einfache Trassenführung, die den lokalen Gegebenheiten wie Topografie, Spartenquerung oder Fremdleitungen angepasst werden kann. Im Vergleich zu den nachfolgend beschriebenen Metallmediumrohren (MMR) sind PMR kostengünstiger sowie einfacher zu biegen und sie ermöglichen auch engere Radien. Zudem sind die Anforderungen an das Bau- und Montagepersonal niedriger.

Wegen dieser Vorteile werden PMR den MMR meistens vorgezogen, sofern die niedrigere Druck- und Temperaturbeständigkeit dies zulassen. Nachteilig sind jedoch die relativ teuren Formstücke, die aufwändige Technik des nachträglichen Anschliessens, dass keine Leckagewarnsysteme angeboten werden und die höheren, mit dem Durchmesser überproportional ansteigenden Materialkosten aus.

4.3.1.3 Metallmediumrohr (MMR)

Um die Flexibilität von Metallmediumrohren (MMR) zu gewährleisten, werden die Rohre meist aus einem gewellten Kupfer- oder Stahlrohr oder bei kleinen Rohrdurchmessern auch aus weichgeglühten geraden Stahl- oder Kupferrohren ausgeführt. Die Wärmedämmung und der Mantel sind wie bei KMR ausgeführt.

MMR können im Dauerbetrieb bis zu einer Temperatur von 160°C und einem Druck von 25 bar eingesetzt werden.

Die Wellrohrsysteme sind vollständig selbstkompensierend und werden bis DN 150 als Rollen angeboten. Die Geradrohrsysteme sind eingeschränkt selbstkompensierend und werden nur für kleine Durchmesser als Rollenware produziert, da sich das Rohr bei grösseren Durchmessern zu stark verformt wird. Beide Systeme erfordern somit keine Massnahmen zur Kompensation und ermöglichen eine flexible Trasseführung. MMR werden daher bevorzugt für Hausanschlussleitungen eingesetzt, da dort die Flexibilität besonders vorteilhaft ist und keine Formstücke oder Abzweiger benötigt werden.

An den Tiefbau werden dieselben Anforderungen gestellt wie bei der Verlegung von PMR. Wegen des erhöhten Kraftaufwands zum Biegen und wegen des höheren Gewichts ist die Verlegung jedoch aufwändiger.

Das Wellenprofil verursacht einen erhöhten Druckverlust, weshalb bei gewellten Rohren zum Teil eine Nennweite grösser ausgelegt werden muss als mit glatten Rohren. Ein weiterer Nachteil ist der nachträgliche Anschluss, welcher nur durch den Einsatz zusätzlicher T-Stücke möglich ist und diese können nur eingebaut werden, wenn das Netz ausser Betrieb ist. Von Vorteil sind jedoch die einfache Verlegung und das geringe Tiefbauvo-

lumen. Da flexible MMR höhere Kosten als flexible PMR verursachen, werden sie nur dann eingesetzt, wenn die höhere Druck- und Temperaturbeständigkeit erforderlich ist.

4.3.1.4 Glasfaserverstärktes Kunststoffrohr (GFK-Rohr)

Ein GFK-Rohr besteht aus einem starren glasfaserverstärkten Epoxidharz-Rohr. Dieses ist wie bei KMR mit einer Dämmschicht aus PUR und einem PE-Mantel versehen. GFK-Rohre sind leicht und ihr Hauptvorteil ist die Korrosionsbeständigkeit, weshalb GFK-Rohre vor allem für korrosive Medien wie geothermisches Quellwasser eingesetzt werden. Die Belastungsgrenze liegt bei 160°C und 16 bar.

Die Verbindung der einzelnen Rohre und der Formstücke erfolgt durch Verkleben. Nachträgliche Anschlüsse können nur bei entleerter Leitung ausgeführt werden, wobei T-Stücke eingesetzt oder das Hauptrohr mit einer Manschette verstärkt und angebohrt wird. Im Vergleich zu KMR ist die Rohrnetzstatik einfacher zu beurteilen. Bei Richtungswechseln müssen je nach Rohrlänge Widerlager aus Beton ausgeführt werden. Daneben sind der Tiefbau und die Abmessungen des Grabens vergleichbar wie bei KMR. Wegen des hohen Materialpreises werden GFK-Rohre nur bei besonderen Anforderungen und insbesondere für korrosive Medien eingesetzt.

4.3.1.5 Stahlmantelrohr (SMR)

Bei Stahlmantelrohren (SMR) wird im Gegensatz zu KMR auch das Mantelrohr aus Stahl ausgeführt. Dies ermöglicht Temperaturen von bis zu über 300°C und Drücke von bis zu 64 bar. Da SMR hohe Kosten verursachen, kommen sie nur in sehr grossen Wärmenetzen mit hohen Temperaturen oder für industrielle Zwecke zum Einsatz. Die Wärmedämmung erfolgt hauptsächlich durch ein im Zwischeraum zwischen Mantelrohr und Medienrohre erzeugtes Vakuum. Zudem wird eine Schicht aus Mineralfaser eingesetzt zur Reduktion der Strahlung. Die Vakuumdämmung ermöglicht deutlich geringere Wärmeverluste als bei anderen Systemen. Die einzelnen Rohrabschnitte werden verschweisst und das Vakuum im Zwischenraum kann zur Erkennung von Undichtigkeiten am Innen- oder Mantelrohr überwacht werden..

4.3.1.6 Doppelrohrausführung

Für die Rohrsysteme KMR, MMR und PMR sind im unteren Nennweitenbereich auch Doppelrohrausführungen (auch Duo-Rohr genannt) erhältlich (Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2). Für spezielle Anwendungen kann das Stahlmantelrohr in Doppel- oder Mehrfachrohrausführung ausgeführt werden. Doppelrohr- und Mehrfachrohrsysteme haben folgende Vorteile gegenüber Einzelrohrsystemen:

- niedrige Verlegekosten (geringere Grabenbreite)
- geringere spezifische Wärmeverluste
- halbierte Anzahl Muffenverbindungen

- halbierte Anzahl Kernlochbohrungen und Mauerdichtungen für die Hauseinführung
- geringere Anzahl Dehnschenkel

Demgegenüber ist durch eine Wärmedämmung im Doppelrohr sicher zu stellen, dass die Wärmeübertragung vom Vorlauf auf den Rücklauf gering gehalten wird und die Rücklauftemperatur nicht unzulässig erhöht wird. Doppelrohre mit MMR oder PMR eignen sich besonders für das Verlegen von Haus zu Haus, da keine Abzweiger im Erdreich realisiert werden müssen.

Beim Einsatz von Doppelrohren mit KMR müssen die Abzweigungen genau bekannt sein, damit die erforderlichen Formstücke eingesetzt werden können. Ein nachträglicher Einbau einer Abzweigung ist mit hohem Aufwand verbunden. Die Leitungsführung muss präzise ausgehoben werden, da KMR-Doppelrohre sehr steif sind. Ideal ist eine horizontale Leitungsführung, da das Verlegen dadurch um einen Freiheitsgrad eingeschränkt wird. Neigungsunterschiede erfordern ebenfalls genau gefertigte Formstücke. Interessant sind KMR-Doppelrohre bei geraden Transportleitungen ohne Abzweiger und konstanter Neigung des Leitungstrasses. Bei Unterstossungen (speziell bei grösseren Distanzen) kann ein Doppelrohr mit geringem Durchmesser verlegt werden.

4.3.1.7 Auswahl des Rohrsystems

Bei der Realisierung eines Wärmeverbundes mit Wärmezentrale und Fernwärmenetz machen die Investitionskosten des Netzes oft mehr als 50 % und damit den Hauptteil der Gesamtkosten aus. Für die Wirtschaftlichkeit ist deshalb eine Kostenoptimierung des Fernwärmenetzes entscheidend, wozu die aus der Investition resultierenden Kapitalkosten und die im Betrieb anfallenden Betriebskosten zu berücksichtigen sind. In einem ersten Schritt sind dazu mögliche Versorgungsgebiete zu definieren und zusammen mit möglichen Standorten für die Wärmezentrale geeignete Varianten zu definieren. Aufgrund einer entsprechenden Vorauswahl für die Randbedingungen des Netzes kommt anschliessend der Auswahl und der Auslegung des Rohrleitungssystems eine zentrale Rolle zu. Die Hauptkriterien zur Auswahl des Rohrsystems oder der in einem Netz zu kombinierenden Rohrsysteme sind folgende Parameter:

- a) Betriebstemperatur
- b) Betriebsdruck (statische und dynamische Drücke)
- c) Leckageüberwachung
- d) Wärmeverlustkosten
- e) Abnehmerdichte
- f) Angebot an Nennweiten, insbesondere maximaler Rohrdurchmesser
- g) Art der Tiefbauverlegung
- h) Platzverhältnisse im Tiefbau
- i) Ausbauvorhaben

Zu a: Die Maximale **Betriebstemperatur** eines Fernwärmenetzes bestimmt, ob kostengünstige PMR infrage kommen oder Stahlmediumrohre eingesetzt werden müssen. Bei einem Betrieb bis zu der von den Herstellern angegebenen Dauerbetriebstemperatur wird eine Lebensdauer von mindestens 30 Jahren gewährleistet.

Zu b: Der maximale **Betriebsdruck** in einem Fernwärmenetz hängt von den Druckverlusten im Netz (die von den Netzpumpen aufgebracht werden müssen) und von der Topografie (Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Punkt im Fernwärmenetz) ab. Daraus können die Werkstoffauswahl und die auszuwählende Druckstufe abgeleitet werden. Grundsätzlich können in einem Netz auch unterschiedliche Druckstufen zum Einsatz kommen. Zur Klärung, ob dadurch Kostensparnisse erzielt werden, sind die möglichen Betriebsfälle zu vergleichen.

Zu c: Die Möglichkeit der **Leckageüberwachung** muss mit der Auswahl des Rohrleitungssystems getroffen werden.

Zu d: Die Auswahl der **Dämmstärke** der Wärmedämmung ist anhand einer Wirtschaftlichkeitsberechnung zu

klären, wobei die Kapitalkosten bei verschiedenen Dämmstärken den Wärmeverlustkosten gegenüberzustellen sind. Die Bewertung ist damit unter anderem abhängig von der kalkulatorischen Nutzungsdauer und dem Kapitalzins sowie den Wärmegestehungskosten.

Zu e: Die **Abnehmerdichte** und somit die Anzahl der Abzweigungen im Fernwärmenetz kann einen Einfluss auf die Wahl des Rohrsystems haben, da zum Beispiel Doppelrohrsysteme und flexible Rohrsysteme wegen der aufwändigen Verbindungssystemen vorwiegend bei einer grossen Anzahl von Abzweigen unvorteilhaft sind.

Zu f: Es ist darauf zu achten, dass einzelne Rohrsysteme nur einen begrenzten Bereich an Rohrdurchmessern abdecken und insbesondere der **maximale Rohrdurchmesser** limitiert sein kann.

Zu g: Bei der **Verlegung** ist grundsätzlich zwischen unterschiedlichen Methoden zu unterscheiden. Die Verlegungsmethoden sind auf die Einsatzmöglichkeit des jeweils ausgewählten Rohrsystems zu untersuchen und gegebenenfalls sind Änderungen vorzusehen.

Zu h: Sollte bereits im Vorfeld bekannt sein, dass die **Platzverhältnisse im Tiefbau** (insbesondere bei erdverlegten Systemen) Einschränkungen unterliegen, muss dies in Bezug auf das ausgewählte Rohrsystem geprüft werden.

Zu i: Bei der Auswahl des Rohrleitungssystems muss der Endausbau eines Projektes betrachtet werden, da sich die vorgenannten Parameter im Laufe des **Netzausbaus** verändern können. So könnte zum Beispiel ein Fernwärmenetz aufgrund steigender Abnehmerzahl oder unerwarteter Verdichtung später mit höheren Temperaturen und Drücken betrieben werden.

Die Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht zu den einzelnen Rohrsystemen.

In der Tabelle 4.2 sind die standardmässig verfügbaren Nenndurchmesser für die Rohrsysteme KMR, MMR und PMR einiger Lieferanten aufgelistet.

Tabelle 4.1 Übersicht der Rohrsysteme.

Rohrsystem	Anwendungsbereich				Lieferbare Längen		Doppelrohr-Ausführung bis DN	Besonderheit
	maximal zulässige Betriebstemperatur	Dauerbetriebs-temperatur	Nenndruck PN	Nenndurchmesser DN	Stangen	Rollen		
	°C	°C	bar	-	m	m	-	-
KMR	160	bis 140	25	20–1000	6/12/16*	–	DN150	Aufgrund der Standardisierung und der Robustheit das am häufigsten eingesetzte Rohrsystem
MMR	180	bis 160	25	20–150	12*	bis 1000	DN50	Relativ teuer → gerechtfertigt wenn die Verlegebedingungen es notwendig machen
PMR	95	80	6	20–150	12*	bis 780	DN50	Relativ günstig → eingeschränkte Druck- und Temperaturbeständigkeit
GFK	160	160	16	25–1000	6*	–	–	Relativ teuer → nur bei besonderen Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit
SMR	400	400	bis 64	25–1200	16*	–	**	Relativ teuer → nur wenn die Druck-, Temperatur- oder Verlegebedingungen es notwendig machen

*Standardlänge/n, andere Längen auf Anfrage lieferbar. ** Sonderausführungen auf Anfrage möglich (z.B. Mehrfachrohrausführung)

Tabelle 4.2 Standardmässig verfügbare Nenndurchmesser (grau hinterlegt) für die Rohrsysteme KMR, MMR, und PMR mit Angaben zu Dämmstärke und Angebot zu Duo-Rohr-Ausführung. Die Zusammenstellung umfasst Angebote der folgenden Firmen: Brugg pipesystems, Isoplus und Logstor.
 KMR: Kunststoffverbundmantelrohr; MMR: Metallmediumrohr; PMR: Kunststoffmediumrohr.
 DS: Dämmstärken bei KMR, aufsteigend in der Stärke von 1 nach 3.
 S: Standard Dämmung bei MMR und PMR; V: Verstärkte Dämmung bei MMR und PMR.

DN	KMR			KMR-Duo			MMR		MMR-Duo		PMR		PMR-Duo	
	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3	S	V	S	V	S	V	S	V
20														
25														
32														
40														
50														
65														
80														
100														
125														
150														
200														
250														
300														
350														
400														
450														
500														
600														
700														
800														
900														
1000														

4.3.2 Leckageüberwachung

Fernwärmenetze können je nach Verlegetechnik und Rohrsystem mit oder ohne Einrichtungen zur Leckageüberwachung ausgeführt werden. Die elektrische Überwachung wird bei **Kunststoffmantelrohren** (KMR und MMR) in grossem Umfang eingesetzt und gilt als Stand der Technik [5]. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass eine kontinuierliche Überwachung mit zentraler Leckortung die Versorgungssicherheit eines Netzes erhöht und dadurch eine zeitliche und wirtschaftliche Beeinträchtigung durch Schäden klein gehalten werden. Aus diesem Grund wird grundsätzlich eine Einrichtung zur Leckageüberwachung empfohlen. Die Überwachung des Fernwärmenetzes sollte kontinuierlich von dafür vorgesehenen Messpunkten erfolgen.

Mittels **Thermografie** können Leckagen ebenfalls geortet werden. Diese Methode wird angewendet, wenn keine elektrische Überwachung beim Bau der Fernwärmeleitung mit eingebaut wurde.

Bei der **Kanalverlegung** wird die visuelle Schachtkontrolle als ausreichend angesehen, gegebenenfalls sind automatische Einrichtungen zur Schachtüberwachung zu verwenden. Freileitungen werden in der Regel ohne Überwachungssysteme betrieben.

Die heute angewandten **Leckageüberwachungssysteme** messen entweder den elektrischen Widerstand der Wärmedämmung zwischen zwei Adern oder zwischen einer Ader und dem Mediumrohr. Bei einer Durchfeuchtung der Wärmedämmung oder des Indikators sinkt der Widerstand. Durch die Verwendung von zwei Adern kann eine Überwachungsschleife gebildet werden. Die Überwachung dieser Schleife stellt sicher, dass der ganze Kreis überwacht wird. Bei der Auswahl des Leckageüberwachungssystems sollte darauf geachtet werden, dass das Messprinzip eine frühe Erkennung von Schäden (Feuchtigkeitseintritt in die Dämmung aufgrund von Schäden am Aussenmantel oder am Mediumrohr der Fernwärmerohre) sowie eine genaue Ortung dieser ermöglicht, damit frühstmöglich mit den Instandhaltungsarbeiten begonnen werden kann.

4.3.2.1 Überwachungssysteme

Die Überwachung eines Netzes auf Leckage kann folgendermassen erfolgen, wofür digitale oder analoge Messgeräte eingesetzt werden:

- **Zentrale Überwachung:** Alle Daten und Werte der Überwachung und mehrerer Überwachungskreise werden an einem zentralen Ort erfasst.
- **Dezentrale Überwachung:** Überwachungsgeräte sind vor Ort in den Überwachungskreisen installiert. Die Daten werden entweder in einem periodischen Turnus abgefragt oder die Alarmer werden übertragen.
- **Manuelle Überwachung:** Im festgelegten Turnus werden die momentanen Zustandswerte durch transportable Überwachungsgeräte überprüft.

Bei den nachfolgend beschriebenen Überwachungssystemen ist mit System die in der Dämmung des Fernwärmerohres verwendeten Adern (Kabel) gemeint.

Brandes-System (NiCr-Ader)

Das sogenannte Brandes-System besteht aus zwei sich nicht berührenden Adern. Einer Sensorader mit perforierter Isolation aus NiCr (80 % Ni und 20 % Cr) und einer vollisolierten Rückführader aus Kupfer. Die Perforation erlaubt es, Feuchtigkeit im Schaum zu detektieren. An jedem Rohrende werden die beiden Adern verbunden und es wird so eine Überwachungsschleife gebildet. Der hohe Widerstand der Fühleradern hat den Vorteil, dass daraus ein direkter Rückschluss auf die angeschlossene Rohrlänge bzw. Fühleraderlänge gemacht werden kann, womit eine präzise Ortung von Feuchtestellen möglich ist. Ein weiterer Vorteil liegt in der einheitlichen Anwendung und Verdrahtung der Adern durch alle Hersteller und Lieferanten von Fernwärmerohren.

Nordisches-System (Kupferadern)

Das sogenannte Nordische-System verwendet zwei sich nicht berührende Kupferadern. Diese können je nach Lieferant unterschiedlich ausgebildet sein. Es sind blanke, verzinnete und isolierte Adern im Einsatz. In den letzten Jahren hat sich die Anwendung von zwei blanken Adern mehrheitlich durchgesetzt (verzinnete Adern gelten ebenfalls als blank). Ein wesentlicher Vorteil des nordischen Systems liegt in der günstigen Beschaffung der Adern. Ein Durchmischen der verschiedenen Aderntypen ist jedoch nicht zu empfehlen. Die Nachteile der Ortungsgenauigkeit von Feuchtestellen mit dem nachfolgend beschriebenen Widerstands-Referenz-Messverfahren können durch verlöten der Verbindungen im Rohrbereich praktisch eliminiert werden. Wie beim Brandes-System werden die Adern an allen Rohrenden miteinander verbunden um eine Überwachungsschleife zu bilden.

Hierarchische Systeme

Das sogenannte Indikator-System benutzt zwei isolierte und verdrehte Kupferadern in der Wärmedämmung. Als Sensoren werden an den Schweissstellen Indikatoren eingebaut, die zum Beispiel aus zwei in Kunststoffgittern gehaltenen und durch ein anorganisches Keramikvlies gegeneinander isolierten Kupferplättchen bestehen. Bei Auftreten von Feuchtigkeit sinkt der Isolationswiderstand des Keramikvlieses. Die Veränderung des Widerstands ist somit das Überwachungskriterium. Wenn die gesamte Rohrlänge kontrolliert werden soll, müssen entsprechende Überwachungsadern in die Wärmedämmung mit eingebaut werden, die Messungen sind dann allerdings nicht mehr potenzialfrei. Abzweige werden in diesem aus maximal vier Hierarchien bestehenden System über sogenannte Trennweichen angeschlossen. Die Anzahl der Abzweige ist in den einzelnen Hierarchien nahezu frei wählbar. Netzerweiterungen können ohne Eingriff in eine bestehende Anlage vorgenommen werden. Alle angeschlossenen Leitungen werden auf Feuchtigkeit überwacht und die Hauptleitung zusätzlich auf Drahtbruch. Es kann auch bei Mediumrohren verwendet werden, die nicht aus Metall bestehen. Als nachteilig zu betrachten sind die aufwendige Dokumen-

tation der verschiedenen Hierarchien, der Einsatz von elektronischen Komponenten (anfällig auf Überspannung) und dass die Rohre nur im Muffenbereich auf Feuchtigkeit überwacht werden.

4.3.2.2 Ortungsverfahren

Widerstands-Referenz-Messverfahren

Beim Widerstands-Referenz-Messverfahren (auch Widerstands-Messverfahren oder Widerstands-Vergleichs-Ortung genannt) erfolgt die Ortung einer Feuchtestelle nach dem Prinzip des unbelasteten Spannungsteilers und kommt hauptsächlich beim Brandes-System zur Anwendung. Kann aber unter Umständen auch beim nordischen System eingesetzt werden. Mit einer „Messbrücke“ werden die beiden Teilstrecken – Schleifenanfang bis Fehlerstelle und Schleifenende bis Fehlerstelle – miteinander verglichen und so eine prozentuale Lage des Fehlers ermittelt. Die Genauigkeit der Ortung steigt mit der Intensität der Feuchte und der abnehmenden Länge der Messstrecke. Der Nachteil ist, dass mehrfache Feuchteschäden in einer Messstrecke nicht als

Solche erfasst werden. In diesem Fall wird lediglich ein Mittelwert ausgegeben.

Impuls-Laufzeit-Messverfahren

Beim Impulslaufzeit-Messverfahren wird der Wellenwiderstand der Überwachungsadern genutzt, wie dies auch bei der Fehlerortung in der Kabeltechnik angewendet wird. Vom Ortungsgerät ausgehende Impulse werden an Stellen mit abweichendem „Widerstand“, also Durchfeuchtung oder Aderunterbrechungen unterschiedlich stark reflektiert. Als Mass für den Fehlerort gilt die Laufzeit, die der eingespeiste Impuls vom Leitungsauftrag bis zur Fehlerstelle benötigt. Dieses Verfahren benötigt zur Ortung einer Feuchtestelle eine deutlichere Durchnässung als das Widerstands-Referenz-Messverfahren. Das Impulslaufzeit-Messverfahren eignet sich gut zur Ortung von Aderunterbrüchen.

Die wichtigsten Eigenschaften der einzelnen Leckageüberwachungssysteme sind der Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Tabelle 4.3 Vergleich der Systeme zur Leckageüberwachung

Kriterien	Nordisches-System	Indikator-System	Brandes-System (NiCr)
Fühleradern	zwei sich nicht berührende und nicht isolierte Kupferadern	zwei isolierte und verdrehte Kupferadern mit Indikatoren als Sensoren an den Schweissstellen	eine Ader aus NiCr mit perforierter Teflonisolierung eine Ader aus Kupfer
Messverfahren	Impulslaufzeit-Messverfahren und Prinzip des unbelasteten Spannungsteilers	Impulslaufzeit-Messverfahren	Prinzip des unbelasteten Spannungsteilers und Impulslaufzeit-Messverfahren
Fehlererfassung	Feuchte in der Wärmedämmung Kurzschluss der Adern Aderunterbrechungen	Feuchte in den Indikatoren (je Schweissstelle bzw. Rohrabschnitt) Kurzschluss der Adern Aderunterbrechungen	Feuchte in der Wärmedämmung Kurzschluss der Adern Aderunterbrechungen
Anzeigetoleranz	1-3 % der Messstrecke (z.B. Überwachungsabschnitt) Die genügend genaue Ortung der Leckage erfolgt durch iterative Anpassung der Messstrecke.	< 1 m (je Indikator)	± 0.2 % der Messstrecke (z.B. Überwachungsabschnitt) Die genügend genaue Ortung der Leckage erfolgt durch iterative Anpassung der Messstrecke
Überwachungsmöglichkeit	Zentral Dezentral Manuell	Zentral Dezentral Manuell	Zentral Dezentral Manuell
Gleichzeitige Ortung mehrerer Schäden	unter Umständen möglich, bei Aufteilung der Schleife	möglich, bei Aufteilung 1. Fehler sichtbar in Hierarchie	unter Umständen möglich, bei Aufteilung der Schleife
Länge der Überwachungsabschnitte	von Geräten abhängig (bis 6'000 m Schleifenlänge möglich) empfohlene Überwachungsabschnitte von 800 -1'000 m Länge mehrere Schleifen zusammenschaltbar	hierarchische Unterteilung der Ortungsabschnitte, max. 4 Hierarchien (0-3) 0. Hierarchie 1000 m 1-3. Hierarchie 1000 m Anzahl Abzweige pro Hierarchie nicht begrenzt	von Geräten abhängig (bis 1'500 m Schleifenlänge möglich) empfohlene Überwachungsabschnitte von 800 -1'000 m Länge mehrere Schleifen zusammenschaltbar

4.3.2.3 Dokumentation und Prüfung

Dokumentation

Für die optimale Nutzung einer Überwachungs- und Ortungsanlage ist eine ausführliche und auf den aktuellen Stand nachgeführte Dokumentation über das Fernwärmenetz zwingend erforderlich. Diese umfasst idealerweise auch die Stromlauf- und Verdrahtungspläne, Schleifenpläne, Angaben über Lage und Anordnung von Sensoren und anderen Bauteilen sowie das Abnahmeprotokoll mit Angaben über Prüfungen und Messungen. Es ist darauf zu achten, dass die verschiedenen verwendeten Rohrtypen ersichtlich sind.

Prüfung

Nach dem Verbinden der Leckwarndrähte im Zuge der Herstellung der Muffenverbindungen sind die Fühler Schleifen auf Länge, Unterbrechung, metallischen Kontakt und Fremdspannungen mittels eines Montageprüfgerätes zu überprüfen. Eine Isolationsprüfung sollte etwa vier Wochen nach der Inbetriebnahme der Fernwärmeleitung wiederholt werden. Der Isolationswiderstand der verlegten Rohre sollte im Mega-Ohm-Bereich liegen.

4.3.3 Armaturen

Armaturen werden als Absperrungen eingebaut. So kann bei späteren Netzerweiterungen und eventuell notwendigen Reparaturen die Unterbrechung des Netzbetriebs eingegrenzt werden. Weiterhin werden Armaturen zum Entleeren und Entlüften der Leitungen eingesetzt. Folgende Anforderungen werden an die Absperrarmaturen gestellt [5]:

- Geringer Druckverlust
- Dichter Abschluss in beide Richtungen
- Dichtheit der Gehäusedurchführungen
- Geringer Wartungsaufwand
- Geringer Platzbedarf
- Geringe Fliessgeräusche
- Austauschbarkeit
- Dämmbar (thermisch)
- Zähigkeit des Gehäusewerkstoffes
- Funktionalität auch bei seltener Anwendung

Einzelne Anforderungen beeinflussen sich gegenseitig, sodass nicht alle gleichzeitig erfüllt werden können und die wichtigsten Kriterien nach Bedarf festgelegt werden müssen. Zu beachten ist, dass Absperrarmaturen für Regelzwecke ungeeignet sind.

Armaturen können störende Geräusche verursachen. Zu ihrer Unterdrückung gibt es in der VDI-Richtlinie 3733 [91] eine Reihe von Hinweisen. Bei voll geöffneter Armatur ist in der Regel die Geräusentwicklung zu vernachlässigen, solange bestimmte Strömungsgeschwindigkeiten nicht überschritten werden.

In Fernwärmeanlagen werden die vier Grundtypen Schieber, Ventile, Hähne und Klappen eingesetzt. Sie können in Bezug auf ihr Gehäuse in gegossener, geschmiedeter oder geschweisster Ausführung hergestellt werden. Je nach Druck- und Temperaturverhältnissen ist die Verwendung zäher Werkstoffe unabdingbar. Die Armaturen werden entweder durch Einschweißen oder mit Flanschverbindungen in die Leitung gebaut.

4.3.3.1 Schieber

Aus den verschiedenen Konstruktionsmerkmalen ergeben sich die in Tabelle 4.4 dargestellten Bezeichnungen für Absperrschieber.

Tabelle 4.4 Schieberbauarten [5].

Merkmal	Bezeichnung
Absperelement	Keilschieber
	Doppelplattenschieber
	Keilplattenschieber
	Scheibenabschlusschieber
Form des Deckelstutzens / Gehäuse	Flachschieber
	Ovalschieber
	Rundschieber

Für höhere Drücke und Temperaturen ist der starre Keil ungeeignet. Schieber mit elastischem Keil oder Keilplatten sind für alle Belastungen anwendbar. Parallelschieber sind mit geteilten und ungeteilten Abschlussplatten erhältlich. Schieber mit ungeteilten, parallelen Abdichtflächen finden in Fernwärmeleitungen keine Anwendung. Wohingegen bei geteilten Abschlussplatten mit Spreizkeilen, die kurz vor Beendigung des Schliessvorgangs die Abschlussplatten auf das Gehäuse pressen, eher eingesetzt werden.

Ein weiteres wichtiges Element ist die Spindel, mit dem der Abschlusskörper betätigt wird. Entsprechend der Spindelbewegung ist eine Einteilung möglich, wie in Tabelle 4.5 dargestellt.

Werkstoffe für Schieber richten sich nach dem Einsatzbereich. Im Warmwasserbereich bis 110°C und 16 bar kann lamellarer Grauguss (GG) eingesetzt werden. Bei höheren Drücken und Temperaturen sollte Werkstoff mit höherer Zähigkeit wie Grauguss mit Kugelgraphit (GGG), Stahlguss oder Schmiedestahl verwendet werden.

In den meisten Fällen wirken auf die Armaturen ausser dem Innendruck auch noch Kräfte und Momente aus der Wärmedehnung der Rohrleitung. Diese Beanspruchungen sprechen für die Verwendung eines zähen Armaturenwerkstoffes. Die DIN 4757 fordert, dass die Gehäuse sämtlicher Armaturen in Heisswasser führenden Leitungen über DN 50 auch dann aus geeigneten Werkstoffen mit ausreichenden Zähigkeitseigenschaften sein sollen, wenn bei den gegebenen Betriebsbedingungen sonst Gusseisen oder Temperguss zulässig wäre.

Bei Einsatz von Stahlguss- oder Schweisskonstruktionen kann die Kraftaufnahme erheblich erhöht werden. Schieber bis etwa DN 250 werden vorzugsweise im Gesenk hohlgeschmiedet. Auch werden ab etwa DN 50 Schieber in Schweisskonstruktionen aus Stahlblech wegen ihrer guten Festigkeitseigenschaften angewendet. Schieber sollten aufgrund der Formgebung so steif sein, dass die Sitzflächen keine Verformungen durch Rohrleitungskräfte und Druckbeanspruchungen erleiden und die Dichtheit nicht beeinträchtigt wird.

Schieber für Fernwärmeleitungen weisen meist folgende Konstruktionsmerkmale auf:

- Flexibler Keil oder Doppelplattenkeil. Doppelplattenkeil ist unempfindlich gegen Verformung durch Kräfte und Momente aus der Rohrleitung. Er ist ausserdem reparaturfreundlich.
- Aussenliegende Spindel, wenn es der Platzbedarf zulässt. Aber auch innenliegende Spindeln sind gebräuchlich. Hierbei ist auf die Stopfbuchsabdichtung besonders zu achten. Eine innenliegende Spindel ist erst ab DN 200 sinnvoll.
- Metallische Dichtflächen.
- Leckrate 1 nach DIN 3230 Teil 3.
- Ausreichende Härte und Dicke der Panzerung auf den Dichtflächen.
- Möglichkeit des nachträglichen Einbaues eines Elektro-Antriebes.

Tabelle 4.5 Einteilung der Schieber nach der Spindelbewegung [5].

Kriterien	Innenliegende Spindel		Aussenliegende Spindel	
Bewegung der Spindel	Drehbewegung	Axiale Hubbewegung und Drehbewegung	Axiale Hubbewegung	
Bewegung des Handrades	nicht steigend	steigend	Nicht steigend	
Vorteil	Geringe Bauhöhe bei geschlossenem und geöffnetem Schieber. Keine Verschmutzung des Spindelgewindes	Einfache Bauart. Besserer Schutz des Spindelgewindes gegen strömendes Medium. Geringere Betätigungskräfte. Zweifache Führung der Spindel. Sichtkontrolle der Spindelposition. Handradstellung entspricht Keilstellung.	Einfache Bauart. Besserer Schutz des Spindelgewindes gegen strömendes Medium. Geringere Betätigungskräfte. Zweifache Führung der Spindel. Sichtkontrolle der Spindelposition. Spindelstellung entspricht Keilstellung. Geringer Platzbedarf.	
Nachteil	Das Spindelgewinde ist dem strömenden Medium ausgesetzt und der Sichtkontrolle entzogen. Verschmutzung durch Ablagerungen ist möglich.	Mehr Raumbedarf und unbequeme Bedienung, da Stellung des Handrades sich ändert. Verschmutzung am Gewinde durch äussere Einflüsse möglich.	Mehr Fertigungsaufwand und daher teurer. Verschmutzung am Gewinde durch äussere Einflüsse möglich.	

4.3.3.2 Ventile

Nach der konstruktiven Gestaltung werden für den vorliegenden Anwendungsbereich die Ventilbauarten nach Tabelle 4.6 unterschieden. Im Gegensatz zu den Schiebern gleiten die Sitzflächen der Ventile nicht aufeinander.

Tabelle 4.6 Ventilbauarten [5]:

Merkmal	Bezeichnung
Sitzart	Tellersitzventil
	Kegelsitzventil
	Kolbensitzventil
Sitzlage	Gradsitzventil
	Schrägsitzventil
Deckelaufbau	Aufsatzventil
	Kopfstückventil
	deckellostes Ventil
Strömungsrichtung	Durchgangsventil
	Eckventil

Ventile weisen gegenüber Schiebern folgende Vorteile auf, die ihren bevorzugten Einsatz im unteren Nennweitenbereich begründen:

- Einfacher Aufbau, dadurch geringere Herstellungskosten.
- Gute Abdichtung auch bei hohen Temperaturen und Drücken.
- Einfache Nachschleifmöglichkeit bei Beschädigung des Sitzes.

Nachteilig wirken sich folgende Kriterien aus:

- Begrenzung der Nennweite durch die erhöhte Betätigungskraft kurz vor der Schliesslage gegenüber von Schiebern und Klappen.
- Ventile lenken die Strömung stärker um als Schieber und Hähne. Sie haben deshalb einen höheren Druckverlust.

Die Ventilkörper werden je nach Aufgabenstellung in verschiedenen Formen hergestellt. Für bestimmte Regelaufgaben werden parabolische Kegel erforderlich.

4.3.3.3 Hähne

Hähne bieten Vorteile durch die einfache und robuste Bauweise, den geringen Platzbedarf, geringen Druckverlust bei strömungstechnisch günstiger Konstruktion des Öffnungsquerschnittes und rasche Schaltzeiten. Der günstige Durchgang vermeidet die Ansammlung von Schmutz. In Hähnen gleiten die Dichtflächen beim Schaltvorgang aufeinander.

Verschmutzte oder schadhafte Dichtflächen können durch einfaches Nachschleifen der Sitze oder Nachdichten wieder Instand gesetzt werden. Der Durchgangsquerschnitt der Hähne entspricht in der Regel mindestens dem zur gleichen Nennweite gehörenden Rohrquerschnitt.

Zur Betätigung der Hähne werden etwa ab DN 200 Vorlege in offenen oder geschlossenen Getriebekästen erforderlich.

Ein typischer Vertreter der Hähne ist der **Kugelhahn**. Vereinfacht dargestellt besteht ein Kugelhahn aus drei Teilen, dem Kugelküken, der Durchgangsdichtung und dem Gehäuse. Die Vorteile sind:

- Rohrleitungsgleicher Durchgang, soweit Querschnitt nicht eingeschnürt.
- Kompakte Bauform.
- Hohe Stabilität gegen innere und äussere Kräfte.
- Dichtmittelfrei.
- Wartungsarm.
- Hohe Dichtheit bei niedriger Dichtkraft.
- Geschützte Lage der Dichtungen.

Gehäuse und Kugel der Kugelhähne werden gewöhnlich aus Stahl bzw. Edelstahl hergestellt. Bis PN 16 können Gehäuse oder Teile davon auch aus Gusseisen mit Kugegraphit (GGG) und ab PN 25 auch aus Stahlguss hergestellt sein.

Antriebe können über Spindelverlängerungen angeschlossen werden, damit eine günstige Wärmedämmung der Rohrleitung und der Armatur möglich wird.

Hähne mit zylindrischem Küken sind mit einem Dichtmittel zu versehen. In gewissen Zeitabständen, unabhängig von den Betriebsverhältnissen und der Häufigkeit der Bedienung, sind die Hähne nachzudichten. Das Dichtmittel hat neben der Dichtfunktion auch Korrosionsschutzaufgaben zu übernehmen.

Als Dichtung zwischen dem oberen Gehäuseteil und dem Küken ist eine O-Ringdichtung aus Perbunan oder PTFE eingebaut. Eine Stopfbuchsenpackung ist daher nicht nötig. Das Dichtmittel wird in die Nuten des Kükens gepresst und auf die Dichtflächen verteilt. Hähne ab DN 200 haben ausser am Küken weitere Füllöffnungen im Hahngehäuse. Um ein Herausdrücken des Dichtmittels durch das Medium zu verhindern, ist jede Öffnung mit einem Kugel-Rückschlagventil abgesichert. Während des Dichtens muss der Hahn geöffnet sein, zwischen durch jedoch muss das Küken wiederholt bewegt werden, um eine gute Verteilung des Dichtmittels zu erreichen.

4.3.3.4 Klappen

Klappen sind Absperrorgane, deren Abschlusskörper überwiegend die Form einer Scheibe haben, die sich innerhalb des zylindrischen Gehäuses um eine Achse dreht. Sie haben durch kompakte Bauweise gegenüber anderen Absperrorganen den Vorteil des geringsten Raumbedarfs und sind ausserdem leicht bedienbar. Klappen sind teilweise so konstruiert, dass sie von beiden Seiten beaufschlagt werden können.

Die Dicke der kreisförmigen oder annähernd kreisförmigen Scheibe ist abhängig vom Betriebsdruck des Mediums. Wenn die Drehscheibe ausserhalb der Scheiben-

mitte liegt können Unterbrechungen des Dichtringes vermieden werden.

Die Klappenscheibe wird über die einseitig durch das Gehäuse geführte Antriebswelle mit einem angebauten Getriebe verstellt und die Klappenscheibenstellung durch eine mechanisch übertragene Anzeigevorrichtung kenntlich gemacht.

Das Gehäuse wird entweder mit Anschweissenden oder Anschlussflanschen hergestellt. Es kann auch als flanschloses Klappengehäuse zum Einklemmen zwischen zwei Rohrleitungsflanschen ausgeführt werden. Schweisskonstruktionen für das Gehäuse haben sich gut bewährt. Ist der Sitzring der Klappenscheibendichtung in das Klappengehäuse eingeschweisst, dann trägt die Klappenscheibe die Dichtung. Umgekehrt kann aber auch die Profildichtung im Gehäuse angeordnet werden.

In Bild 4.5 sind die heute gebräuchlichsten Varianten der Lagerung der Klappenscheibe im Gehäuse dargestellt.

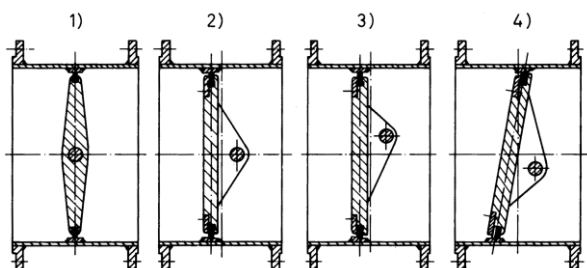


Bild 4.5 Anordnung der Klappenscheiben [5]:
 1 Zentrische Lagerung
 2 Exzentrische Lagerung
 3 Doppelsexzentrische Lagerung
 4 Doppelsexzentrische Lagerung (metallisch dichtend).

Für die Betätigung der Klappen stehen neben pneumatischen und hydraulischen Steuerzylindern auch Getriebe zur Verfügung, die in der Regel an das Klappengehäuse angeflanscht und direkt mit dem Antriebszapfen der Klappenscheibe verbunden sind. Die Getriebe müssen selbsthemmend ausgeführt und entsprechend dem maximal auftretenden Drehmoment der Absperrklappen unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors ausgelegt werden. Bei grossen Antriebsmotoren und wenn lange Schliesszeiten notwendig sind, können Strirnradvorgelege vorgeschaltet werden. Am häufigsten werden Schneckenrad-, Schraubenspindel- und Schubkurbelgetriebe verwendet.

4.3.3.5 Einsatzbereich

Die Tabelle 4.7 zeigt den Einsatzbereich der Absperrarmaturen geordnet nach Nennweitenbereichen. Die Baugrösse kann für unterschiedliche Leitungen einen wichtigen Kosteneinfluss haben.

Da für die Auswahl einer Armatur meist mehr als eine der genannten Armaturentypen in Frage kommt, sind in der Tabelle 4.8 wichtige Eigenschaften von Armaturen vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 4.7 Einsatzbereiche der Absperrarmaturen nach Nennweiten [5].

Nennweite	Armaturenart
DN 40 -100	Haupteinsatzbereich Ventile, Hähne, insbesondere Kugelhähne auch Schieber
DN 100 - 200	Überschneidungsbereich Ventile, Schieber, Hähne, auch Klappen
DN 200 - 350	Haupteinsatzbereich Schieber und Klappen, auch Hähne
> DN 400	Haupteinsatzbereich Klappen, Schieber, auch Hähne

Tabelle 4.8 Qualitativer Vergleich wichtiger Eigenschaften von Armaturen [5].

Vergleichskriterien	Schieber	Ventile	Kückenhähne	Kugelhähne	Klappen
Sitz (Flächengrösse)	2 breite Sitzringpaare	1 schmales Sitzringpaar	grosse Sitzfläche	grosse Sitzfläche	1 schmaler Sitzring
Baulänge	klein	gross	gross	mittel	klein
Bauhöhe	gross	mittel	klein	klein	mittel
Strömungswiderstand	niedrig	hoch	mittel	klein	hoch
Öffnungs- / Schliesszeit	lang	lang	kurz	kurz	kurz
Betätigungshäufigkeit	wenige - mittel	wenige	mittel	häufige	mittel
Eignung für Richtungswechsel der Strömung	gut	nicht geeignet	gut	gut	gut
Verwendungsbereich	mittlere bis grosse DN	kleine DN	kleine bis mittlere DN	kleine bis grosse DN	mittlere bis grosse DN
Eignung bei äusseren Kräften und Momenten	nicht empfindlich besonders geeignet für die Aufnahme hoher Kräfte und Momente sind Rundschieber am anfälligsten sind Flachschieber	empfindlich gegen hohe äussere Belastungen	Vorgabe der Grenzbelastungen bei der eine Betätigung noch möglich ist bei Überschreitung Verklemmen und Undichtheit möglich	unempfindlich wenn ohne Flansch (z.B. geschweisst)	wenig empfindlich geeignet für die Aufnahme hoher Kräfte, ohne Einfluss auf die Abdichtung
Funktionssicherheit	Betätigung mindestens 1x jährlich notwendig	Betätigung mindestens 1x jährlich notwendig	Betätigung mindestens 1x jährlich notwendig	Betätigung mindestens 1x jährlich notwendig	Betätigung mindestens 1x jährlich notwendig
Langlebigkeit	mittel / lang (40-60 Jahre)	mittel (20-40 Jahre)	mittel / lang (40-60 Jahre)	lang (60-80 Jahre)	mittel / lang (30-60 Jahre)
Kosten Armatur	tief	tief	mittel	hoch	tief (Einklemmkappen) mittel
Kosten Armatur inkl. Einbau	mittel hoch (bei grossen DN)	tief	mittel hoch (bei grossen DN)	mittel tief (bei grossen DN)	tief (Einklemmkappen) mittel

4.3.3.6 Betriebliche Hinweise

In Fernwärmehaupt- und Transportleitungen werden Umgehungen bzw. Bypässe der Armaturen eingebaut. Umgehungen dienen dem Druckausgleich, verhindern einen zu grossen Druckstoss und erleichtern das Öffnen der Armaturen. Betreffend die Betätigung von Armaturen ist DIN EN 12266 Teil 1 zu beachten [114]. Ausserdem wird auf das DVGW-Arbeitsblatt W332 hingewiesen [90].

Stellantriebe

Bei hohen Differenzdrücken und grossen Nennweiten sind Spindeldrehmomente erforderlich, die durch Handkraft nicht mehr aufgebracht werden können. Die Grenze liegt für Schieber und Hähne im Nennweitenbereich um DN 200. Die Grenze kann bei Schiebern durch Anordnung von Kugellagern nach oben verschoben werden. Durch den Anbau von Übersetzungsgetrieben kann das Drehmoment herabgesetzt werden.

In folgenden Situationen wird die Betätigung durch einen Elektro-Antrieb empfohlen:

- Bei grossen Armaturen, bei denen die manuelle Betätigung zu anstrengend ist.
- Wenn die manuelle Betätigung in der erforderlichen Zeit nicht durchführbar ist.
- Bei Gefahr von Leib und Leben.
- Wenn eine zentrale Steuerung vorgesehen ist.
- Automatische Betätigung durch Impuls von Druck-, Temperatur- oder Niveaureglern.
- Wenn spezifische Ablaufprozedere vorgesehen sind.

Für die Fernbetätigung von Armaturen lassen sich auch hydraulische Antriebe und vereinzelt auch pneumatische Antriebe eingesetzt.

Äussere Kräfte und Momente

Die Aufnahme von Kräften und Momenten durch das Armaturengehäuse wird in DIN 3840 behandelt.

Armaturen sollten nach Möglichkeit nicht im Bereich hoher äusserer Belastungen angeordnet werden und sie sollten kein Festpunkt der Leitung sein. Zur Entlastung der Armaturen sind gegebenenfalls konstruktive Mass-

nahmen an der Rohrleitung erforderlich. Zuverlässige Aussagen über die am Einbauort zu erwartenden Kräfte und Momente sind aus einer statischen oder aus einer dynamischen Berechnung abzuleiten.

Die verschiedenen Armaturen reagieren unterschiedlich auf äussere Kräfte und Momente. Eine Einteilung der Armaturen ist in Tabelle 4.8 zu sehen.

Schliesszeiten und Druckstoss

Jede Veränderung in der Durchflussmenge verursacht in einer unter Überdruck stehenden Rohrleitung Druckschwankungen, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten (Druckstoss). Da im Betrieb solche Mengenänderungen häufig vorgenommen werden müssen, sind die Rückwirkungen von Druckschwankungen zu beachten. Für die Bemessung der Rohrleitung sind extreme Belastungsfälle massgebend. Sie können bei Notabschaltungen und bei plötzlichem Ausfall von Pumpen auftreten.

Die Schliesszeiten liegen erfahrungsgemäss im Bereich einiger Minuten. Die einzelnen Bauarten der Armaturen unterscheiden sich in der Schliess- und Öffnungszeit. Schnelle Schliess- und Öffnungsvorgänge sind auch bei Nennweiten \leq DN 150 möglichst zu vermeiden.

Funktionssicherheit

Zur Sicherstellung der Funktion wird eine Betätigung der Absperrarmaturen einmal jährlich empfohlen.

4.3.3.7 Kennzeichnung und Dokumentation

Die Armaturen sollen deutlich und dauerhaft mindestens folgendermassen gekennzeichnet werden:

- Nenndruckstufe, für die alle Teile ausgelegt sind
- Maximal zulässige Betriebstemperatur
- Erforderlichenfalls Fließrichtung
- Hersteller, Typ und Fabrikationsnummer.

Antriebe sind mit Typenschilder zu kennzeichnen:

- Drehrichtung der abtreibenden Welle
- Schutzart
- Drehmoment bzw. Antriebsleistung nach DIN
- Hersteller, Typ und Fabrikationsnummer.

Dem Betreiber sollten folgende Unterlagen des Herstellers zur Verfügung stehen:

- Einbauvorschriften
- Bedienungsanleitungen
- Wartungsvorschriften
- Ersatz- und Verschleisstellelisten
- Nachweis über Erzeugnis- und Werkstoffprüfungen.

4.4 Netzaufbau

Der Begriff Fernwärmenetz bezeichnet das Bindeglied zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeabnehmer. Die Wahl von Netzstruktur, Trassenführung, Rohrsystem und Verlegungsmethode wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Nebst der Siedlungsstruktur bilden technische, geologische, ökonomische und sicherheitstechnische, aber auch architektonische und juristische wichtige Entscheidungskriterien. Das Einzugsgebiet und die Grösse eines Fernwärmenetzes stehen deshalb meist nicht von vornherein fest und sie können sich mit der Zeit zudem ändern.

Das Fernwärmenetz wird in der Regel in Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen unterteilt (Bild 4.6). Die Hauptleitung entspricht der ersten Leitung ab der Wärmezentrale. Daneben wird auch der Begriff Stammleitung oder bei grossen Wärmeerzeugern, die weit weg von den Versorgungsgebieten liegen, auch der Begriff Transportleitung verwendet. Zweig- oder auch Verteilungen genannt zweigen von den Hauptleitungen ab und dienen der Unterverteilung zu den einzelnen Versorgungsgebieten. Die Hausanschlussleitungen dienen zum Anschluss eines Wärmeabnehmers an eine Haupt- oder Zweigleitung.

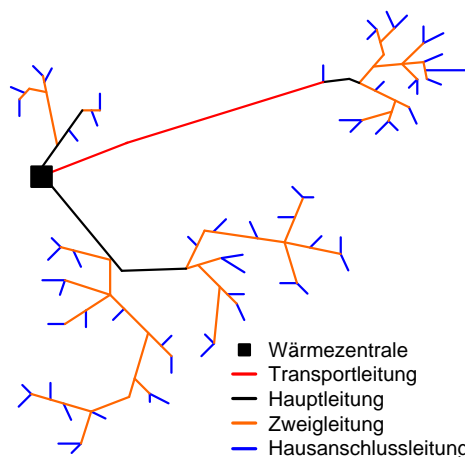


Bild 4.6 Netzaufbau und Leitungstypen.

4.4.1 Unterteilung nach Anzahl Leitungen

Moderne Fernwärmenetze werden fast ausschliesslich als geschlossene **Zweileiter-Systeme** mit Wasser als Wärmeträgermedium und je einer Vor- und Rücklaufleitung ausgeführt (Bild 4.7). Sonderfälle sind das Dreileiter- und das Vierleiter-System [43].

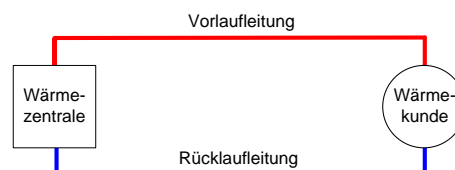


Bild 4.7 Zweileiter-System.

Das **Dreileiter-System** (Bild 4.8) besteht aus zwei Vorlauf- und einer Rücklaufleitung oder aus einer Vorlauf- und zwei Rücklaufleitungen. Bei zwei Vorlaufleitungen kann zum Beispiel mit einer Vorlaufleitung die Heizungsanlage der Kunden in Abhängigkeit der Aussentemperatur gleitend gefahren werden während mit der zweiten Vorlaufleitung bei konstanter Vorlauftemperatur das Warmwasser bereitgestellt wird. Bei zwei Rücklaufleitungen kann zum Beispiel beim Einsatz einer Abgaskondensationsanlage die tiefen Rücklauftemperaturen in einem Rücklaufstrang zusammengefasst werden.

Vorteile von Dreileiter-Systemen sind die bessere verbrauchsabhängige Regelmöglichkeit und der geringere Wärmeverlust durch den gleitend gefahrenen Vorlauf. Die dritte Rohrleitung verteuert jedoch die Verlegung. Zudem kann wegen der diskontinuierlichen Entnahme aus der zweiten Vorlaufleitung der Massenstrom in der Rücklaufleitung schwanken, so dass sich der Betriebspunkt der Anlage verschiebt und die Kundenanlagen nicht mit gleichbleibenden Massenströmen versorgt werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass während der Übergangszeit die gemeinsame Rücklauftemperatur über der Temperatur des gleitenden Vorlaufs liegen kann, was zu unerwünschter Erwärmung der Räume bei Kunden und einen erhöhtem Energieverbrauch verursachen kann.

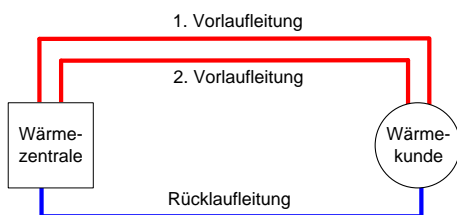


Bild 4.8 Dreileiter-System.

Ein Dreileiter-System wird auch bei dezentraler solarthermischer Energiegewinnung mit saisonalem Speicher eingesetzt. Dabei wird das Zweileiter-System um einen Leiter erweitert, der als Solarvorlauf für den zentralen Speicher dient. Die dezentralen Solarkollektoren werden aus dem Fernwärme-Rücklauf gespeist ([6], [43], [56]).

Das **Vierleiter-System** (Bild 4.9) besteht aus zwei getrennten Zweileiter-Systemen. Zum Beispiel kann eines mit konstanter und eines mit gleitender Vorlauftemperatur betrieben werden. Damit können die verbrauchsabhängige Regelung verbessert und die Wärmeverluste reduziert werden. Da das Vierleiter-System aufwändig ist, wird es nur eingesetzt, wenn die beiden Netze unterschiedliche Drücke, Temperaturen oder unterschiedliche Heizmedien haben.

Bei dezentraler solarthermischer Energieversorgung und zentralem saisonalem Speicher gibt es ebenfalls ein Vierleiter-System, wobei hier ein Zweileiter-System zur Fernwärmeversorgung und eines als Vor- und Rücklauf des Solarsystems dient ([6], [43], [56]).

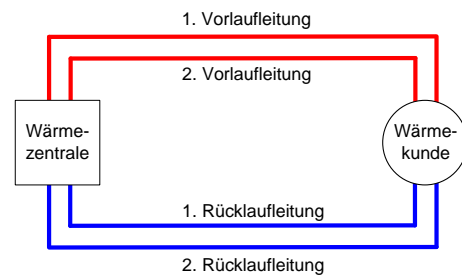


Bild 4.9 Vierleiter-System.

4.4.2 Hauptverteilung

Für das Hauptnetz werden zwei Grundtypen unterschieden, nämlich Sternnetze und Maschennetze [43].

Am Anfang werden Fernwärmenetze in der Regel als **Sternnetz** (Bild 4.10) aufgebaut. Vor- und Rücklauf sind üblicherweise gleich dimensioniert (symmetrisch). Der Durchmesser der Rohrleitungen ist beim Wärmeerzeuger am grössten und wird nimmt mit der Distanz zum Wärmeerzeuger ab. Die Pumpenförderhöhe wird so ausgelegt, dass am Netzende beim letzten Kunden der vereinbarte Differenzdruck zur Verfügung steht. Durch die kurzen Trassenlängen und die geringen Durchmesser ergeben sich geringe Baukosten und Wärmeverluste. Nachteil ist, dass nachträgliche Erweiterungen hydraulisch problematisch sind und die Versorgungssicherheit geringer ist, da bei einer Netzstörung der gesamte Strang abgeschaltet werden muss.

Ein Sonderfall des Sternnetzes ist das **Liniennetz** (Bild 4.11), das nur aus einem Hauptstrang mit kurzen Hausanschlussleitungen besteht ([6], [43], [56]).

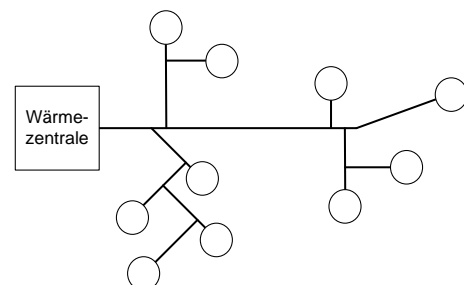


Bild 4.10 Sternnetz mit einer Wärmezentrale.

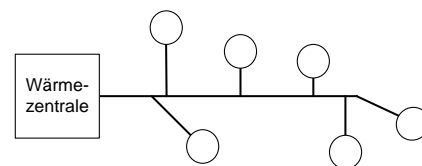


Bild 4.11 Liniennetz mit einer Wärmezentrale.

Infolge Wachstum und Verdichtung sowie bei Zusammenschluss mehrerer Wärmeverbände, können sogenannte **Maschennetze** entstehen (Bild 4.12). Sie zeichnen sich infolge der mehrfachen Lieferwege durch eine grosse Versorgungssicherheit aus. Bei grossen städtischen Versorgungsgebieten sind sie oft das Resultat einer stetigen Erweiterung und Verdichtung des Fernwärmenetzes. Maschennetze besitzen oftmals mehrere Wärmezentralen und werden im Verbundbetrieb gefahren.

ren. Reine Maschennetze sind allerdings selten, da an der Peripherie oft Sternnetze angeschlossen sind.

Ein Sonderfall des Maschennetzes ist das **Ringnetz** (Bild 4.13), also ein Versorgungssystem aus einer Masche (Ring) mit dazugehörigen Hausanschlussleitungen ([6], [43], [56]).

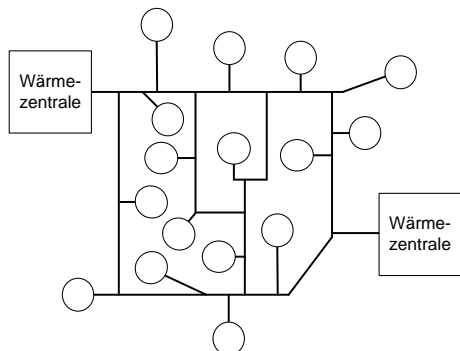


Bild 4.12 Maschennetz mit zwei Wärmezentralen.

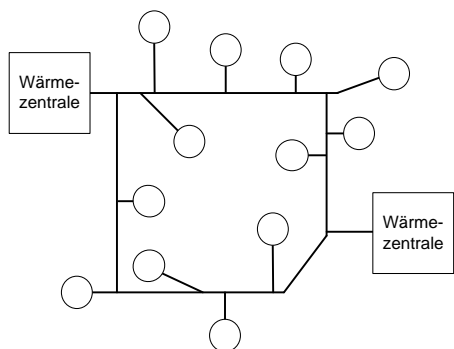


Bild 4.13 Ringnetz mit zwei Wärmezentralen.

4.4.3 Unterverteilung und Hausanschlüsse

Bei einer **Standard-Trassenführung** wie in Bild 4.14 gezeigt werden alle Verbraucher separat an die Haupt- oder Zweigleitung angeschlossen. Diese oft eingesetzte Trassenführung in öffentlichen Wegen bietet die grösste Flexibilität bezüglich des Anschlusses weiterer Kunden. Bei geringer Anschlussdichte oder langen Hausanschlussleitungen ergeben sich jedoch unter Umständen längere Rohrwege als bei anderen Trassenführungen. Aus diesem Grund und wegen der bei dichter Bebauung erforderlichen Abzweige und Formstücke können hohe Investitionskosten zur Folge haben.

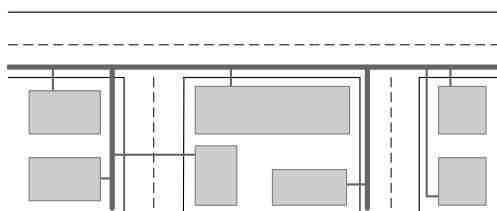


Bild 4.14 Standard-Trassenführung.

Bei der **Haus-zu-Haus-Trassenführung** werden Häuser zu Gruppen zusammengefasst und nur ein Haus an die Haupt- oder Zweigleitung angeschlossen. Von diesem

aus werden die anderen Häuser angebunden, so dass weniger Abzweige von der Haupt- oder Zweigleitung notwendig sind. Da die Rohrleitungen durch Privatgrundstücke und Gebäude verlaufen, sind von den Eigentümern Durchleitungsrechte notwendig.

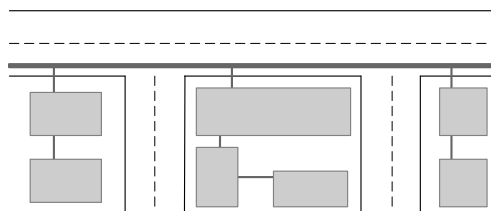


Bild 4.15 Haus-zu-Haus-Trassenführung.

Bei einer Reihenhausbauung geht die Haus-zu-Haus-Trassenführung in den Sonderfall der **Kellerverlegung** über. Die Kellerverlegung gehört zu den preiswertesten Verlegemethoden. Bei reiner Kellerverlegung sind weder Tiefbauarbeiten notwendig noch müssen spezielle Fernwärmerohre verlegt werden. Eventuelle Leckagen werden innerhalb kürzester Zeit entdeckt und können genau lokalisiert werden. Voraussetzung für die Kellerverlegung ist, dass die Häuser oder Tiefgaragen aneinandergrenzen und eine kurze Leitungsverbindung zwischen den einzelnen Hausstationen möglich ist. Bei nicht aneinandergrenzenden Gebäuden ist auch ein Mischform von Haus-zu-Haus- und Kellerverlegung möglich. Nachteile sind die aufwändigere Koordination der einzelnen Bauabschnitte und die Abstimmungen mit den Hauseigentümern für die Durchleitungsrechte.

Eine weitere, seltene angewandte Technik ist die **Einschleif-Trassenführung**, die auf keiner Netzstruktur (Stern- oder Maschennetz) basiert, sondern alle Gebäude mittels der Haus-zu-Haus-Trassenführung erschliesst. Damit entfallen erdverlegte Rohrverbindungen und Abzweige weitgehend. Eine spätere, nicht eingeplante Netzerweiterung ist jedoch nahezu unmöglich. Daher ist die Einschleif-Methode nur bei kleinen Fernwärmenetzen mit flexiblen Rohrsystemen vorteilhaft.

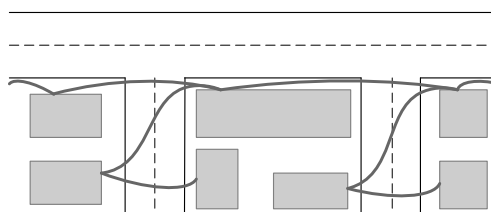


Bild 4.16 Einschleif-Trassenführung.

Kostengünstig ist häufig eine Mischform aus Standard- und Haus-zu-Haus-Trassenführung, welche die Vorteile beider Systeme kombiniert.

4.4.4 Entwicklung der Netzstruktur

Das Versorgungsgebiet und die Anschlussleistung von Fernwärmenetzen sind oft das Resultat eines Entwicklungsprozesses, der über Jahre oder Jahrzehnte dauern kann. Bild 4.17 zeigt typische Stadien in der Entwicklung eines Fernwärmenetzes, wobei sich die Zahlen

auf charakteristische Phasen beziehen und folgende Situationen beschreiben:

- 1) Ein einzelnes Fernwärmenetz mit einer Baumstruktur (siehe Sternnetz) wird vielfach zuerst gebaut. In vielen Fällen entwickeln sich zusätzlich kleinere Netze in anderen Teilen der Stadt, womit zunächst eine bestimmte Gruppe von ähnlichen Gebäuden, Zonen oder Gebieten mit Wärme versorgt werden.
- 2) Eine oder mehrere der kleineren Fernwärmenetze werden zu einem zentralen Netz zusammengeschlossen. Dabei kann eine Wärmezentrale als Grundlast und äussere Wärmezentralen als Spitzenlasteinheiten eingebunden werden.

- 3) Bestimmte Paare von Vor- und Rücklaufleitungen werden miteinander verbunden. Typischerweise sind dies die grössten Hauptstränge, die dann einen Ring bilden. Mit einem Ringnetz können nun immer mehr Verbraucher angeschlossen werden.
- 4) Die Verbindung weiterer Verzweigungsenden in der Haupt- und Feinstruktur des Netzes führen zu einer Maschenstruktur. Die Hauptleitungen folgen in der Regel der Strassenstruktur, während dies für die Zweig- und Hausanschlussleitungen nicht zwingend gilt.

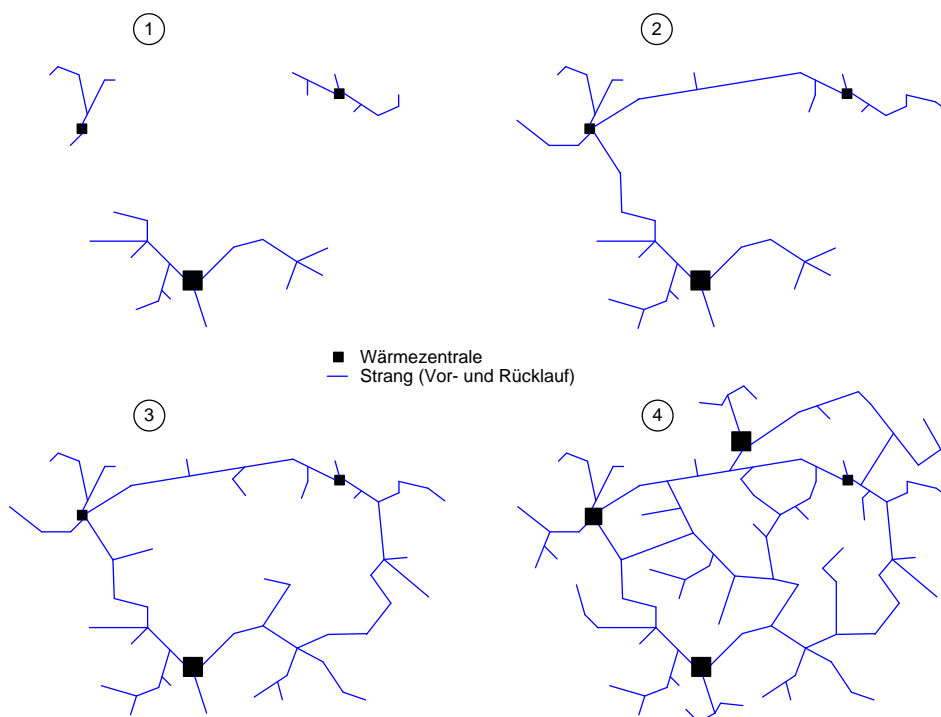


Bild 4.17 Vier verschiedene Netzstrukturen stellen den Wachstums-Prozess von Fernwärmenetzen dar. 1) Sternnetz 2) Erste Verbindung 3) Ringnetz 4) Maschennetz.

4.4.5 Entlüftung und Entleerung

Bei ausgedehnten und grossen Fernwärmenetzen sollte bei der nachträglichen Montage von Abzweigern und Hausanschlüssen oder bei Reparaturarbeiten die Leitung in Teilstücken entleert werden können. Mit Absperrarmaturen ist das Fernwärmenetz dazu so zu unterteilen, dass einzelne Streckenabschnitte schnell entleert werden können und für das Füllen der Leitungen nur beschränkte Mengen an aufbereitetem Wasser benötigt werden.

Als Entleerungsarmaturen werden Ventile oder Hähne eingesetzt. Auch für sie gelten die Ausführungen nach Kapitel 4.3.3. Es empfiehlt sich, die Entleerungen mit genormten Schlauchanschlüssen zu versehen. Entleerungsstellen sollten als Schlammfang ausgebildet sein.

Werden die Fernwärmeleitungen in Abwasserkanälen entleert, darf die in der Regel zulässige Einleittempe-

ratur von 35°C nicht überschritten werden. Sie ist durch Beimischen von kaltem Wasser zu erreichen. Während des Betriebes sind die Entleerungen durch Blindflansche, Stopfen oder Kappen zu sichern.

Zum Füllen und Entleeren der Fernwärmeleitungen muss Luft entweichen und einströmen können. Dazu sind Ent- und Belüftungen an den höchsten Stellen der Rohrleitung und zwischen zwei Absperrarmaturen anzubringen. Bei flach verlegten Zweigleitungen ohne wesentliche Gefällstrecken kann auch über die Hausanschlussleitung die Luft zu- und abgeleitet werden.

4.4.6 Messeinrichtungen

Die Druckverhältnisse im Fernwärmenetz müssen überwacht werden können. Es sollten deshalb an markanten Stellen Absperrventile und Manometerabsperrventile mit Prüfanschluss für Druckmessgeräte nach DIN 16271 [110] angebracht werden. Sie müssen gut zugänglich sein. Auch Entleerungs- und Belüftungsleitungen können zum Anbringen von Druckmessstellen benutzt werden.

Daneben wird empfohlen, an geeigneten Stellen Temperaturmessstutzen nach DIN 43772 [111] zu montieren. Zur Fernübertragung der Messwerte kann es zweckmässig sein, beim Bau des Netzes entsprechende Kabel zu verlegen.

4.5 Verlegungsmethoden

4.5.1 Oberirdische Verlegung

Eine oberirdische Verlegung ist ökonomisch und betriebstechnisch attraktiv, ihr Einsatz ist jedoch wegen der Ansprüche an Architektur und Landschaftsgestaltung eingeschränkt wie zum Beispiel für Anwendungen zur Brückenüberquerung. Weiter sind bei der Verlegung auch Witterungseinflüsse (UV-Strahlung, Frost, Korrosion) oder auch Vandalismus zu beachten und entsprechende Massnahmen zu ergreifen.

Die Verlegung erfolgt vorzugsweise auf Sockeln oder hängend an Pendelstützen. Die Rohrhalterungen sind durch die Fluidmasse und die Kräfte aus der Wärmedehnung hoch belastet zudem muss die freie Dehnung aufgenommen bzw. kompensiert werden. Die Verlegung auf Stützen und Rohrbrücken beschränkt sich auf Industriegelände und Gebiete ohne besondere Gestaltungsanforderungen.



Bild 4.18 Oberirdische Fernwärmeleitungen in Jena (Stadtwerke Energie Jena-Pössneck).

4.5.2 Unterirdische Verlegung im Kanal

Die Verlegung im unbegehbaren Kanal ist eine solide Bauweise mit langer Lebensdauer. Nachteile sind die hohen Baukosten und der grosse Flächenbedarf für die Tiefbaumassnahmen, weshalb kanalverlegte Trassen nur noch selten zum Einsatz kommen und nachfolgend nicht weiter behandelt werden.

4.5.3 Unterirdische Verlegung im Graben

Die Verlegung im Graben mit Mantelrohren hat sich wegen ihrer Vorteile hinsichtlich Kosten und Verlegegeschwindigkeit als häufigste Verlegungsmethode durchgesetzt. Die Vorteile sind:

- Geringer Aufwand an Tiefbauleistungen im Vergleich zu anderen unterirdischen Verlegearten.
- Weitgehender Entfall aufwändiger Schachtbauwerke, ausser für Armaturen, die nicht direkt in das Mantelrohrsystem eingebunden sind.
- Auch bei schwierigen Bodenverhältnissen wie zum Beispiel im Grundwasserbereich einsetzbar.
- Kurze Montagezeiten durch hohen Vorfertigungsgrad der konfektionierten Bauteile.
- Grosse Flexibilität in der Trassenführung durch vorgefertigte Formstücke.

Besondere Sorgfalt ist bei der Herstellung und Wärmedämmung der Verbindungen unter Baustellenbedingungen erforderlich, weshalb diese Arbeiten von den meisten Systemanbietern oder von spezialisierten Firmen als Dienstleistung angeboten werden.



Bild 4.19 Fernwärmerohre werden in den Graben gehoben [51].

4.5.4 Grabenlose Verlegung

Unterquerungen von Objekten (Strassen, Bahntrassen, Wasserläufe) werden durch Vortriebstechniken wie Spülbohrungen, Pressvortrieb, Düker und Tunnelbau realisiert. Bei grabenlosen Verlegetechniken wird zwischen Bodenverdrängungs- und Bodenentnahmeverfahren unterschieden. Letztere unterteilen sich in steuerbare und nichtsteuerbare Verfahren. Bei den nichtsteuerbaren Verfahren muss zu Beginn bereits eine genügend präzise Ausrichtung der Bohrung erfolgen. In der Regel werden die mediumführenden Rohre durch ein Schutzrohr eingezogen.

Für den Rohrvortrieb sind dazu hochproduktive Spezialgeräte erforderlich.

4.5.4.1 Bodenverdrängungsverfahren

Durch einen in den Boden getriebenen Verdrängungskegel wird ein Hohlraum erzeugt, in den das Rohr nachgeschoben wird. Das Verfahren wird bis DN 200 angewendet. Der Krafteintrag erfolgt entweder über einen pneumatisch angetriebenen Verdrängungshammer im Erdreich oder mittels einer Horizontalramme im Startschacht.

4.5.4.2 Bodenentnahmeverfahren

Das Erdmaterial wird durch einen rotierenden Bohrkopf oder ein horizontal eingerammtes offenes Rohr gelöst und mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch in die Startgrube befördert (Spülbohrverfahren, Bild 4.20). Durch die entstehende Röhre können Kunststoff- oder Stahlrohre eingezogen werden.

Beim Verfahren mit Pressvortrieb werden mit einer hydraulischen Presse von der Startgrube aus Rohre bis 4 m Durchmesser auf Längen bis 150 m zur Zielbau-grube vorgepresst. Am Start- und Zielpunkt sind Schächte zur Aufnahme der Bohrgeräte und zur Einbringung und Installation der Rohre notwendig.

Das Durchbohren ist über grosse Entfernungen auch mit gesteuertem Bohrkopf oder mittels Spülbohrverfahren in Lockersedimenten und halbfesten Sedimenten bis maximal 63 mm Korngrösse möglich. Das Bohrgut wird durch das an den Bohrköpfen austretende Wasser oder eine tonhaltige Suspension (Bentonit) ausgespült. Beim rückwärtigen Herausfahren des Bohrkopfes wird die Rohrleitung in den verdichteten Bohrkanal eingezogen. Für steinigen Untergrund eignet sich die Erstellung eines Mikrotunnels aus Beton mit einer ferngesteuerten Vortriebsmaschine. Der Mikrotunnel wird anschliessend mit Wasser geflutet, wodurch das Rohr als Schwimmkörper eingesetzt werden kann.



Bild 4.20 Spülbohrmaschine im Einsatz.

Mit den Verfahren können Rohrleitungen mit hoher Präzision unter Strassen, Bahndämmen, Flüssen oder Gebäuden verlegt werden. Richtungsänderungen werden, wenn möglich mit grossen Radien ausgeführt. Zur Sanierung bestehender Leitungen sind Rohrberstverfahren gebräuchlich, bei denen die alten Leitungen zer-

stört und ins Erdreich verdrängt und anschliessend neue Leitungen eingezogen werden.

4.5.4.3 Düker

Düker (von duiker, niederländisch für Taucher) sind Bauwerke zur Unterquerung einer Strasse, eines Tunnels, eines Flusses oder von Bahngleisen mit einer Rohrleitung. Vor allem Gewässer werden meistens mittels Dükerung gekreuzt. Die Dükerung schmaler, kleiner Gewässer ist relativ einfach. Oftmals reicht die Elastizität der Rohrleitung aus, um diese durch das Gewässer zu führen, wobei eine Verankerung und Überdeckung erforderlich ist. Wenn dies nicht möglich ist, wird ein Rohrgaben (Dükerrinne) im Gewässeruntergrund erstellt. Die vormontierte Rohrleitung wird unter Vorkehrungen zum Schutz der Wärmedämmung mit mobilen Kränen in die Dükerrinne gehoben und zur Auftriebssicherung belastet.



Bild 4.21 Vorgefertigter Düker wird in die Dükerrinne gehoben um danach auf Rollen in das Flussbett geschoben zu werden [51].

Grosse Düker für Gewässer werden an Land vorgefertigt. Dabei gelten die gleichen Vorschriften für Biegen, Schweiessen, Korrosionsschutz und Druckprüfung wie bei erdverlegten Rohren. Die Verlegung des vorgefertigten Dükers in die Dükerrinne erfolgt nach folgenden Verfahren:

- Einspülverfahren: Der Düker wird bei flexiblen Rohren von kleinen Durchmessern durch Vibration in den Gewässergrund eingespült.
- Absenkverfahren: Der vorgefertigte Düker wird durch Baukrane von Land oder durch Schiffskrane vom Wasser aus in die Dükerrinne abgesenkt.
- Einschleppverfahren: Der Düker wird an Land auf Schlitten vormontiert, die auf einer Kufenbahn stehen. Diese liegt in der verlängerten Flucht der Dükerung. Der Düker wird dann vom gegenüberliegenden Flussufer in die vorbereitete Dükerrinne gezogen (Bild 4.21).

Die Düker werden gegen mechanische Beschädigung mit Beton oder Faserzement ummantelt. Der Mantel dient gleichzeitig als Auftriebsicherung. Das Verlegen in einer offenen Dükerrinne wird zunehmend durch das steuerbare horizontale Richtbohrverfahren (Directionally Controlled Horizontal Drilling) verdrängt. Dieses Verfahren ist wirtschaftlich, verlangt aber eine gute Vorbereitung und präzise Montageausführung.

4.6 Häufige Verlege-Situationen

Die folgenden Ausführungen beschreiben häufige Verlege-Situationen mit Vor- und Nachteilen für die unterschiedlichen Rohrsysteme. Für die Verlegung ist zu beachten, dass je nach Druck, Temperatur und Rohrdurchmesser nicht alle Rohrsysteme geeignet sind.

4.6.1 Befestigte Oberflächen

Bei städtischen Fernwärmenetzen wird eine Trassenführung im öffentlichen Strassenbereich bevorzugt. Die Fernwärmeunternehmen erwerben das Verlegerecht (Durchgangsrecht) im öffentlichen Strassenbereich oder schliessen Konzessionsverträge mit den Gemeinden ab [6]. Allgemein wird versucht, die wichtigsten Hauptleitungen in geschützte Strassenstreifen (Grünstreifen, Gehwege) zu verlegen, die bei einer Störung leicht zugänglich sind. Strassenquerungen sollten auf ein Minimum reduziert werden [6]. Für Verlegungen im Strassenbereich oder auch bei unbefestigten Oberflächen haben sich erdverlegte Kunststoffmantelrohre (KMR, MMR und PMR) durchgesetzt. Kanalverlegeverfahren kommen nur noch selten und in speziellen Fällen zum Einsatz. Für Kunststoffmantelrohre sprechen die Standardisierung, die Robustheit des Verlegesystems, der geringe Platzbedarf und die günstigen Verlegekosten [6].

Für Situationen ohne kreuzende Leitungen oder andere Hindernisse ist die Festlegung der Trassenführung meist unproblematisch. Für KMR besteht zudem die Möglichkeit, die Rohre zu grösseren Teilstücken zu verschweissen und in der sogenannten Pipeline-Verlegung zu verlegen [43]. Flexible Rohrsysteme weisen dagegen den Vorteil auf, dass sie ab Rolle verlegt werden können und zudem selbstkompensierend sind [43]. Für Situationen mit kreuzenden Leitungen kann eine Trassenfindung mit starren Rohrsystemen aufwändig werden und für KMR den Einsatz zusätzlicher Formstücke wie z.B. 90°-Bögen erforderlich machen [43].

4.6.2 Unbefestigte Oberflächen

Für Leitungen unter unbefestigten Oberflächen (z.B. Kulturland) kann die Trassenführung weitgehend auf das gewählte Rohrsystem optimiert und kostengünstig ausgeführt werden.

4.6.3 Führung an Geländeabschnitten

Oft besteht die Möglichkeit, eine Fernwärmeleitung und andere Versorgungsleitungen entlang einer Strasse, einer Bahnlinie oder eines Wasserlaufs zu verlegen, was teilweise bereits bei der Zonenplanung berücksichtigt

wird. Diese Nutzung bedarf der Vereinbarung mit dem jeweiligen Eigentümer [6].

Wenn Flüsse, Autobahnen oder Gleise über- oder unterquert werden müssen, kann die Trasse in einem Düker oder in einem Sonderbauwerk Dritter wie zum Beispiel einer Eisenbahnbrücke untergebracht werden. Die Nutzung von Bauwerken Dritter birgt allerdings das Risiko, dass bei Änderungen erheblicher Aufwand für Anpassungen entsteht. Bei Unterquerungen haben sich grabenlose Verlegemethoden bewährt [6].

4.6.4 Privatgrundstücke

Für jede Leitung, die auf einem Privatgrundstück verlegt wird, muss die Nutzung rechtlich abgesichert werden. Dies kann durch Eintragung einer Grunddienstbarkeit oder durch Vereinbarung zwischen Netzbetreiber und Eigentümer erfolgen (Durchgangsrecht) [6].

4.6.5 Nachträglich anzuschliessende Verbraucher

Wenn beim Bau des Fernwärmenetzes bekannt ist, dass zu einem späteren Zeitpunkt Neubauten geplant oder bestehende Verbraucher angeschlossen werden sollen, empfiehlt sich, einen Anschluss vorzubereiten. Die entsprechenden Hausanschlussleitungen können zum Beispiel bereits bis in den Garten geführt und mit einem Bedarfskugelhahn oder einem Stahlendstück mit Anbohrmöglichkeit ausgeführt werden [43].

Bei KMR kann auch ein ungeplanter nachträglicher Anschluss durch Anbohren der Verteilleitung während des Betriebs erfolgen. Bei PMR kann nachträglich ein T-Stück durch Einfrieren, Abquetschen oder Ausserbetriebnahme der Leitung eingesetzt werden.

4.6.6 Berücksichtigung anderer leitungsgebundener Sparten

Die Ausführungen in Kapitel 4.6.6 basiert auf der vom AGFW herausgegebenen Werk «Bau von Fernwärmenetzen» [5] und beschreiben die Berücksichtigung anderer leistungsgebundener Leitungen. Von den im Strassenraum vorhandenen Versorgungsleitungen (Gas, Wasser, Strom) ist ein ausreichender Mindestabstand zu wahren. Dazu sind neben den gültigen Richtlinien die örtlichen Bestimmungen zu beachten. Zudem sind nachfolgend grundsätzliche Empfehlungen aufgeführt.

4.6.6.1 Strom- und Fernmeldekabel

Die Übertragungsleistung der in das Erdreich gelegten Starkstromkabel sinkt mit steigender Bodentemperatur [5]. Zwischen Fernwärmeleitungen und Strom- und Fernmeldekabel werden lichte Mindestabstände nach Tabelle 4.9 empfohlen.

Bei der Parallelführung von Starkstromkabeln und Fernwärmeleitungen ist für Montagearbeiten an den Kabeln angemessen Platz zu berücksichtigen. Besonders zu beachten sind Schächte, die das normale Profil der Fernwärmeleitung überschreiten [5].

Gleichstrombahnanlagen oder andere Gleichstromanlagen können durch ihre Streuströme eine Korrosionsgefahr für unterirdisch verlegte Fernwärmeleitungen darstellen [5].

Tabelle 4.9 Lichter Mindestabstand von Fernwärmeleitungen zu Strom- und Fernmeldekabel bei Kreuzungen und Parallelführung [5].

Kreuzung und Parallelführung bis 5 m Länge	Mindestabstand [cm]
1 kV-Signal- oder Messkabel	30
10 kV-Kabel oder ein 30 kV-Kabel	60
Mehrere 30 kV-Kabel oder Kabel über 60 kV	100
Parallelführung über 5 m Länge	Mindestabstand [cm]
1 kV-Signal- oder Messkabel	30
10 kV-Kabel oder ein 30 kV-Kabel	70
Mehrere 30 kV-Kabel oder Kabel über 60 kV	150

4.6.6.2 Gas- und Wasserleitungen

Bei Parallelführung von Fernwärmeleitungen mit Gas- oder Wasserleitungen soll zwischen der Fernwärmeleitung und der Fremdleitung ein lichter Mindestabstand von 40 cm bestehen. Zu Gasleitungen ist der grösstmögliche Abstand zu halten, da durch schadhafte Gasleitungen erhebliche Gefahren bestehen können. Keinesfalls dürfen Gasleitungen ungeschützt Fernwärmeleitungen durchqueren. Auch bei Kreuzung mit anderen Leitungen soll ein lichter Abstand von 20 bis 30 cm möglichst nicht unterschritten werden [5].

Tabelle 4.10 Lichter Mindestabstand von Fernwärmeleitungen zu Gas- und Wasserleitungen bei Kreuzungen und Parallelführung [5].

Kreuzung	Mindestabstand [cm]
Gasleitung	möglichst gross; jedoch ≥ 30
Wasserleitung	20 – 30
Parallelführung	Mindestabstand [cm]
Gasleitung	möglichst gross; jedoch ≥ 40
Wasserleitung	≥ 40

Wenn Leitungsführungen durch Betonkanäle unumgänglich sind, sollten Mantelrohre eingesetzt oder andere konstruktive Massnahmen getroffen werden [5].

4.6.6.3 Abwasser- und Regenwasserleitungen

Abwasserkanäle liegen meist tiefer als Fernwärmeleitungen. Trotzdem sollten Fernwärmeleitungen nicht parallel über Abwasserkanäle gelegt werden, damit bei Reparaturen am Abwasserkanal die Fernwärmeleitungen nicht beschädigt und die Reparaturarbeiten nicht behindert werden. Der Raum parallel über dem Abwasserkanal kann nur dann benutzt werden, wenn dieser Kanal bei einem Schaden von innen her instandgesetzt werden kann und eine Freilegung von oben nicht mehr nötig ist [5].

Beim Überbauen einer Leitung durch eine andere, sind die statischen Gegebenheiten zu beachten [5].

Bei der Planung der Fernwärmetrasse muss auf unterirdische Bauwerke, wie Einstiege, Staukammern und Rückhaltebecken Rücksicht genommen werden. Es sind deshalb alle Schachtdeckel zu öffnen, um die Lage des unterirdischen Bauwerks festzustellen. Die Hauptabflussleitungen zum Abwasserkanal können oft ein Hindernis sein. Bei der Planung kann dies Anlass sein, die Fernwärmeleitung ausserhalb ihres Bereichs anzuordnen, weil die Umlegekosten für diese Leitungen hoch sein können [5].

4.7 Tiefbau

Die Tiefbauarbeiten im Fernwärme-Leitungsbau betreffen die Gräben für die Verlegung erdverlegter Leitungen sowie die anschliessende Instandstellung der Oberfläche. Hinzu kommen Kanäle für kanalverlegte Leitungen, Schachtbauwerke für Entlüftungen, Entleerungen, Kabelzugsarbeiten, Sektionierungen, Pumpstationen, Netztrennungen und Wärmeübergabestationen sowie grabenlose Vortriebsverfahren oder Tunnelbauten bei der Unterquerung von Objekten. Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über die Techniken des Tiefbaus, über Standards, Richtlinien und weiterführende Literatur für die Tiefbaugestaltung. Es beschreibt die Abläufe und Anforderungen zur zweckmässigen Gestaltung von Fernwärmeanlagen. Der Fokus richtet sich dabei auf die heute gängigen Methoden der direkten Erdverlegung. Spezielle Verfahren wie Verlegung in Ortsbetonkanälen oder -Schächten werden nicht oder nur am Rande behandelt. Vor allem in dichtbesiedelten Gebieten sind für die Planung und Ausführung von Tiefbauarbeiten umfangreiche Kenntnisse des Planers notwendig.

4.7.1 Allgemeines

Ohne Tiefbauarbeiten kann kein Fernwärmenetz erstellt werden. Vielmehr ist es sogar so, dass die Randbedingungen aus dem Tiefbau massgeblichen Einfluss auf die Leitungsführung und auf die Tiefenlage der Rohre haben. So ist z.B. der Strassenbereich in der Regel von Werkleitungen bereits belegt, und die Fernwärme muss mit dem restlichen zur Verfügung stehenden Platz auskommen. Andernorts können Gebäude nicht auf kürzestem Weg erschlossen werden, da vielbefahrene Strassen oder frisch sanierte Plätze dies verhindern. Der Planer muss diese Randbedingungen kennen und entsprechend berücksichtigen.

Von den gesamten Investitions- und Betriebskosten eines Wärmeverbundes fällt der grösste Anteil, in der Regel etwa 60 %, für das Leitungsnetz an [15]. Davon wiederum gut 60 % an Kosten für den Leitungsbau (Tiefbau und Leitungen). Von diesen Leitungsbaukosten werden wiederum rund 60 % für die Tiefbauarbeiten aufgewendet. Eine sorgfältige Planung der Leitungsführung hilft daher, die Wirtschaftlichkeit eines Projektes zu verbessern. So sollte z.B. eine Trasse entlang von Hauptstrassen vermieden werden.

Eine der wichtigsten Grundlagen für die Trassenplanung, spätestens jedoch mit dem Bauprojekt, ist die Erhebung sämtlicher vorhandener Werkleitungen. Manche Stadtwerke besitzen zudem eigene Werkvorschriften, welche bei der Planung zu berücksichtigen sind. Nicht zuletzt ist auch die Beurteilung der Rohrstatik für die Leitungsführung von Belang. Bei starren Rohrsystemen, insbesondere bei Dimensionen > DN 80, empfiehlt sich die Erstellung von Längsprofilen in bebauten Gebieten.

Zudem ist es ratsam, bereits frühzeitig die Baustellenlogistik und die Verkehrsführung während des Bauzustandes zu berücksichtigen (evtl. anhand von Bauphasenplänen) sowie den Kontakt zu den zuständigen Stellen von Gemeinden, Kantonen oder Bund zu suchen.

Um eine lange Lebensdauer erdverlegter Fernwärmeleitungen zu gewährleisten, ist ein hoher Ausführungsstandard erforderlich.

4.7.2 Trassenplanung

4.7.2.1 Starre Rohrsysteme

Grundsätzlich ist bei der Trassenplanung darauf zu achten, dass die Leitungen mit möglichst kurzen Distanzen zu den Kunden führen. Eine Leitungsführung mit langen Hausanschlussleitungen ist zu vermeiden. Nach Festlegung der horizontalen Lage ist die Tiefenlage zu definieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass neben der Hauptleitung auch noch Hausanschlüsse erstellt werden müssen, welche idealerweise nach oben abzweigen sollten. Aufgrund der oft schon stark mit Werkleitungen belegten Strassen ist eine Verlegung in der Tiefenlage der bestehenden Wasserleitungen erfahrungsgemäss am einfachsten realisierbar (siehe auch Kapitel 4.6).

Bei Richtungsänderungen ist der Rohrstatik (Kapitel 7.5) grosse Beachtung zu schenken. Richtungsänderungen bzw. Dehnschenkel kommen vorwiegend in folgenden Fällen zum Einsatz:

- bei Gefällswechseln
- bei Hindernissen
- bei Richtungsänderungen
- bei Durchpressungen

Im Bild 4.22 bis Bild 4.25 sind Empfehlungen dargestellt, wie diese Richtungsänderungen zu planen sind.

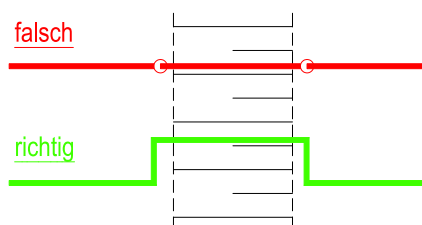


Bild 4.22 Gefällswechsel

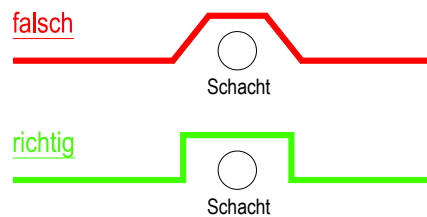


Bild 4.23 Hindernis

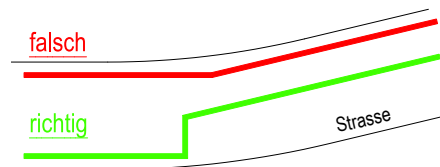


Bild 4.24 Richtungsänderung (Bogenrohr oder elastisches Biegen als Alternative)

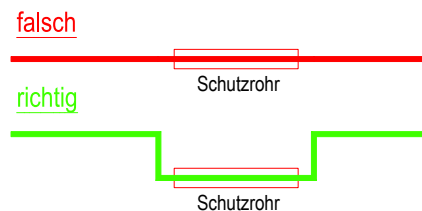


Bild 4.25 Durchpressung

Um die Leistungsführung bei Richtungsänderung zu optimieren, besteht auch die Möglichkeit gerade Verbundrohre durch Kaltverformung zu biegen und sogenannte Bogenrohre einzusetzen (Bild 4.24). Beim Biegen ist darauf zu achten, dass im Stahlmediumrohr, im Dämmstoff, im Mantelrohr und den Adern der Leckageüberwachung keine unzulässigen Spannungen und Verformungen (Ovalisierungen) auftreten. Bogenrohre können Werkmässig oder auf der Baustelle mit entsprechenden Biegewerkzeugen hergestellt werden. Das Mantelrohr ist dabei vor Beschädigung zu schützen. Minimale Biegeradien für Bogenrohre die auf der Baustelle gebogen werden, sind aus dem AGFW-Merkblatt FW401 Teil 9 zu entnehmen. Weitere Hinweise zur Statik sind in Teil 10 enthalten.

Sämtliche Hochpunkte müssen zwingend entlüftet sowie sollten mit Absperrarmaturen ganze Stränge abgesperrt werden können. Fernwärmeleitungen grösser DN 100 sollten zudem entleerbar sein. Zum Einsatz kommen Schächte, welche aus Ortsbeton oder aus vorgefertigten Produkten erstellt werden. Schachtbauwerke kommen auch bei Absperrarmaturen und bei Kabelzugschächten für Leitsysteme und Lecküberwachung zum Einsatz. Viele Wärmeversorger besitzen bereits Vorschriften, wie solche Schächte zu gestalten sind. Alternativ und wesentlich kostengünstiger kann z.B. die Leitung über Entlüftungs- und Entleerungsarmaturen mit Druckluft ausgeblasen werden.

Durch die Tatsache, dass es sich bei KMR-Rohren um starre Systeme mit in der Regel grossen Durchmessern handelt, die Trassen mit Gefälle ausgestattet werden

müssen, die Statik das Ausweichen bei Hindernissen (z.B. Elektrorohrblock) erschwert usw., liegt die Erstellung eines Längenprofils nahe. Nachfolgend sind einige Argumente, welche für ein Längenprofil sprechen, aufgelistet.

- Erhöhung der Planungssicherheit
- Erkennen der Lage von Entlüftungen und Entleerungen
- Grundlage für die Tiefbauausschreibung (Normpositionenkatalog NPK [78] unterscheidet zwischen verschiedenen Grabentiefen)
- Erkennen von kritischen Tiefenlagen (zu viel bzw. zu wenig Überdeckung)
- Erkennung von Konfliktstellen mit bestehenden Werkleitungen
- Für einen statischen Nachweis muss die Verlegetiefe bekannt sein
- Bei Hausanschlüssen wird der Zusammenhang zwischen Terrain- und Kellerhöhe hergestellt.

Die Ausgestaltung der Gräben richtet sich nach den Rohrdimensionen, den Grabentiefen sowie dem Terrain (Strasse oder Grünland). Dabei ist zu beachten, dass im Bereich der Dehnzonen für die Montage eine grössere lichte Grabenbreite notwendig ist. Es wird zwischen verbauten (gespriessten) und geböschten Gräben unterschieden.

Grundsätzlich kommen verbaute Gräben vorwiegend im Strassenbereich, geböschte Gräben dagegen im Grünland zum Einsatz. Die Art des Grabentyps ist auch aus Sicht der Bauarbeitenverordnung des Bundes (BauAV) [77] und nach der DIN 4124 [109] zu wählen.

4.7.2.2 Flexible Rohrsysteme

Die Trassenplanung für flexible Rohre gestaltet sich wesentlich einfacher als bei starren Rohren. Ausser im Übergangsbereich zwischen starren und flexiblen Rohren sind in der Regel keine rohrstatischen Randbedingungen der Leitungsführung zu berücksichtigen. Beim Einsatz von PEX-Mediumrohren fällt die Rohrstatik völlig ausser Gewicht.

Flexible Rohrsysteme werden mittlerweile grossflächig eingesetzt, in der Regel bis DN 100. Das Haupt-Einsatzgebiet liegt jedoch bei kleineren Rohrdimensionen für die Feinverteilung und für Hausanschlüsse. Grössere Dimensionen kommen z.B. zur Überwindung von Steilhängen oder bei Bachquerungen zum Einsatz.

Bei der Planung ist speziell zu beachten, dass die Radien für die Verlegung genügend gross gewählt werden. Besonders bei grösseren Dimensionen sind die von den Herstellern genannten Mindestradien knapp ausgelegt, was in untenstehendem Beispiel verdeutlicht werden soll (Bild 4.26).

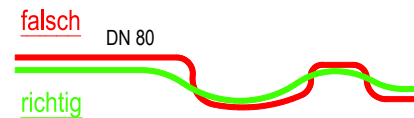


Bild 4.26 Radien bei der Verlegung flexibler Rohrsysteme.

Ein grosser Vorteil von flexiblen Leitungen besteht in der viel schnelleren Bauweise, da der Graben schmaler und vorwiegend ungespriesst erstellt werden kann. Die Verlegearbeiten der Rohre dauern normalerweise einen Tag, gefolgt von einem weiteren Tag für die Muffenmontage.

4.7.2.3 Bewilligungsverfahren

Ein weiterer Punkt bei der Trassenplanung betrifft die Bewilligungsfähigkeit. So kann es wirtschaftlich sinnvoll sein, eine Fernwärme-Versorgungsleitung über unbebautes Privatland zu verlegen. Allerdings muss in einem solchen Fall die Dienstbarkeit geregelt sein, bevor weitere Planungsschritte, wie das ordentliche Bewilligungsverfahren oder die Ausschreibung, in Angriff genommen werden.

Auch sind Vorabklärungen mit den Behörden zu treffen, wie das Bewilligungsverfahren durchgeführt werden muss. Die Unterschiede zwischen den Gemeinden und Kantonen sind, auch was die Dauer des Verfahrens betrifft, teilweise beträchtlich. So reicht in manchen Kantonen ein einfaches Aufgrabungsgesuch, während in anderen ein ordentliches Baubewilligungsverfahren durchgeführt werden muss.

Es ist abzuklären, ob Strassen gequert oder belegt werden dürfen und wie sie instand gestellt werden müssen. Weiter ist eine Umfrage bei anderen Werkleitungseigentümern zu empfehlen, welche die vorgesehenen Bau-massnahmen für die Fernwärme für koordinierte Arbeiten nutzen können. Dies kann zu geringeren Baukosten für die Fernwärme führen.

4.7.3 Bauablauf

Die Bauarbeiten für Fernwärmeleitungen sind grundsätzlich in 4 Phasen gegliedert:

- Grabenaushub (inkl. Mauerdurchführungen und Schachtbauwerke)
- Rohrleitungsbau
- Grabenverfüllung
- Instandstellung der Oberfläche

Aus Sicht des Tiefbauunternehmers können Unterbrüche von mehreren Tagen, im Falle der Instandstellung gar von mehreren Monaten entstehen. Es ist Sache des Planers, ein Rahmenterminprogramm zu verfassen, welches ein möglichst unterbruchfreies Arbeiten des Tiefbauunternehmers ermöglicht.

Aus Sicht des Rohrbaus sind möglichst lange Etappen wünschenswert, und zwar unabhängig vom gewählten Verlegesystem bzw. Rohrtyp. Wesentliche Vorteile von langen Etappen sind z.B. die Reduktion der Anzahl

Druckproben, die Ermöglichung von Vorspannungen, die Verhinderung von Muffen bei flexiblen Rohren oder von Kleinmengen-Montagen. Alle genannten Punkte wirken sich auf Baukosten und Gesamtbauzeit aus.

Vor Baubeginn ist durch die Bauleitung eine Begehung durchzuführen, an der neben dem Tiefbauunternehmer auch der Rohrbauer und evtl. die für den Verkehr zuständigen Behördenvertreter teilnehmen. Neben den Installationsplätzen für den Tiefbau sind auch Rohrzwischenlagerplätze, Rohreinhebeöffnungen in der Grabenspriessung sowie die Strom- und Wasserversorgung zu klären. Zu beachten sind auch die Merkblätter der AGFW FW 401, Teil 12 und 18 [100].

4.7.3.1 Grabenaushub

Sind keine Vorgaben der Bauherrschaft bzw. der Werke vorhanden, gelten beim Grabenaushub die Vorgaben der Rohrlieferanten. Übergeordnet zu diesen Vorgaben stehen in jedem Fall die Vorschriften der SUVA [87] und [86], die BauAV [77] sowie die DIN 4124 [109]. Aus den folgenden Bildern kann die **lichte Grabenbreite** abgeleitet werden.

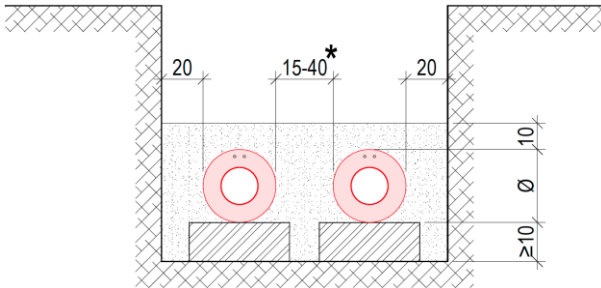


Bild 4.27 Lichte Grabenbreite ungeböscht (* gemäss Herstellerangaben; Angaben in cm).

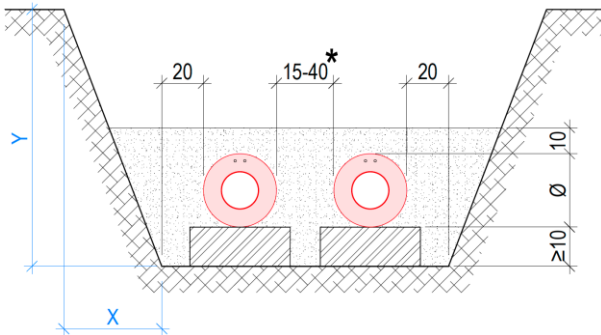


Bild 4.28 Lichte Grabenbreite geböscht (* gemäss Herstellerangaben; Angaben in cm).

Bei gut verfestigtem, standfestem Material (z.B. Lehm) kann bis zu einer Grabentiefe von 1.50 m auf eine Spiessung verzichtet werden (Bild 4.27). Ab einer Grabentiefe von 1.50 m müssen die Gräben aus Sicherheitsgründen zwingend verspiessert oder abgeböscht ausgeführt werden. Aufgrund der langen und vielfach gleichzeitigen Erstellung mehrere Grabenstappen ist zu beachten, dass sehr viel Spiessmaterial verwendet wird, welches die Tiefbauunternehmung vorhalten muss.

Das Verhältnis X:Y bei geböschten Gräben (Bild 4.28) richtet sich nach dem Aushubmaterial. So liegt das Verhältnis der Böschungsneigung in festem Material wie z.B. Lehm bei **1:3**, während es in lockerem (rolligen) Material wie z.B. Schotter bei **1:1** zu liegen kommt.

Ob das **Aushubmaterial** seitlich oder auf einer Baustellendeponie gelagert werden kann oder abgeführt werden muss, ist für die Rohrverlegung zunächst nicht relevant. Da aber Material für die Rohrumhüllung zugeführt werden muss, ist in jedem Fall ein beträchtlicher Teil des Aushubmaterials abzuführen.

Freigelegte **Werkleitungen** sind gemäss Auflagen der Werkleitungseigentümer zu sichern und zu schützen.

Bei flexiblen Rohrsystemen wird der Graben vor der Rohrverlegung mit dem Rohrumhüllungsmaterial in einer Stärke von mind. 10 cm verfüllt.

Mauerdurchführungen erfolgen in der Regel bei Hausanschlüssen, wenn Versorgungsleitungen durch Einstallhallen führen oder bei Schachtbauwerken aus Ortsbeton. Die Anforderungen sind generell eine wasserdichte Einföhrung der Rohre vom Erdreich in die Gebäude. Zuwiehlen werden auch Gasdichte Einföhrungen verlangt. Für die Erfüllung dieser Anforderungen ist es zwingend erforderlich, dass **keine** lateralen, axialen oder radialen **Bewegungen** seitens der Rohre auf die Durchföhrung einwirken. Die Leitungsföhrung ist entsprechend zu planen.

Die Durchföhrungen werden normalerweise mit Kernbohrungen erstellt. Dabei sollte im Vorfeld geklärt sein, wie die Durchföhrungen abgedichtet werden. In Frage kommen hierfür Maudichtringe aus Neopren-Gummi, welche über die Rohre geschoben werden, oder Ringraumdichtungen. Die Tabelle 4.11 zeigt die unterschiedliche Dimensionierung der Kernbohrungen auf. Massgebend ist der Durchmesser des Hüllrohres (z.B. das PE-Mantelrohr bei KMR).

Tabelle 4.11 Durchmesser der Kernbohrungen in mm in Abhängigkeit von Rohrdimensionen und Dichtungsart.

Durchmesser Kernbohrungen	Durchmesser des Hüllrohres (z.B. Mantelrohr bei KMR)											
	110	125	140	160	180	200	225	250	280	315	355	400
Mauerdichtring	200	200	250	250	300	300	350	350	400	400	450	500
Ringraumdichtung	200	200	200	250	250	300	300	350	350	400	450	500

Einsatzgebiet der einfacheren Mauerdichtringe ist in Gebieten mit gut durchlässigen Böden mit **Steigung** in Richtung Durchführung. In allen anderen Gebieten sowie in Hanglagen, bei Staunässe oder bei **Gefälle** in Richtung Durchführung sind Ringraumdichtungen einzusetzen. Es ist zu beachten, dass beim Einsatz der Ringraumdichtungen diese im Innern der Gebäude nicht verputzt werden dürfen, da sie bei Bedarf angezogen werden müssen. Im Neubaubereich bieten sich auch sogenannte Mehrsparten-Hauseinführungen (Bild 4.29) mit der unabhängigen Abdichtung einzelner Leitungen an (Wasser, Fernwärme, Strom, etc.).

Zur Dimensionierung und Ausführung wird auf Herstellerangaben und die AGFW FW 401 [100] Teil 7 verwiesen. Die Anforderungen für Bauwerksabdichtungen sind in der DIN 18195 [105] festgehalten und sollten dementsprechend beachtet werden.



Bild 4.29 Beispiel Mehrsparten-Hauseinführung
Quelle: DOYMA GmbH.

Bei **Schachtbauwerken** wird zwischen begehbaren und nicht begehbaren Schächten unterschieden. Begehbare Schächte werden aufgrund ihrer Grösse vorwiegend in Ortsbeton erstellt. Für die Ausführung gelten die Mindestanforderungen von Arbeitsblatt FW 433 der AGFW [103] sowie die Vorschriften der SUVA ([87] und [86]) und die BauAV [77]. Diese Vorschriften beinhalten unter anderem folgende Punkte:

- Mindesthöhe Innenraum Schächte für Bedienung von Armaturen (1,8 m) und Mindestfläche für Bedienarbeiten (1,5 m²), Mindestbreiten (1 m), Bedienungsgänge (min. 500 mm)
- Schachtbelüftung (natürliche Zirkulation)
- Schachtsohle mit Pumpensumpf oder Bodenablauf
- Schachteinstieg (min. 0,8 m, resp. 0,6 m) und Ausrüstung

Bei den nicht begehbaren Schächten (z.B. mit Brunnrinnen) ist besonderer Wert auf deren Fundation zu legen, insbesondere im Strassenbereich.

4.7.3.2 Rohrleitungsbau

In dieser Phase pausieren die Tiefbauarbeiten. Aus Sicht des Tiefbauunternehmers können aber Beihilfe bei der Rohreinbringung, Umspriessarbeiten oder die Erstellung von Vorspannfestpunkten anstehen.

In den Kapitel 4.4 bis 4.6 wird auf den Netzaufbau, unterschiedliche Verlege-Methoden und typische Verlege-Situationen eingegangen. Auf eine ausführlichere Dokumentation zum Rohrleitungsbau, wie z.B. Ausführung der Schweissarbeiten, Muffenmontage, Dichtprüfung, etc., wird in diesem Planungshandbuch jedoch aus Platzgründen verzichtet.

Weiterführende Literatur zum Rohrleitungsbau bietet z.B. das Regelwerk und auch weitere Publikationen von der Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V. wie z.B. das Technische Handbuch Fernwärme [6] oder auch das Montage-Handbuch [8] vom Bundesverband Fernwärmeleitungen e.V. bietet detaillierte Informationen zu den einzelnen Arbeitsschritten und Abläufe im Rohrleitungsbau.

Grundsätzlich sind bei der Rohrverlegung nur Unternehmen zu beauftragen, die ihre fachliche Eignung nachweisen können. In der Schweiz ist es üblich, bei öffentlichen Ausschreibungen in der Regel obligatorisch, dass das für den Rohrleitungsbau verantwortliche Unternehmen anhand Referenzen deren Eignung nachweisen muss. Üblicherweise umfasst die Referenz für den Rohrleitungsbau zwei ähnliche Anlagen in vergleichbarer Grössenordnung. Weiter muss das Unternehmen z.B. nachweisen, dass die angestellten Schweißer über die erforderlichen Schweisszertifikate verfügen (Schweissklasse B). In Deutschland und Österreich wird bei öffentlichen Ausschreibungen auch eine Zertifizierung des Unternehmens nach dem AGFW Arbeitsblatt FW 601 [106] verlangt.

Nach Fertigstellung der Schweissarbeiten sind die Schweissnähte in dem zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer vereinbarten bzw. in der Projektbeschreibung gefordertem Umfang zu prüfen. In der Regel folgt auf eine Sichtprüfung (nach DIN EN ISO 17637) eine zerstörungsfreie Schweissnahtprüfung im entsprechend festgelegten Umfang. Bei einer Durchstrahlungsprüfung ist die Prüfklasse B der DIN EN 1435 anzustreben. Eine Eindringprüfung ist nach DIN EN 571-1, die Ultraschallprüfung nach EN 1714, eine Magnetpulverprüfung nach DIN EN ISO 17638 und eine Wirbelstromprüfung nach DIN 54141 auszuführen.

Nach der zerstörungsfreien Prüfung erfolgt die Dichtheits- und/oder Festigkeitsprüfung nach AGFW-Merkblatt FW 602. Die Sichtverfahren mit Luft werden als Regelprüfung gegenüber denen mit Wasser empfohlen, dabei werden die Schweissnähte mit einem schaumbildenden Mittel benetzt. Ist innerhalb von mindestens einer Minute keine Bläschenbildung festzustellen, gilt die Dichtheit als nachgewiesen. Bei der Methode mit innerem Luftüberdruck beträgt der Prüfdruck 0,2 bis 0,5 bar, mit äusserem Luftunterdruck (Vakuumbrille) maximal 0,6 bar absolut. Eine Kaltwasserdruckprobe an der entlüfteten Trasse ist in Anlehnung an das DVGW-Arbeitsblatt G 469, Verfahren A1 auszuführen. Der Prüfdruck beträgt das 1,3-fache des Betriebsdruckes am Hochpunkt und ist 3 Stunden zu halten.

4.7.3.3 Grabenverfüllung

Nach Beendigung des Rohrleitungsbaus (mit Muffen- und Dehnkissenmontage als letztem Schritt) muss, bevor das Sandbett erstellt werden kann, die Trasse durch einen verantwortlichen Bauleiter freigegeben werden.

Die Rohrumhüllung mit feinkörnigem Material besteht aus Schlemmsand (Korngrösse 0-0.75 mm) oder gewaschenem Rundkies (Korngrösse 0-4 mm, keine gebrochenen Materialien erlaubt!). Bei den starren Systemen ist darauf zu achten, dass die Rohre sauber **unterstopft** werden. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei, um Hohlräume zu vermeiden, den Zwischenräumen oder auch Rohrzwickeln zwischen den Rohren zu widmen. Diese Räume müssen gesondert unterstampft und verdichtet werden. Dadurch werden spätere Setzungen sowie Verschiebungen vermieden. Während dieser Arbeiten sind gleichzeitig eventuell verwendete Hilfsauflager zu entfernen, sofern es sich nicht um Sandsäcke, die aufzuschlitzen sind, oder Hartschaumauflager handelt. Dieser Arbeitsschritt muss immer von Hand erfolgen. Das **Einschlämmen** der Rohrumhüllung **ist nicht erlaubt!** Die Rohre müssen mindestens 10 cm mit diesem feinen Material umhüllt werden. Es empfiehlt sich, auf die Rohrumhüllung pro Rohr ein Trassen-Warnband zu verlegen.

Wenn es aufgrund ungünstiger Bedingungen nicht ausgeschlossen ist, dass während der Tiefbauarbeiten der Bettungssand z.B. durch Regen ausgeschwemmt wird, ist die Bettungszone mit Geotextilien zu umhüllen. In Hang- bzw. Steilstrecken sollte dies wegen der Drainagewirkung des Grabenprofils generell beachtet werden. Durch die Wasserzugabe liegt der Wassergehalt des Sandes oberhalb des optimalen Gehaltes und genügt nicht dem Verdichtungsgrad ($D_{Pr} \geq 97\%$). Hierbei werden die Korngrössen entmischt, so dass die Sollreibungsbeiwerte am KMR nicht zu erzielen sind und es stellt sich der sogenannte ‚Tunneleffekt‘ ein. Unter anderem ist aus diesen Gründen, gemäss AGFW FW 401 Teil 12, das Einschlämmen des Sandes nicht als Stand der Technik eingestuft.

Sollten fließfähige Bettungsmaterialien wie z.B. selbststabilisierende Sandmischungen (SSM) oder Bodenmörtel verwendet werden, ist zu beachten, dass hinsichtlich des Entfernens dieser mit einfachem Gerät noch keine Langzeiterfahrungen vorliegen. Zu den mechanischen Kennwerten wie Langzeitreibverhalten liegen in der Praxis ebenfalls keine dauerhaften und abgesicherten Prüfergebnisse vor. Eine allg. Zulassung dieser Verfüllmaterialien als Strassenbaustoff durch die Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, ist bisher nicht erfolgt. In den rohrstatischen Grundlagen nach AGFW FW 401 Teil 10 und 11 sind diese nicht berücksichtigt.

Ersatzstoffe wie Schaumglasgranulate, Brechsand, Recyclingmaterial o.ä. sind in der Leitungszone als Bettungsmaterial bzw. Sandbett grundsätzlich unzulässig.

Sind **Schutzmassnahmen** für die Rohre infolge Über- oder Unterschreitung der zulässigen Überdeckungshöhe

notwendig, sind diese nach der Rohrumhüllung zu veranlassen. Wird die maximale Überdeckungshöhe gemäss Angaben des Rohrlieferanten überschritten, empfiehlt sich der Einsatz von vorgefertigten U-Profilen aus Beton. Wird im Strassenbereich die Überdeckungshöhe von 60 cm unterschritten, können über der Rohrumhüllung **Lastverteilerplatten** zur Verminderung des Rad-drucks erstellt werden (Bild 4.30).

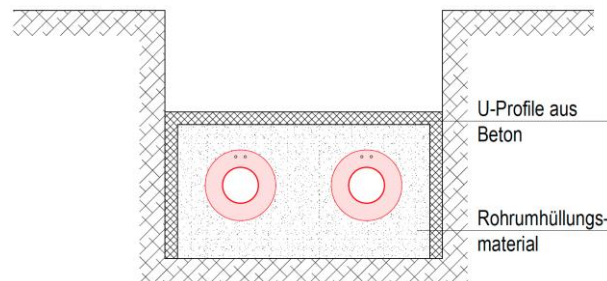


Bild 4.30 Beispiel Schutzmassnahmen bei Überschreitung der maximalen Überdeckungshöhe mit Lastverteilerplatten aus vorgefertigten U-Profilen aus Beton.

Im Grünland und insbesondere in Gärten wird bei Überdeckungen kleiner 65 cm generell die Verlegung von **Gartenplatten** aus Beton empfohlen (Bild 4.31). Diese Massnahme dient als Schutz vor mechanischer Beschädigung (z.B. durch Einschlagen von Pfählen).

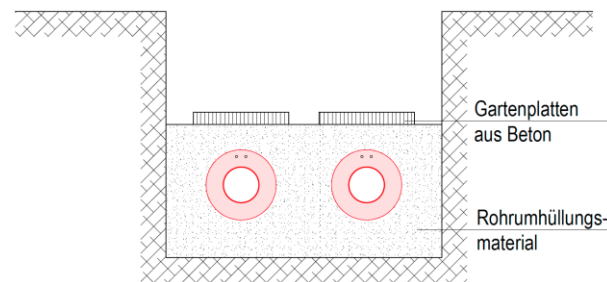


Bild 4.31 Beispiel Schutzmassnahmen gegen mechanische Beschädigung mit Gartenplatten aus Beton.

Nach der Rohrumhüllung erfolgt die eigentliche Grabenverfüllung mit Aushub- oder gut verdichtungsfähigem Material (z.B. Kiesgemisch 0/45, frostsicher). Das Material ist in Schichten von je ca. 30 bis 50 cm Stärke einzubringen und mit geeigneten Mitteln zu verdichten. Bestehende, freigelegte Werkleitungen sind mit Magerbeton zu untermauern. Dabei ist auch auf die Vorschriften der einzelnen Werke zu achten. Allfällige Verbauungen der Gräben können in diesem Arbeitsschritt entfernt werden. Je nach Grabentiefe besteht die Möglichkeit, auf der ersten Zwischenplanie Kabelschutzrohre für Leitsystem oder Lecküberwachung zu verlegen. Auf die fachgerechte Verdichtung ist grösster Wert zu legen, da bei unsachgemäss ausgeführten Arbeiten später Schäden auftreten können, insbesondere im Strassenbereich.

Der oberste Teil des Grabens besteht aus Oberboden (Grünland) oder der Kofferung inkl. Belagsschicht (Stassen, Trottoirs). Die Ausführung der Kofferung und der Belagsschichten ist nach den kantonalen oder kom-

munalen Vorschriften bzw. nach SN 640535C [92] zu erstellen.

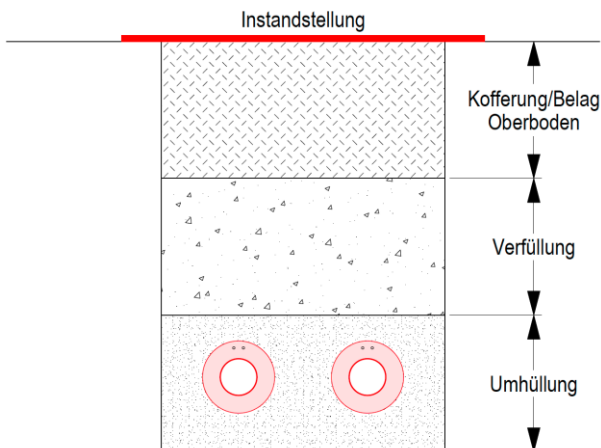


Bild 4.32 Schematische Darstellung (Schichtung) der Grabenverfüllung.

4.7.3.4 Instandstellung

Als Instandstellung wird die Wiederherstellung des Oberflächen-Zustands vor Beginn der Bauarbeiten bezeichnet. Im Kulturland ist die Umsetzung am weitesten zu bewerkstelligen. Aufwändiger wird es in Gärten, wo Rasen neu gesät, Sträucher neu gepflanzt oder Gehwege wieder versetzt werden müssen. Im Strassenbereich bestimmen in der Regel die örtlichen Behörden (Strassenmeister) den Umfang des nachzubessernden (Deck-)Belags.

Die Instandstellung erfolgt oft zeitlich versetzt zu den eigentlichen Tiefbauarbeiten. Gründe dafür sind z.B. Neubepflanzungen in Gärten, welche durch Gartenbauunternehmen und nicht durch den Tiefbauer ausgeführt werden. Ein weiteres Beispiel sind die Deckbelagsarbeiten im Strassenbereich, welche nicht während der kalten Monate ausgeführt werden dürfen.

4.8 Wasserqualität

Um Schäden durch Korrosion, Erosion oder Werkstoffüberbeanspruchungen in den Anlagen zu vermeiden, muss das Fernwärmewasser bestimmte Anforderungen erfüllen, die auch von der Wärmeerzeugung abhängig sind. Eine umfassende Darstellung liefern das AGFW-Regelwerk FW 510 [6] und die SWKI-Richtlinie BT102-01 [91]. Die folgenden Ausführungen fassen daraus die wichtigsten Punkte zusammen.

4.8.1 Wasserarten

In diesem Kapitel werden die in der Gebäude- und Fernwärmetechnik gebräuchlichen Begriffe für die unterschiedlichen Wasserarten kurz beschrieben. Besonderes Augenmerk wurde auf den Begriff Warmwasser gelegt, welcher in der Gebäude- und Fernwärmetechnik gebräuchlich ist. Aus diesem Grund wird in diesem Dokument für Warmwasser (warmes Trinkwasser) der Begriff Brauchwarmwasser und Brauchwarmwassererwärmung (kurz BWE) benutzt.

Weiter sind die nach SVGW definierten Flüssigkeitskategorien aufgeführt [88]. Gemäss diesen Flüssigkeitskategorien entspricht das Kreislaufwasser im Fernwärmenetz (primär- und sekundärseitig) in der Regel den Kategorien 3 und 4.

4.8.1.1 Begriffe in der Gebäudetechnik

Trinkwasser:

Nach der schweizerischen Lebensmittelgesetzgebung ist Trinkwasser definiert als Wasser, das natürlich belassen oder nach Aufbereitung bestimmt ist zum Trinken, zum Kochen, zur Zubereitung von Speisen sowie zur Reinigung von Gegenständen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen [67]. Unter Trinkwasser wird auch Wasser für Körperpflege und -reinigung (Dusch- und Badewasser usw.) verstanden.

Kaltwasser:

Kaltes Trinkwasser, dessen Temperatur nicht gezielt erhöht wird.

Warmwasser (Brauchwarmwasser):

Warmes Trinkwasser, dessen Temperatur durch Zuführung von Wärme erhöht wird. Nicht zu verwechseln mit Warmwasser in der Fernwärmetechnik.

Für den weiteren Gebrauch, wird in diesem Dokument für Warmwasser (warmes Trinkwasser) der Begriff Brauchwarmwasser und Brauchwarmwassererwärmung BWE benutzt.

Betriebswasser:

Wasser für gewerbliche und häusliche Einsatzbereiche, welches keine Trinkwasserqualität haben muss.

4.8.1.2 Begriffe in der Fernwärmetechnik

Rohwasser:

Das vor der Aufbereitungsanlage zur Verfügung stehende Wasser, unabhängig von einer eventuellen vorhergehenden ausserbetrieblichen Behandlung.

Weichwasser:

Durch Ionenaustausch von Erdalkalien befreites (enthärtetes) Wasser.

Entsalztes Wasser:

Durch Ionenaustausch von dissoziierten wasserlöslichen Stoffen weitestgehend befreites Wasser, gekennzeichnet durch eine elektrische Leitfähigkeit < 20 µS/cm und einen Kieselsäuregehalt < 0.5 mg/l.

Vollentsalztes Wasser:

Durch Ionenaustausch von dissoziierten wasserlöslichen Stoffen befreites Wasser (auch bezeichnet als Deionat, VE-Wasser oder salzfreies Wasser), gekennzeichnet durch eine elektrische Leitfähigkeit < 0.2 µS/cm und einen Kieselsäuregehalt < 0.02 mg/l.

Füll- und Ergänzungswasser:

Aufbereitetes Wasser, mit dem die Erst-, Neu- und Teilfüllung von Fernwärmenetzen erfolgt.

Kreislaufwasser:

Wasser, das in Fernwärmenetzen durch den Wärmeerzeuger, das Fernwärmenetz und allenfalls durch Heizkörper oder Wärmeübergabestationen fliesst. Der Begriff gilt nicht nur für Primärnetze, sondern auch für Wasser in einem Sekundärnetz.

Warmwasser :

Kreislaufwasser mit einer Temperatur ≤ 110 °C. Muss nicht zwingend über Trinkwasser-Qualität verfügen und ist nicht zu verwechseln mit Warmwasser in der Gebäudetechnik.

Heisswasser :

Kreislaufwasser mit einer Temperatur > 110 °C.

4.8.1.3 Flüssigkeitskategorien

Flüssigkeiten, die in Kontakt mit Trinkwasser kommen können, werden in fünf Kategorien eingeteilt [88]:

Kategorie 1:

Wasser für den menschlichen Gebrauch, das direkt einer Trinkwasserinstallation entnommen wird und den Bestimmungen der Lebensmittelgesetzgebung entspricht.

Kategorie 2:

Flüssigkeit die keine Gefährdung der menschlichen Gesundheit darstellt. Flüssigkeiten, die für den menschlichen Gebrauch geeignet sind, einschliesslich Wasser aus einer Trinkwasserinstallation, das eine Veränderung in Geschmack, Geruch, Farbe oder Temperatur (Erwärmung oder Abkühlung) aufweisen kann.

Beispiel: Warmes Trinkwasser, Fruchtsäfte, Suppen, Kaffee, Wasser von gekochten Lebensmittel, etc.

Kategorie 3:

Flüssigkeit die eine Gefährdung für Menschen durch die Anwesenheit eines oder mehrerer giftiger Stoffe darstellt. Beispiel: Heizungswasser (ohne Additive), Wasser mit Frostschutzmittel, Spülwasser für Geschirr- und Küchengeräte, Spülkastenwasser, zahnärztliche Arbeitsplätze, etc.

Kategorie 4:

Flüssigkeit die eine Gefährdung für Menschen durch die Anwesenheit eines oder mehrerer giftiger oder besonders giftiger Stoffe oder einer oder mehrerer radioaktiver, mutagener oder kanzerogener Substanzen darstellt. Beispiel: Heizungswasser mit Additiven, Wasser mit oberflächenaktiven Stoffen, Wasser mit Desinfektionsmittel, Wasser mit Algeciden, etc. Die Abgrenzung zwischen Kategorie 3 und 4 ist LD50 = 200 mg/kg Körpergewicht.

Kategorie 5:

Flüssigkeit die eine Gesundheitsgefährdung für Menschen durch die Anwesenheit von mikrobiellen oder viralen Erregern übertragbarer Krankheiten darstellt. Beispiele: Regenwasser, Schwimmbeckenwasser, Waschmaschinenwasser, WC-Wasser, Wasser aus Tiertränken, etc.

4.8.2 Empfehlung an die Wasserbeschaffenheit in der Fernwärmetechnik

Die in diesem Kapitel angegebenen Empfehlungen betreffen das Kreislaufwasser im Fernwärmenetz (primär- und sekundärseitig) und dienen dazu, wasserseitige Schäden durch Korrosion und Ablagerungen zu vermeiden und eine hohe Energieeffizienz zu sichern. Das Kreislaufwasser im Fernwärmenetz entspricht in der Regel der Flüssigkeitskategorie 3 oder 4. Die Anwendungsfälle werden nach der Betriebstemperatur des Anlagenwassers und zum Teil unter Berücksichtigung der Anlagengrösse unterschieden. Bei Abweichungen der Qualität des Rohwassers von den Richtwerten sind Korrekturmassnahmen (Wasseraufbereitung, Wasserbehandlung) vorzunehmen.

Weitere Informationen zu Messgrössen, Verfahren der Wasseraufbereitung und Wasserbehandlung sind im Anhang im Kapitel 12 zu finden.

4.8.2.1 Warmwasser bis 110°C

In der Tabelle 4.12 sind Richtwerte für das Füll- und Ergänzungswasser und in der

Tabelle 4.13 für das Kreislaufwasser angegeben. Neben diesen Richtwerten sind auch Anforderungen der Komponentenhersteller zu berücksichtigen .

Eine jährliche Kontrolle des Kreislaufwassers wird empfohlen.

Tabelle 4.12 Anforderungen an Füll und Ergänzungswasser bis 110°C [91].

Bezeichnung	Einheit	Soll
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	< 100
pH-Wert	-	6.0-8.5
Gesamthärte GH	mmol/l	< 0.1

Tabelle 4.13 Anforderungen an Kreislaufwasser bis 110°C [91].

Bezeichnung	Einheit	Soll
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	< 200
pH-Wert	–	8.2-10
Gesamthärte GH	mmol/l	< 0.5
Chloride	mg/l	< 30
Sulfate	mg/l	< 50
Sauerstoff	mg/l	< 0.1
Eisen gelöst	mg/l	< 0.5
Totaler organischer CO-Gehalt TOC	mg/l	< 30

4.8.2.2 Heisswasser ab 110°C

In Fernwärmanlagen sind bei Temperaturen des Kreislaufwassers über 110°C zwei wasserchemische Betriebsweisen üblich:

- salzarme Betriebsweise
- salzhaltige Betriebsweise.

In der Tabelle 4.14 sind Richtwerte für das Füll- und Ergänzungswasser und in der Tabelle 4.15 für das Kreislaufwasser ab 110°C aufgelistet. Neben diesen Richtwerten sind auch Anforderungen der Komponentenhersteller zu berücksichtigen.

Eine vierteljährliche Kontrolle des Kreislaufwassers wird empfohlen.

Tabelle 4.14 Anforderungen an das Füll und Ergänzungswasser ab 110°C [91].

Bezeichnung	Einheit	Wasserchemische Betriebsweise Sollwerte	
		salzarm	salzhaltig
Allgemein		farblos, klar, frei von ungelösten Stoffen	
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	10 - 30	>30 - 100
pH-Wert		8.0-10	8-10.5
Gesamthärte GH	mmol/l	< 0.02	< 0.02
Sauerstoff	mg/l	< 0.1	< 0.1

Tabelle 4.15 Anforderungen an das Kreislaufwasser ab 110°C [91].

Bezeichnung	Einheit	Wasserchemische Betriebsweise Sollwerte	
		salzarm	salzhaltig
Allgemein		farblos, klar, frei von ungelösten Stoffen	
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	10 - 30	>30 - 100
pH-Wert		9.0-10.0	9.0-10.5
Gesamthärte GH	mmol/l	< 0.02	< 0.02
Sauerstoff	mg/l	< 0.1	< 0.05
K _{8,2} (p-Wert)*	mmol/l	–	0.1-0.5
Phosphat	mg/l	3-6	5-10

Die Säurekapazität K_{8,2} gibt an, wie viel Säure eine Wasserprobe bis zum Umschlagspunkt des Indikators Phenolphthalein (pH 8,2) aufnimmt. Diese Messung gibt schlüssig Auskunft über die Laugenkonzentration, die im Wasser vorhanden ist und wird in mg/l angegeben. Diese Messung ist im Dampfkesselbereich zusätzlich durchzuführen.

5 Wärmeübergabe – Grundlagen

In diesem Kapitel wird die Anbindung der Hausanlage an ein Fernwärmenetz beschrieben. Grundsätzlich kann jedes Gebäude an ein Fernwärmenetz angeschlossen werden, sofern eine geeignete Hausanlage für Heizung und gegebenenfalls Warmwassererwärmung oder Lüftung vorhanden ist oder erstellt wird. Art, Umfang und technische Einzelheiten für eine Anbindung an ein Wärmenetz werden dabei in einem Wärmeliefervertrag festgelegt.

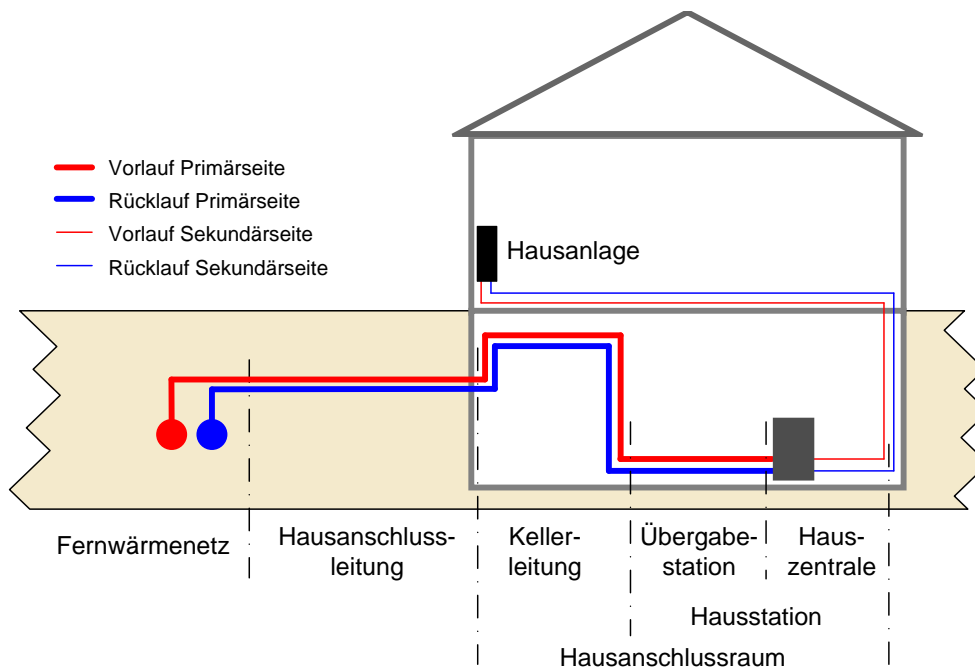


Bild 5.1 Übersicht zum Hausanschluss.

5.1 Begriffe

Im Bild 5.1 sind die wichtigsten Begriffe zur Wärmeübergabe auf Basis der DIN 4747-1 [78], der VDI 2036 [116] und den Erläuterungen in [6] sowie [56] zu sehen.

5.1.1 Hausanschlussleitung

Die Hausanschlussleitung verbindet das Fernwärmenetz mit der Übergabestation und gehört in der Regel zu den Betriebsanlagen des Wärmelieferanten. Auslegung und Ausführung erfolgen durch den Wärmelieferanten. Die Leitungsführung bis zur Übergabestation muss zwischen den Beteiligten abgestimmt werden. Die im Gebäude geführte Hausanschlussleitung vom Durchbruch ins Gebäude bis zur Übergabestation wird auch Kellerleitung genannt und ist mit einer Absperrmatur ausgerüstet.

5.1.2 Hausanschlussraum

In einem Hausanschlussraum werden die erforderlichen Anschlusseinrichtungen und Betriebseinrichtungen eingebaut. Lage und Abmessungen sind frühzeitig mit dem Wärmelieferanten abzustimmen. Planungsgrundlagen sind in der DIN 18012 [112] ausgeführt. In dieser ist auch festgelegt, dass für ein Ein- und Zweifamilienhaus kein Hausanschlussraum erforderlich ist.

Bei der Gestaltung des Hausanschlussraumes sind folgende Anforderungen zu beachten:

- Ideal ist eine Lage sollte nahe an der Eintrittsstelle der Hausanschlussleitung.
- Der Raum sollte verschliessbar und möglichst jederzeit zugänglich sein.
- Wegen Geräuschemissionen sollte der Raum nicht in der Nähe lärm sensiblen Räumen wie Schlafzimmern angeordnet sein.
- Der Raum sollte ausreichend be- und entlüftet sein.
- Für Wartungs- und Reparaturarbeiten ist eine ausreichende Beleuchtung erforderlich.
- Für die Hausstation ist ein elektrischer Anschluss erforderlich.
- Der Raum sollte über eine ausreichend dimensionierte Entwässerung verfügen, damit im Bedarfsfall bei Wartungs- und Reparaturarbeiten Entleerungen vorgenommen werden können. Zudem sollte auch eine Kaltwasserzapfstelle vorhanden sein.

5.1.3 Wärmeübergabestation

In der DIN 4747-1 [78] ist die Wärmeübergabestation als Bindeglied zwischen der Hausanschlussleitung und der Hauszentrale definiert. Die Wärmeübergabestation (auch Übergabestation) dient dazu, die Wärme bzw. das Wärmeträgermedium bestimmungsgemäss hin-

sichtlich Druck, Temperatur und Volumenstrom an die Hauszentrale zu übergeben.

Inzwischen ist es üblich, die Wärmeübergabestation nicht als selbstständige Einheit zu betrachten, sondern mit der Funktion der Hauszentrale zu verbinden, was als Kompaktstation bezeichnet wird. Dennoch stellt die Übergabestation traditionell die Eigentumsgrenze zwischen Wärmelieferanten und Wärmeabnehmer dar.

Die Bedingungen zur Gestaltung der Übergabestation stellt der Wärmelieferant mit den zum Wärmeliefervertrag erhobenen technischen Anschlussvorschriften (TAV). Mit dem Wärmelieferanten sind auch die Kombinationsmöglichkeiten mit der Hauszentrale abzustimmen, was insbesondere für Kompaktstationen unerlässlich ist. Einzelne Funktionen werden aber oft auch von beiden Partnern genutzt, z.B. Regelventile, die mit Notstellfunktion die Kundenanlage absichern.

Kapitel 8.1 behandelt die Hydraulik und Technik von Übergabestationen und die notwendigen Einrichtungen.

5.1.4 Hauszentrale

Die Hauszentrale ist das Bindeglied zwischen Übergabestation und Hausanlage. Sie dient der Anpassung der Wärmelieferung an die Hausanlage hinsichtlich Druck, Temperatur und Volumenstrom.

Bei der Gestaltung der Hauszentrale ist zu unterscheiden zwischen direktem (Bild 5.2) oder indirektem Anschluss (Bild 5.3). Beim indirekten Anschluss ist das Heizmedium des Wärmeabnehmers vom Wärmeträger des Wärmelieferanten durch einen Wärmeübertrager getrennt. Die Gestaltung der Hausanlage (Verteilungen im Gebäude, Heizflächen) kann in diesem Falle unabhängig gestaltet werden. Weitere Unterteilungen der Anlagentechnik entstehen aus den direkten Anschlussmöglichkeiten der Hauszentrale mit oder ohne Beimischung. Auch der Anschluss der Warmwassererwärmung bietet verschiedene Möglichkeiten wie insbesondere Speicher, Durchlaufprinzip und Speicher-Lade-Prinzip mit oder ohne Vorrangschaltung.

5.1.5 Hausstation

Die Hausstation besteht aus der Übergabestation und der Hauszentrale und sie kann für einen direkten oder den indirekten Anschluss konzipiert werden. Die Anschlussart wird in der Regel vom Wärmelieferanten vorgegeben. Früher wurde vielfach die Eigentumsgrenze- und Zuständigkeitsgrenze zwischen Wärmelieferant und Wärmeabnehmer in die Hausstation gelegt, meistens zwischen die Übergabestation und die Hauszentrale. In der Praxis handelte es sich um getrennte Baugruppen, die auch von dem jeweils Berechtigten beschafft, eingebaut, betrieben und instand gehalten wurden. Bei Grossanlagen ist dies nach wie vor der Fall.

Für kleinere und mittlere Anlagen werden heute fast ausschliesslich Kompaktstationen eingesetzt, bei denen Übergabestation und Hauszentrale zu einer baulichen Einheit zusammengefasst sind. Wegen der Bauweise und unterschiedlicher Betreibermodelle sind die Eigen-

tums- und Zuständigkeitsgrenzen innerhalb einer Hausstation fließend. Nach wie vor sind jedoch technisch die gleichen Funktionen wie bei getrennten Einheiten wiederzufinden.

Wenn immer möglich ist eine direkte oder indirekte Datenverbindung zur Wärmezentrale (Busanbindungen wie z.B. Modbus, etc.) in die Hausstation zu integrieren. Dies vereinfacht im wesentlichen die Fakturierung, Störungserfassung und Anlagenoptimierung.

5.1.6 Kompaktstation

Frühere Übergabestationen wurden aus Einzelteilen hergestellt, geschweisst und mit geschraubten und geflanschten Armaturen versehen und hatten einen erheblichen Platzbedarf. Bei einer Kompaktstation werden alle Teile der Fernwärme-Übergabestation und der Hauszentrale inklusive Elektroinstallation zusammengefasst und auf einem Rahmen montiert betriebsfertig geliefert und installiert. Vor Ort müssen sie nur noch mit den Versorgungsleitungen der Fernwärme und der Hausanlage verbunden werden. Da die Spannungszuleitung über einen CEE-Stecker erfolgt, ist lediglich noch der Anschluss eines Aussentemperaturfühlers erforderlich. Diese Bauweise hat sich für Stationen bis ca. 400 kW bewährt. Für kleinere Stationen gibt es ansprechende Formen, die leicht in Funktionsräume einzuordnen sind und dank guter Gestaltung kaum stören.

5.1.7 Hausanlage

Eine zufriedenstellende Wärmeversorgung setzt eine Abstimmung von Wärmelieferung und -anwendung voraus. Aus diesem Grund sind für den Wärmelieferanten Kenntnisse über die Hausanlagentechnik der Wärmeabnehmer notwendig. Die Hausanlage hat als letztes Glied der Kette und Schnittstelle zum Nutzer die Aufgabe, die Wärme in der gewünschten Form zur Verfügung zu stellen. Die Hausanlage ist üblicherweise Eigentum des Gebäudeeigners, der für deren Einrichtung, Betrieb und Instandhaltung verantwortlich ist.

5.2 Anschlussvarianten

Über die Netzfahrweisen, Netzarten und Betriebsparameter hinaus bestimmt die Anschlussart die Ausführung der Hausstation. Die Anforderungen an die Ausführung des Fernwärmenetzanschlusses stellt der Wärmelieferant in den zum Wärmeliefervertrag erhobenen technischen Anschlussvorschriften (TAV). Es wird grundsätzlich zwischen dem direkten und dem indirekten Hausanschluss unterschieden.

Die Steuerung bzw. Regelung der Fernleitungsanschlüsse durch Einzelregler ist für kleinere Anlagen die einfachste Lösung. Bei mittleren und grösseren Anlagen sollte eine Lösung über ein Leitsystem in Betracht gezogen werden. Mit dieser zentralen Überwachungsmöglichkeit können sowohl Fehler in der Parametrierung der einzelnen Regler als auch Optimierungsmöglichkeiten erfasst werden. Durch die Erfassung der einzelnen Wärmezähler erübrigt sich auch das Ablesen der Zählerstände vor Ort.

5.2.1 Direkter Anschluss

Beim direkten Anschluss wird die Hausanlage vom Heizwasser aus dem Fernwärmenetz durchströmt (Bild 5.2). Dies hat für den Aufbau und Betrieb der Hauszentrale und Hausanlage folgende Konsequenzen:

- Die Wasserqualität wird durch den Wärmelieferanten eingestellt und überwacht, was dort einfach und effektiv möglich ist. Die Wasserqualität muss allerdings bei der Materialwahl für die Hauszentrale und Hausanlage berücksichtigt werden, um Korrosion zu vermeiden.
- Der Aufbau einer Druckhaltung erübrigt sich, da der erforderliche Anlagendruck durch den Wärmelieferanten gewährleistet wird. Liegt der maximale Netzvorlaufdruck unter dem für die Hausanlage zulässigen, so kann auch auf eine Druckabsicherung verzichtet werden. Andernfalls ist eine Druckreduzierung mit Absicherung vorzusehen.

- Durch eine Rücklaufbeimischung wird mit geringem Aufwand eine exakte Anpassung der Betriebsweise an die Anforderungen der Hausanlage ermöglicht.
- Der Aufwand wird minimiert, wenn die maximale Netzvorlauftemperatur unter der zulässigen Vorlauftemperatur der Hausanlage liegt. Dann kann auf eine Rücklaufbeimischung und gegebenenfalls auch auf eine Temperaturabsicherung verzichtet werden.

Ein direkter Anschluss ist grundsätzlich nur möglich, wenn der Ruhedruck und der Rücklaufdruck des Fernwärmenetzes kleiner als der zulässige Druck der Hausanlage sind.

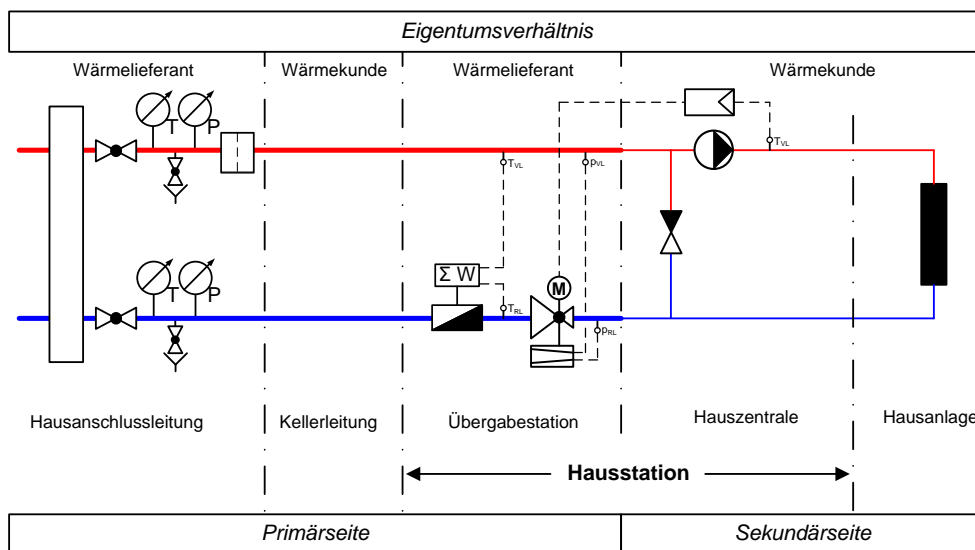


Bild 5.2 Hausanschluss mit direkter Wärmeübergabe.

5.2.2 Indirekter Anschluss

Beim indirekten Anschluss durchströmt das Heizwasser aus dem Fernwärmenetz nicht die Hausanlage, sondern ist vom Heizmittel durch einen Wärmeübertrager in der Hausanlage hydraulisch getrennt (Bild 5.3). Diese ist erforderlich, wenn die Parameter im Fernwärmenetz (Druck, Temperatur, Wasserqualität) nicht für die Hausanlage geeignet sind und es hat folgende Konsequenzen:

- Beim indirekten Anschluss liegen zwei Heizkreise vor. Der vom Fernwärmewasser durchströmte Teil wird als Primärkreis (Primärseite) bezeichnet, der vom Heizmittel der Hausanlage durchströmte als Sekundärkreis (Sekundärseite).
- Das Druckniveau und die Druckstufe der Anlagenkomponenten der Hausanlage können praktisch frei bestimmt werden. Dadurch ist es möglich, die Hausanlage in geringerer Druckstufe und damit unter

Umständen auch preiswerter auszuführen, was in vielen Fällen die etwas aufwändigere Hausstation rechtfertigt.

- Die Druck- und die Temperaturabsicherung richtet sich nach der Hausanlage. Daher können auch Altanlagen, bei denen Druckstufe oder Alterungszustand zweifelhaft erscheinen, ohne grösseres Risiko angeschlossen werden.
- Die Umwälzung des Fernwärmewassers und der Ausgleich der temperaturbedingten Volumenänderung müssen in der Wärmezentrale erfolgen.
- Die Wahl der Werkstoffe und Verbindungselemente auf der Sekundärseite ist unabhängig von der Wasserqualität im Fernwärmenetz.
- Bei der Auslegung der primärseitigen Anlagenteile müssen die maximal möglichen Drücke und Temperaturen des Fernwärmenetzes berücksichtigt werden.

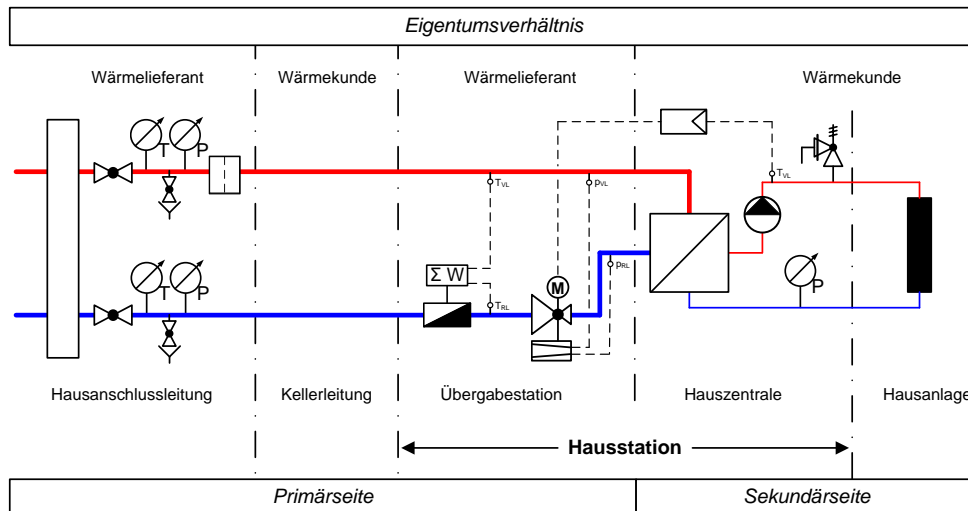


Bild 5.3 Hausanschluss mit indirekter Wärmeübergabe. Für kleine Leistungen wird die Hausstation oft als modulare Einheit ausgeführt, was als Kompaktstation bezeichnet wird.

5.3 Wärmeliefervertrag

Mit einem Wärmeliefervertrag wird eine langfristige Partnerschaft zwischen dem Wärmelieferanten und dem Wärmeabnehmer eingegangen. Es handelt sich dabei mehrheitlich um juristische und technische Fragestellungen und es kann für beide Vertragsparteien erhebliche wirtschaftliche Konsequenzen haben. Daher wird bei der Gestaltung der Beizug entsprechender Fachpersonen oder die Verwendung von Musterverträgen empfohlen. Es gibt bei der Ausarbeitung viele Möglichkeiten und dementsprechend auch eine grosse Vielfalt von bestehenden Wärmelieferverträgen. Folgende Punkte müssen zwischen den Vertragspartnern zur Ausarbeitung geklärt werden:

- Struktur des Wärmepreises und Abschätzung der späteren Konkretisierung der Zahlenwerte.
- Inhalt der technischen Anschlussbedingungen und Anschlussleistung des Wärmeabnehmers.
- Umfang und Art der Wärmelieferung, Nutzung und Eigentumsgrenzen
- Redundanz / Versorgungssicherheit und Vorgehen bei Ausfall der Hauptwärmequelle
- Geplante Vertragslaufzeit, Kündigungsbedingungen, Vorgehen bei Handänderungen
- Rechtlicher Rahmen der Energieerzeugung und der Trassenführung
- Fördermöglichkeiten

Als Vorlage zur Vertragsgestaltung liegen verschiedene Musterverträge zur Wärmelieferung vor, darunter etwa von Holzenergie Schweiz [55] und CARMEN [52], die bei der Beschreibung der folgenden Ausführungen als Basis dienen. Im Wärmeliefervertrag sind die folgenden Punkte zu definieren und zu vereinbaren:

- Parteien
- Vertragsbestandteile und Rangordnung

- Zweck
- Vertragsdauer
- Anschluss an das Wärmeversorgungsnetz
 - Bau, Betrieb, Unterhalt
 - Schnittstellen, Eigentum
 - Anschlussleistung
- Preise (in der Regel exkl. MWSt.)
- Ablesungen, Akontozahlungen, Fälligkeit
- Störungsdienst
- Schlussbestimmungen

Der Wärmeliefervertrag sollte mindestens mit folgenden Dokumenten ergänzt werden, falls diese nicht schon im Vertrag enthalten sind:

- Allgemeine Geschäftsbedingungen zum Wärmeliefervertrag (AGB)
- Technische Anschlussvorschriften (TAV)
- Tarifblatt

5.3.1 Allgemeine Geschäftsbedingungen (AGB)

Die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) dienen meist als Grundlage für eine Vielzahl von Verträgen und definieren die folgenden Punkte:

- Begriffe
- Bau, Betrieb, Unterhalt und Eigentum
- Wärmelieferungs- und Wärmebezugsspflicht
- Beschränkung und Vermeidung von Lieferunterbrüchen – Haftung des Wärmelieferanten
- Schadenminderungspflicht
- Regelung Wärmabgabe an Dritte
- Durchleitungs-, Zugangs- und Benützungsrechte
- Veränderung der Anschlussleistung

- Einstellung der Wärmelieferung – Haftung des Wärmebezügers
- Eigentümerwechsel
- Verfahren bei Messfehlern
- Vorzeitige Beendigung des Vertrages
- Vertragsänderungen

5.3.2 Technische Anschlussvorschriften (TAV)

Die Technischen Anschlussvorschriften (TAV) sind Bestandteil des Wärmeliefervertrages und dienen dem Wärmelieferanten und dem Wärmeabnehmer als Vorgabe zur Sicherstellung der technischen Aspekte bei Planung, Umsetzung und Betrieb der Wärmeversorgung. In der TAV werden die folgenden Punkte geregelt:

- Geltungsbereich, Begriffe und Wärmeträgermedium
- Plombierung
- Drücke und Temperaturen
- Wärmeübertrager
- Brauchwarmwassererwärmung
- Wärmeübergabestation und Heizraum
- Hydraulische Einbindung und Regelung
- Werkstoffe / Verbindungen
- Temperatur- und Volumenstrombegrenzung
- Montage, Kontrolle und Inbetriebnahme
- Unterhalt

Weitere Hinweise zu den TAV gibt das AGFW-Merkblatt FW 515 – Technische Anschlussbedingungen – Heizwasser [105].

Als Beilagen zur TAV sind folgende Schemas zu empfehlen:

- Fernwärme Vor- und Rücklauftemperaturen (primärseitig) in Funktion der Aussentemperatur
- Hydraulikschema Hausstation
- Hydraulikschema Brauchwarmwassererwärmung

5.3.3 Tarifblatt

Das Tarifblatt ist Bestandteil des Wärmeliefervertrages und nimmt Bezug auf die im Wärmeliefervertrag gemachten Kostenanteile. Der Wärmeliefervertrag enthält meist mehrere Faktoren zum Preis für die Wärme, womit die verschiedenen Kostenfaktoren abgedeckt werden. Sinnvoll ist eine Aufteilung in verbrauchsabhängige und verbrauchsunabhängige Kosten. Die Investition sowie die Kosten für die Instandhaltung und Wartung sind weitgehend unabhängig vom Verbrauch.

Verbrauchsgebundene Kosten sind dagegen zur Deckung des Brennstoff- und Stromverbrauchs zu erheben. Der Preis für Fernwärme setzt sich oft aus drei Komponenten zusammen:

- **Anschlussgebühr** einmalig in CHF für den Bau- und Hausanschlusskostenzuschuss vom Wärmeabnehmer. Die Zahlung erfolgt meist nach Fertigstellung des Hausanschlusses.
- **Grundpreis** in CHF pro kW Anschlussleistung und Jahr zur Abdeckung der Fixkosten.
- **Arbeitspreis** in CHF pro kWh gelieferte Wärme.

Im Tarifblatt sind meist folgende Punkte geregelt:

- Vorbemerkung
- Tarifsysteem
- Preise / Preisanpassungsklauseln
 - Anschlussgebühr
 - Grundpreis
 - Arbeitspreis
- Besondere Anschlussverhältnisse.

Die Anpassung der Kostenkomponenten wird in Wärmelieferverträgen oft durch Indizes geregelt, welche die Preisentwicklung zum Beispiel der Energiepreise (zum Beispiel für Energieholz oder auch für Heizöl als Vergleichsbasis) abbilden und für die Wärmegestehungskosten relevant sind. Empfehlungen und Beispiele für Preisanpassungsklauseln sind vielfältig. Hilfreiche Hinweise zu dieser Thematik hat C.A.R.M.E.N.e.V. im Merkblatt Preisanpassungsklauseln und Preisindizes [53] und die Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW in ihrem Leitfaden zur Kalkulation und Änderung von Fernwärmepreisen [54] herausgegeben.

Je nach Art der Wärmeerzeugung können die Wärmegestehungskosten durch das Temperaturniveau der Wärme erheblich beeinflusst werden. So steigt etwa der Energieverbrauch von Wärmepumpen, WKK-Anlagen und Holzheizwerken mit Abgaskondensation durch höhere Vorlauftemperaturen und noch verstärkt durch höhere Rücklauftemperaturen erheblich an. Aus diesem Grund ist denkbar, dass in Zukunft auch für das Temperaturniveau verstärkt vertragliche Bedingungen eingeführt werden oder für die Vergütung berücksichtigt werden.

Ein möglicher Ansatz ist, dass nicht die verbrauchte Energie, sondern das verbrauchte Volumen in einer Rechnungsperiode berücksichtigt wird. Somit wird ein Anreiz geschaffen, damit Wärmekunden eine effiziente Hausanlage planen und installieren bzw. im Sanierungsfall entsprechend umbauen (tiefe Rücklauftemperaturen ergeben ein entsprechend geringes Volumen).

Planung und Berechnung

6 Projektablauf

6.1 Übersicht

Das Gesamtsystem eines Fernwärmenetzes umfasst die Wärmeerzeugung, die Wärmeverteilung und die Wärmeabgabe an die Kunden. Die nachfolgende Beschreibung des Projektablaufs umfasst die Planungsaufgaben für das **Fernwärmenetz**, also die Wärmeverteilung ab Wärmeerzeugung bis und mit Wärmeabgabe bei den Kunden. Bild 6.1 zeigt eine Übersicht über den Projektablauf. Dabei wird grundsätzlich unterschieden zwischen der **Planungsphase** und der **Betriebsphase**.

Die **Planungsphase** ist in vier Phasen unterteilt:

Phase 1: Vorstudie

Phase 2: Entwurfsplanung

Phase 3: Planung, Ausschreibung und Vergabe

Phase 4: Ausführung und Abnahme

Die Planung ist in vier **Checklisten** beschrieben:

Tabelle 6.10: Checkliste Phase 1

Tabelle 6.11: Checkliste Phase 2

Tabelle 6.12: Checkliste Phase 3

Tabelle 6.13: Checkliste Phase 4

Nach der Planungsphase bzw. nach der Abnahme übernimmt der Bauherr des Fernwärmenetzes formell den operativen Betrieb der Anlage und wird in Ausnahmefällen und zur Betriebsoptimierung durch den Planer unterstützt.

Die **Betriebsphase** umfasst folgende zwei Phasen:

Phase 5: Betriebsoptimierung

Phase 6: Betrieb und Bewirtschaftung

Die Betriebsphase ist in zwei **Checklisten** beschrieben:

Tabelle 6.14: Checkliste Phase 5

Tabelle 6.15: Checkliste Phase 6

6.2 Qualitätssicherung

Bei Planung, Ausführung und Betrieb von Fernwärmenetzen ist sicherzustellen, dass die vereinbarte Qualität bei Planung, Bau und Montage eingehalten wird. Dazu ist die Qualität zu definieren und die Ausführung durch Vergleich mit den Anforderungen zu überwachen. Die

Qualitätssicherung ist dabei nicht auf einzelne Phasen beschränkt, sondern ist ein Prozess über alle Projektphasen hinweg.

Im AGFW-Arbeitsblatt FW 401 [100] Teil 17 sind die notwendigen Massnahmen zur Qualitätssicherung bei der Ausführung eines Fernwärmenetzes mit KMR festgehalten. Die darin vorgestellten Strategien können auch auf andere Rohrsysteme übertragen werden [6].

Das Arbeitsblatt ist eng mit der SN EN ISO 9001 [95] verknüpft, welches von einer ganzheitlichen Betrachtung im Hinblick auf die Einbeziehung der Kundenforderung und Kundenzufriedenheit ausgeht. Daher sollte das AGFW-Arbeitsblatt FW 401 Teil 17 als Handlungsempfehlung zur Ausgestaltung der SN EN ISO 9001 verstanden werden.

Die Ausführung nach SN EN ISO 9001 und die Verwendung der Checklisten wird je nach Situation grundsätzlich verlangt (z.B. öffentliche Hand), ansonsten wird deren Anwendung dringend empfohlen.

Im Arbeitsblatt FW 401 Teil 17 hat der AGFW Checklisten erarbeitet, die einen Überblick geben, an welchen Stellen des Bauvorhabens welche Qualitätssicherungsmassnahmen durchzuführen sind. Angesprochen werden dabei Auftraggeber (AG) bzw. dessen Beauftragte als Veranlasser einer Baumassnahme und Auftragnehmer (AN) wie z.B. Tiefbauunternehmer oder Leitungsbauer.

Tabelle 6.1 Auszug aus den Checklisten für den Auftraggeber AG und dem Auftragnehmer AN nach [100] in Teilgebiete der Ausführung gegliedert.

Teilgebiet	Überprüfungstätigkeiten
Projektvorbereitung	Planung und Auswahl des geeigneten Verlegekonzeptes, Vollständigkeit der Ausführungsunterlagen, Anfrage und Vergabe, Kontrolle der Ausführung, etc.
Tiefbau	Verkehrssicherung durch AN, Rohrgraben erstellen, Übergabe an Rohrleitungshersteller, Oberflächenwiederherstellung, etc.
Rohrleitungsbau	Prüfung der Rohrleitungen und sonst. Materialien, Rohrverlegung und Montage, Nachweis der Fertigungsqualität der Schweissnähte, Nachweis der Dichtheit,
Muffenmontage	Überprüfen der Qualifikation des Fachpersonals, Muffen und Dehnpolstermontage, Abnahme des Rohrleitungsbaus und Muffenmontage,
Projektabschluss	Gemeinsame Abnahme der ausgeführten Arbeiten (AG und AN), Vollständigkeit der Dokumentation, Übergabe an den Betrieb

Tabelle 6.2 Planungsabläufe und die gültigen Regelwerke in der Schweiz, in Deutschland, in Österreich und ein für das Planungshandbuch Fernwärme optimierter Projektablauf. Die Regelwerke verwenden unterschiedliche Begriffe und auch die einzelnen Planungsabläufe weisen Unterschiede auf.

Schweiz	Deutschland	Österreich	Planungshandbuch Fernwärme
SIA-Ordnung 108 [80] Ausgabe 2014 Phasen und Teilphasen	HOAI [62] 4. Überarbeitete Auflage 2013 Leistungsphasen	Allg. Geschäftsbedingungen der Technischen Büros – Ingenieurbüros Österreichs [63]	Projektphasen
1 Strategische Planung 11 Bedürfnisformulierung, Lösungsstrategien	1. Grundlagenermittlung		(Leitfaden VFS)
2 Vorstudien 21 Projektdefinition, Machbarkeitsstudie 22 Auswahlverfahren	2. Vorplanung (Projekt- und Planungsvorbereitung)	1. Vorplanung (Projekt- und Planungsvorbereitung)	1. Vorstudie
3 Projektierung 31 Vorprojekt	3. Entwurfsplanung (System- Integrationsplanung)	2. Entwurfsplanung (System- Integrationsplanung)	2. Entwurfsplanung
32 Bauprojekt 33 Bewilligungsverfahren, Auflageprojekt 4 Ausschreibung 41 Ausschreibung, Offertvergleich, Vergabeantrag (erstellen der Ausschreibungsunterlagen)	4. Genehmigungsplanung 5. Ausführungsplanung 6. Vorbereitung der Vergabe 7. Mitwirken bei der Vergabe	3. Bewilligungsplanung (Einreichplanung) 4. Ausführungsplanung 5. Vorbereitung der Vergabe 6. Mitwirken bei der Vergabe	3. Planung, Ausschreibung und Vergabe
5 Realisierung 51 Ausführungsprojekt 52 Ausführung 53 Inbetriebnahme, Abschluss	8. Objektüberwachung (Bauüberwachung)	7. Fachbauaufsicht (Bauüberwachung), Abnahme, Rechnungsprüfung 8. Abnahme	4. Ausführung und Abnahme
6 Bewirtschaftung 61 Betrieb, Betriebsoptimierung 62 Erhaltung	9. Objektbetreuung und Dokumentation	9. Rechnungsprüfung	5. Betriebsoptimierung
			6. Betrieb und Bewirtschaftung

6.3 Unterschiede zwischen SIA 108 und Planungshandbuch Fernwärme

Tabelle 6.2 zeigt die Begriffe der Planungsabläufe für verschiedene Regelwerke in der Schweiz, in Deutschland und in Österreich und die Begriffsverwendung im vorliegenden Planungshandbuch Fernwärme (PLH FW).

Die wesentlichen Unterschiede zwischen der SIA 108 und dem Planungsablauf im vorliegenden PLH FW sind folgende:

- Die Strategische Planung (SIA 108 Phase 1) wird durch den Leitfaden vom Verband Fernwärme Schweiz VFS (Leitfaden VFS) abgedeckt. Das PLH FW steigt im wesentlichen bei der Phase 2 nach SIA 108 ein (Phase 2 Vorstudie).
- Im PLH FW wird die Bauprojekt- und Ausschreibungsphase nach SIA 108 (Phase 3 und 4) in einer Phase zusammengefasst (Phase 3 Planung, Ausschreibung und Vergabe).
- Die Phase Bewirtschaftung (SIA 108 Phase 6) wird im PLH FW in zwei Phasen aufgeteilt. Einmal die Phase 5 Bewirtschaftung und einmal die Phase 6 Betrieb und Bewirtschaftung.

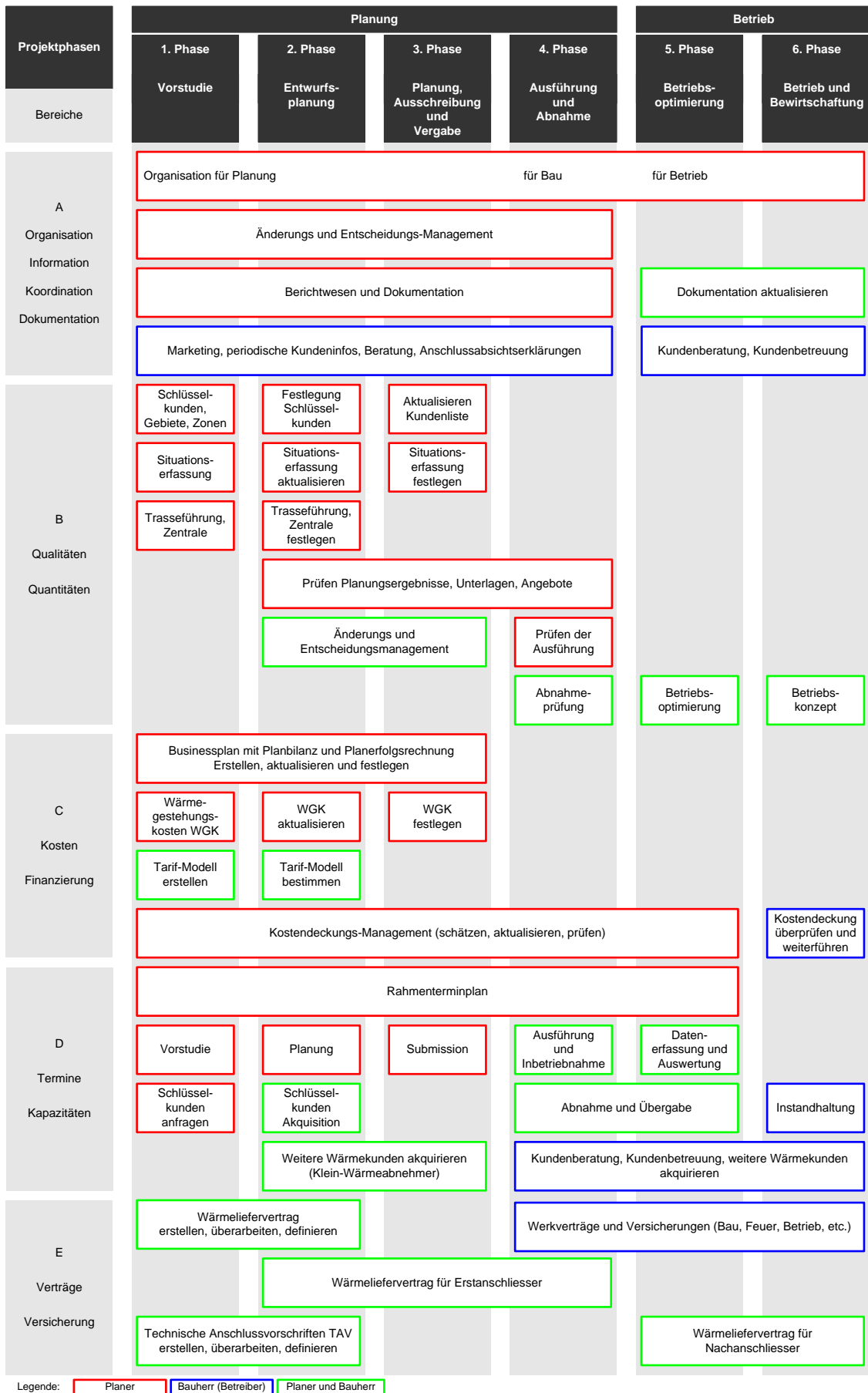


Bild 6.1 Übersicht Projektablauf.

6.4 Phase 1: Vorstudie

Das Ziel der **Vorstudie** sind verbindliche Aussagen zu Machbarkeit, Risiken und Nutzen. Klar vereinbarte **Ziele** und eine **Situationserfassung** bilden die Grundlagen dazu.

Ziel der Situationserfassung ist, die Auslegungs- und Entscheidungsbasis für ein technisch und wirtschaftlich optimales Fernwärmenetz zu schaffen. Insbesondere gilt es in einem iterativen Prozess die optimale Netzstruktur für eventuelle einzelne Ausbautappen und schlussendlich für den Endausbau zu finden. Auf Basis dieser Situationsanalyse können die Wärmeverteilung und die Wärmeübergabe optimal ausgelegt werden. Je nach Projektfortschritt sind folgende Punkte zu erfassen:

1. Wärmeversorgungsgebiet
2. Für jeden Wärmeabnehmer aufgeteilt in Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme:
 - a) Wärmebedarf
 - b) Wärmeleistungsbedarf
 - c) erforderliches Temperaturniveau
3. Jahres-Wärmebedarf Gesamtanlage
4. Lastkennlinie Gesamtanlage
5. Jahresdauerlinie Wärmeleistungsbedarf Gesamtanlage
6. Struktur des Wärmenetzes
7. Festlegung Rohrsystem
8. Wärmegestehungskosten.

Weitere wichtige Arbeiten, die in der Regel parallel ablaufen und mit der technischen Abklärung nicht direkt in Zusammenhang stehen, sind:

- Marketing und Kundenbetreuung
- Wärmeabnehmerakquisition und Anschlussabsichtserklärungen einholen
- Vertragswesen
- Kostenmanagement (Businessplan und Planerfolgsrechnung).

Die aufgeführten Punkte und Arbeiten sind nicht immer fest einer Phase zugeteilt. Teilweise sind die Arbeiten Phasen übergreifend weiterzuführen, zu aktualisieren und zu konkretisieren. Je nach Projekt muss der Ablauf eventuell angepasst werden.

In den nächsten Kapiteln wird auf die einzelnen Aufgaben eingegangen.

6.4.1 Potenzielles Wärmeversorgungsgebiet

Ein potenzielles Wärmeversorgungsgebiet ist beispielsweise eine Ortschaft, Ortschaftsteile, Quartiere, mehrere Grossabnehmer oder ein einzelner Grossabnehmer mit umliegenden Quartieren. Die Einteilung des potenziellen Wärmeversorgungsgebietes in Gebiete und Zonen erfolgt aufgrund der erwarteten Wärmebezugsdichte von Gebäudetypen (EFH-Siedlung, Industrie, MFH-Gebiete usw.) oder aufgrund von geografischen

Gegebenheiten wie Strassen, Bahntrassen oder Gewässern. Die Zonen können vereinfacht wie Grossabnehmer behandelt werden. Als Hilfsmittel zur Einteilung einer Ortschaft dient auch der Ortsplan oder wenn vorhanden ein Energiekataster.

Wichtig ist, die **Schlüsselkunden** in einem Gebiet zu identifizieren und diese für den Anschluss an das Fernwärmenetz zu gewinnen. Schlüsselkunden zeichnen sich durch einen relativ hohen Leistungs- und Energiebedarf (z.B. > 50 kW bei 2000 h/a) aus. Beispiele:

- Industrie mit Prozesswärme
- MFH-Gebiete
- Dorf- oder Stadtkerne
- Zonen mit verdichteter Bauweise.

Nur mit Schlüsselkunden kann eine Zone oder ein Gebiet optimal und wirtschaftlich an ein Fernwärmenetz angeschlossen werden, weshalb folgendes Vorgehen empfohlen wird:

1. Schlüsselkunden in einem potenziellen Gebiet definieren
2. Schlüsselkunden vertraglich binden (Absichtserklärung bietet Planungssicherheit)
3. Potenzielle Trassenführung (Netzstruktur) definieren
4. Potenzielle weitere Kunden entlang des Trasses akquirieren.

Die **Wärmebezugsdichte** ist ein Mass für die Eignung einer Zone für den Anschluss an ein Fernwärmenetz (siehe

Tabelle 6.3). Sie setzt den jährlichen Wärmebezug aller Gebäude ins Verhältnis zur Grundstücksfläche der Zone:

$$\text{Wärmebezugsdichte} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a} \cdot \text{m}^2} \right] = \frac{\text{Wärmebezug Wärmekunden} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right]}{\text{Zonenfläche} \left[\text{m}^2 \right]}$$

Für die Wärmebezugsdichte gelten folgende Aussagen:

- EFH-Gebiete sind in der Regel nicht interessant (Wärmebezugsdichte 15 – 30 kWh/a m²).
- Interessante Gebiete sind MFH-Gebiete, Dorf- oder Stadtkerne oder Zonen mit verdichteter Bauweise (städtische Gebiete).
- Die Wirtschaftlichkeit eines Fernwärmenetzes kann verbessert werden, wenn die in den Zonen oder nahegelegene Grossabnehmer (Schlüsselkunden) eingebunden werden können.
- Ein Fernwärmenetz für nur einen Grossabnehmer ist nur dann interessant, wenn die umliegenden Gebiete eine hohe Wärmebezugsdichte aufweisen.
- Grossabnehmer sollen über ein Fernwärmenetz verbunden werden, wenn sie örtlich nahe beisammen sind.

Tabelle 6.3 Empfohlene Wärmebezugsdichte einer Zone als Eignungskriterium [21].

Eignung für Wärmeverbund	Wärmebezugsdichte kWh/(a m ²)
Nicht geeignet	< 50
Bedingt geeignet	50 – 70
Geeignet	> 70

Je nach Situation können auch mit geringen Investitions- und Brennstoffkosten Gebiete mit einer tieferen Wärmebezugsdichte als 70 kWh/(a m²), wie in

Tabelle 6.3 mit geeignet ausgewiesen und wirtschaftlich mit Fernwärme versorgt werden. Dies sollte aber durch eine Planbilanz und Planerfolgsrechnung (Vollkostenrechnung) nachgewiesen werden.

6.4.2 Umfrage Schlüsselkunden

Die Umfrage bei Schlüsselkunden soll das Anschlussinteresse klären und Planungsdaten zur Verfügung stellen. Oft liegen bei bestehenden Gebäuden oder besonderen Bauten keine geeigneten Daten vor oder ihre Erhebung ist aufwändig. In der Vorstudie sollte der Aufwand dafür klein gehalten werden und eventuell mit mündlichen Anfragen und Abschätzungen gearbeitet werden.

Für eine grobe **Abschätzung der Wärmebezugsdichte** in einem Wärmeversorgungsgebiet kann der Jahreswärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser der einzelnen Gebäude auch abgeschätzt werden. Dazu dienen folgende Methoden:

- a) Abschätzung des Jahreswärmebedarfs via Energiebezugsfläche EBF und Gebäudequalität. Dazu werden der spezifische Heizwärmebedarf und der spezifische Wärmebedarf für Warmwasser addiert (siehe Tabelle 6.4) und mit der Energiebezugsfläche multipliziert:

$$Q_G = EBF (q_H + q_{WW})$$

- Q_G Jahreswärmebedarf Gebäude in kWh/a
- EBF Energiebezugsfläche in m²
- q_H spezifischer Heizwärmebedarf in kWh/(a m²)
- q_{WW} spezifischer Wärmebedarf Warmwasser in kWh/(a m²)

- b) Abschätzung des Jahreswärmebedarfs via Gebäudevolumen und Gebäudequalität. Dazu wird der spezifische Wärmeleistungsbedarf eines Gebäudes gemäss Tabelle 6.5 mit dem beheizten Grundriss, der Geschosshöhe (visuelle Kontrolle vor Ort) und der Vollbetriebsstunden gemäss Tabelle 6.6 multipliziert. Die Vollbetriebsstundenzahl von Schulanlagen, Industrie, Gewerbe und Büro mit Wochenendabsenkung und Ferienabsenkung ist um ca. 15 % zu vermindern.

Auf Basis von Fragebögen und weiteren Abschätzungen zum Wärmebedarf werden die **Lastkennlinie** und

die **Jahresdauerlinie** für das potenzielle Wärmeversorgungsgebiet bestimmt. Als hilfreiches Tool kann die frei zugängliche Excel-Tabelle zur Situationserfassung von QM Holzheizwerke empfohlen werden.

Tabelle 6.4 Spezifischer Heizwärmebedarf und spezifischer Wärmebedarf Warmwasser für Gebäude unterschiedlicher Heizgrenzen und Regionen der Schweiz [23].

Ort	Heizgrenze	Spezifischer Heizwärmebedarf [kWh/(a m ²)]			WW [kWh/(a m ²)]
		15°C	13°C	11°C	
Mittelland (Zürich) 300...800 m.ü.M.		60–100	30–60	20–40	20
Bergregion (Davos) 800...1'800 m.ü.M.		75–120	35–75	25–45	20
Südschweiz (Locarno) 200...600 m.ü.M.		50–85	25–50	20–35	20

Tabelle 6.5 Spezifischer Wärmeleistungsbedarf verschiedener Gebäudetypen (basierend auf Tagesmittelwert ohne Berücksichtigung von Aufheizspitzen) [21].

Gebäudetyp	Spezifischer Wärmeleistungsbedarf W/m ³
Herkömmlich wärmegeämmte Wohnhäuser	20 – 27
Gut wärmegeämmte bestehende Wohnhäuser	15 – 20
Neubauten gemäss heutigen Vorschriften	8 – 15
Herkömmliche Dienstleistungsgebäude	23 – 30
Werkstatt-, Produktionsräume oder Lagerhallen	10 – 20

Tabelle 6.6 Vollbetriebsstunden für bestehende Gebäude (Raumwärme und Warmwasser). Langjährige Erfahrungswerte für Gebäude unterschiedlicher Heizgrenzen und Regionen der Schweiz [23].

Ort	Vollbetriebsstunden [h/a]			
	Heizgrenze	15°C	13°C	11°C
Mittelland (Zürich) 300...800 m.ü.M.		2'000 – 2'500	1'600 – 2'000	1'300 – 1'700
Bergregion (Davos) 800...1'800 m.ü.M.		2'300 – 2'800	1'900 – 2'300	1'600 – 2'000
Südschweiz (Locarno) 200...600 m.ü.M.		1'700 – 2'200	1'400 – 1'700	1'400 – 1'800

6.4.3 Aktualisieren Wärmeversorgungsgebiet

Um den wirtschaftlichen Betrieb des Wärmeverbundes nicht zu gefährden, werden in einem ersten Schritt ungeeignete Zonen mit einer Wärmebezugsdichte < 50 kWh/a m² ausgeschieden. Übrig bleibt das mögliche Wärmeversorgungsgebiet.

Für eine Erschliessung werden zusammenhängende Zonen mit hoher Wärmebezugsdichte ausgewählt. Darin werden Standort der Wärmeerzeugung und Lage des Wärmenetzes so festgelegt, dass das Leitungsnetz möglichst kurz bleibt. Wenn die Erschliessung einzelner Wärmeabnehmer aufgrund der Lage des Wärmenetzes (Trasse) ungünstig liegen, obwohl ein Anschlussinteresse vorliegt, müssen diese unter Umständen ausgeschieden oder erst für eine spätere Erweiterungsphase berücksichtigt werden. Vom ursprünglichen, potenziellen Wärmeversorgungsgebiet bleibt das für die Erschliessung geeignete Wärmeversorgungsgebiet übrig.

Mit der Annahme eines **Erschliessungsgrades** von 50 % bis 80 % des geeigneten Wärmeversorgungsgebietes wird der Jahreswärmebedarf abgeschätzt.

Für den Wärmeleistungsbedarf muss zusätzlich ein **Gleichzeitigkeitsfaktor** berücksichtigt werden. Dieser beschreibt im Verbund einer Vielzahl von Wärmeabnehmern den Effekt, dass praktisch zu keinem Zeitpunkt alle Verbraucher gleichzeitig die maximale Leistung beziehen. Dieser als Gleichzeitigkeit bezeichnete Effekt ist eine Basisgrösse für die Dimensionierung des Wärmeverteilnetzes und die Auslegung der Wärmeerzeuger. Der Gleichzeitigkeitsfaktor beschreibt das Verhältnis zwischen dem maximalen gleichzeitig anfallenden Wärmebedarf aller Wärmeabnehmer und der gesamten abonnierten Anschlussleistung [40]:

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i(t_{\max})}{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{N,i}(t)}$$

$\dot{Q}_i(t_{\max})$ Abnahmeleistung des Wärmeabnehmers i zum Zeitpunkt der maximalen Leistungsanforderung in kW

$\dot{Q}_{N,i}(t)$ Abonnierte Nennleistung des Wärmeabnehmers i in kW

n Anzahl Wärmeabnehmer

Für den Gleichzeitigkeitsfaktor gilt somit $g \leq 1$. In Bild 6.2 ist der Gleichzeitigkeitsfaktor als Näherungsfunktion in Abhängigkeit der Anzahl Wärmekunden basierend auf einer Erhebung aus dem Jahre 2001 dargestellt [40]. Demnach ist bei 10 bis 20 Wärmeabnehmer mit einer Gleichzeitigkeit von etwa 95 % im Streubereich von 85 % bis 100 % zu rechnen. Bei Verbunden mit über 100 Wärmeabnehmer kann von einer Gleichzeitigkeit von ungefähr 60 % ausgegangen werden.

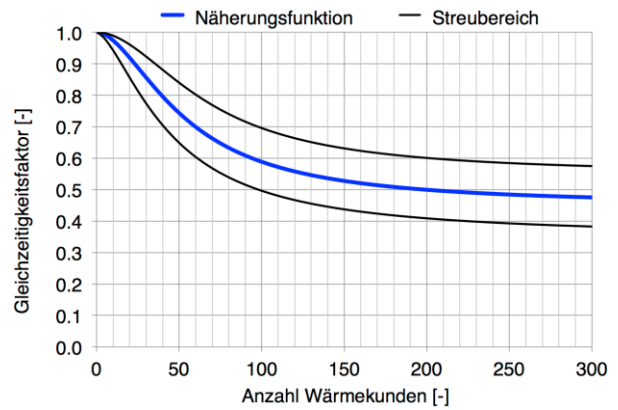


Bild 6.2 Näherungsfunktion und Streubereich für den Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors in Abhängigkeit der Anzahl Wärmeabnehmer [40].

Entscheidend für die Festlegung der Gleichzeitigkeit ist die **Abnehmerstruktur** der Wärmeabnehmer. So führen permanente Prozesswärmeabnehmer in einem Verbund zu einer höheren Gleichzeitigkeit als zum Beispiel eine Einfamilienhaussiedlung. Allfällige Begrenzungen des Leistungsbezuges in den Technischen Anschlussbedingungen (TAB) führen ebenfalls zu einem höheren Gleichzeitigkeitsfaktor, während temporäre oder saisonal betriebene Verbraucher die Gleichzeitigkeit reduzieren. Andererseits kann eine saisonale Spitzenlast zu erhöhten Gleichzeitigkeitsfaktoren führen, zum Beispiel während der Ferienzeit in Wintersportorten mit maximaler Belegung von Hotels und Ferienwohnungen. Die Abschätzung der Gleichzeitigkeit beruht daher auf viel Erfahrung und sollte nicht zu tief angesetzt werden.

Bei der Benutzung der in Kapitel 6.4.2 erwähnten Excel-Tabelle Situationserfassung von QM Holzheizwerke ist darauf zu achten, dass kein Gleichzeitigkeitsfaktor benutzt wird, da die Systemwahl und die Auslegung des Wärmeerzeugers darin auf einen Leistungsbedarf im Tagesmittel ausgelegt ist, womit der Leistungsbedarf ähnlich zum Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt wird.

Die Dimensionierung der einzelnen Leitungsabschnitte erfolgt auf Basis eines maximalen Druckabfalls für die Einzelstränge von 250 bis 300 Pa/m nach Kapitel 7.3.

6.4.4 Erste wirtschaftliche Betrachtung

Bei Fernwärmenetzen wird von einem wirtschaftlichen Betrieb ausgegangen, wenn der Erlös vom Wärmeverkauf die Wärmegestehungskosten aus Kapital- und Betriebskosten übersteigt. Ein wichtiger Indikator zur Abschätzung, ob ein Fernwärmenetz wirtschaftlich sein kann, ist die **Anschlussdichte**. Die Anschlussdichte ist das Verhältnis zwischen der jährlich abgesetzten Wärmemenge in MWh/a und der gesamten Trassenlänge von Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen in Metern:

$$\text{Anschlussdichte} \left[\frac{\text{MWh}}{\text{a m}} \right] = \frac{\text{Wärmebezug Wärmekunden} \left[\frac{\text{MWh}}{\text{a}} \right]}{\text{Trassenlänge} [\text{m}]}$$

Da die Anschlussdichte zur Charakterisierung des Fernwärmenetzes dient, sind Wärmebezüger direkt ab Wärmezentrale zum Beispiel für den Eigenbedarf am Standort der Wärmezentrale nicht einzubeziehen.

Für eine Grob beurteilung ohne genauere Kenntnis der Randbedingungen gelten Wärmeversorgungsgebiete mit einer Anschlussdichte < 2 MWh/(a m) im Endausbau in der Regel als nicht attraktiv.

Tabelle 6.7 Empfohlene Anschlussdichten der Wärmeverteilung zur Einhaltung des Zielwertes der spezifischen Investitionskosten [21].

Ausbaustatus	Anschlussdichte Wärmeverteilung	
	Günstige Bedingungen MWh/(a m)	Ungünstige Bedingungen MWh/(a m)
Erste Ausbaustufe	> 0.7	> 1.4
Endausbau	> 1.2	> 2.0

Weitere Rahmenbedingungen wie erzielbarer Erlös und Investitionshilfen können die Wirtschaftlichkeit ebenfalls beeinflussen. Im Falle günstiger Wärmequellen oder Baubedingungen können auch geringere Anschlussdichten einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen (Tabelle 6.7). Dies sollte aber durch eine Planbilanz und Planerfolgsrechnung (Vollkostenrechnung) nachgewiesen werden.

Der Anschluss von **Kleinverbraucher** in der Nähe oder entlang einer Trasse, ist normalerweise unkritisch in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit. Befindet sich jedoch ein Kleinverbraucher weit entfernt von der nächsten Haupt- oder Zweigleitung, so reduziert dies die Anschlussdichte, weshalb ein entsprechender Anschluss unattraktiv sein kann und spezifisch geprüft werden muss. Der Anschluss kann allenfalls an eine Beteiligung an den zusätzlich anfallenden Anschlusskosten oder einen erhöhten Wärmepreis gebunden werden.

Bezogen auf die **Investitionskosten** macht QM Holzheizwerke [21] Empfehlungen zur Anschlussdichte (Bild 6.3).

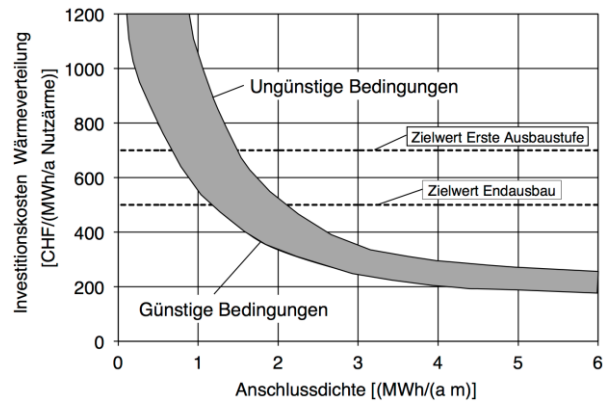


Bild 6.3 Spezifische Investitionskosten der Wärmeverteilung in Funktion der Anschlussdichte. Bandbreite typischer Werte nach [21] (umgerechnet in CHF). Inbegriffen sind die Kosten für die Fernleitungsgruppen in der Wärmezentrale, Fernleitungsnetz bis und mit Übergabestation (ohne Hauszentrale).

Als Empfehlung sind für die erste Ausbaustufe spezifische Investitionskosten der Wärmeverteilung von etwa 700 CHF/(MWh/a) anzustreben. Im Endausbau sollten es noch etwa 500 CHF/(MWh/a) sein. Diese Empfehlungen sollten in der Regel nicht um mehr als 25 % überschritten werden.

Im ländlichen Raum sind die Bedingungen bzw. die Kosten für das Verlegen von Fernwärmerohren in der Regel günstiger als im städtischen Raum. Daneben kann allerdings auch die Beschaffenheit des Untergrunds Mehrkosten verursachen (Tabelle 6.8).

Tabelle 6.8 Auswirkungen von Rahmenbedingungen auf die spezifischen Investitionskosten der Wärmeverteilung und die Wirtschaftlichkeit [21].

	Günstige Bedingungen	Ungünstige Bedingungen
Bauerschweris	gering	hoch
lokales Preisniveau	tief	hoch
Erschließungsfortschritt	rasch	langsam
Investitionshilfen	hoch	gering
Erzielbarer Erlös	hoch	gering

Die **Wärmeverteilverluste** sind ebenfalls eine wichtige Kenngrösse, welche die Wirtschaftlichkeit beeinflussen und sie sind von folgende Faktoren abhängig:

- Dimensionierung der Rohrleitungen
- Dämmstärke der Rohrleitungen
- Temperaturniveau von Vor- und Rücklauf
- Anschlussdichte
- Betriebsdauer (Ganzjahres- oder Saisonbetrieb).

Im Betrieb werden die Wärmeverteilverluste als Differenz zwischen der von der Wärmeerzeugung dem Wärmenetz zugeführten Wärmemenge und der von allen Wärmeabnehmern bezogenen Wärmemenge bestimmt (siehe Kapitel 7.1.4).

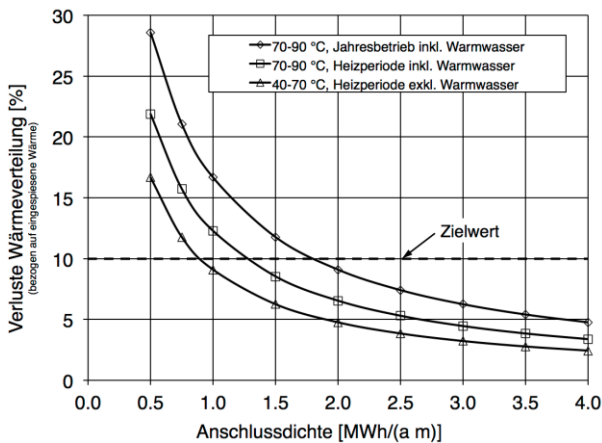


Bild 6.4 Wärmeverteilverluste in Funktion der Anschlussdichte für verschiedene Betriebsweisen und Vorlauftemperatur-Niveaus des Wärmenetzes nach [21].

Das Bild 6.4 zeigt die Wärmeverteilverluste in Funktion der Anschlussdichte für verschiedene Betriebsweisen und Vorlauftemperaturen. Die Verluste sollten einen Zielwert von 10 % des Nutzwärmebedarfs der Wärmeabnehmer nicht übersteigen. Dies entspricht in der Regel einem Wärmeverteilverlust von etwa 9 % bezogen auf die ins Netz eingespeiste Wärme. Um den Zielwert nach Bild 6.4 zu erreichen, müssen je nach Betriebsweise, Temperaturniveau und Investitionskosten die in Tabelle 6.9 aufgeführten Anschlussdichten eingehalten werden.

Tabelle 6.9 Empfohlene Anschlussdichte der Wärmeverteilung zur Einhaltung des Zielwertes der Wärmeverteilverluste von $\leq 10\%$ gemäss Bild 6.4 [21].

Vorlauftemperatur	Betriebsweise	Anschlussdichte
		MWh/(a m)
70-90°C	Jahresbetrieb inkl. Warmwasser	> 1.8
70-90°C	Heizperiode inkl. Warmwasser	> 1.3
70-90°C	Heizperiode exkl. Warmwasser	> 0.8

Betragen die jährlichen Wärmeverteilverluste im Endausbau (nach Klimabereinigung) mehr als 10 %, sollte in erster Priorität versucht werden die Anschlussdichte zu erhöhen. Dadurch werden nicht nur die Wärmeverluste des Netzes reduziert, sondern auch die Wirtschaftlichkeit insgesamt verbessert. Kann der Zielwert der Wärmeverteilverluste nicht erreicht werden, können mit dem Bauherrn evtl. höhere Wärmeverluste vereinbart werden. Dabei ist zu prüfen, wie sich die höheren Wärmeverluste langfristig auf die Wirtschaftlichkeit auswirken, vor allem im Hinblick auf mögliche Preissteigerungen der Brennstoffpreise.

Für eine erste wirtschaftliche Beurteilung der Wärmegestehungskosten ist das **Energieangebot** zu erfassen.

Aus den folgenden Quellen ist bezüglich Potenzial, Verfügbarkeit, Qualität, Energieinhalt und Preis das Angebot aufzustellen: Abwärme, Holz, Umgebungswärme, Erdgas, Heizöl.

Bei infrage kommenden Brennstofflieferanten sind Angebote über das jährlich verfügbare Potenzial, den Energieinhalt und den Brennstoffpreis einzuholen. Nach der Berechnung des Jahresbrennstoffbedarfs können anhand von Jahresnutzungsgraden der Wärmeerzeugung und Wärmeverteilverlusten die Brennstoffkosten abgeschätzt werden.

Auf Basis von mittleren **Wärmegestehungskosten** für Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Brennstoff können in der Vorstudie die einzelnen Varianten verglichen und beurteilt werden (siehe Kapitel 9.3).

Für eine genaue Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Fernwärmeunternehmens ist eine Analyse des Jahreswärmebedarfs und des Wärmeleistungsbedarfs erforderlich zusammen mit einer Beurteilung der finanziellen Situation. Aus dieser Situationsanalyse können mit Hilfe eines standardisierten Businessplans mit Planbilanz und Planerfolgsrechnung Wärmegestehungskosten und Jahreskosten für eine Betriebsdauer von zum Beispiel 20 Jahren ausgewiesen werden.

In der Regel beträgt die Kostengenauigkeit in der Phase 1 (Vorstudie) $\pm 25\%$.

Tabelle 6.10 Checkliste Phase 1 – Vorstudie

Check	Checkliste Phase 1 – Vorstudie	Bemerkungen
Potenzielles Wärmeversorgungsgebiet		
	Potenzielle Schlüsselkunden > 50 kW bestimmen (z.B. Industrie mit Prozesswärme, öffentliche Gebäude und Überbauungen in verdichteter Bauweise, etc.)	
	Einsatz von Kataster-Datenbanken wie z.B. webGIS, Energie-Richtplan der Kantone, etc.	
	Wärmeversorgungszone mit genügend hoher Wärmebezugsdichte erfassen ($\geq 70 \text{ kWh/m}^2$)	
	Lokales und regionales Energieangebot erfassen	
	Kantonales und Kommunales Energiekonzept berücksichtigen (z.B. kantonale Energerichtpläne, Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich MuKEn)	
Umfrage Schlüsselkunden (liegen folgende Angaben vor?)		
	Anschlussinteresse: Ja / Nein	
	möglicher Anschlusszeitpunkt	
	Jährlicher Wärmebedarf in kWh/a aufgeteilt in Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme	
	Anschlussleistung in kW	
	Energiebezugsfläche EBF in m^2	
	Erforderliches Temperaturniveau in $^{\circ}\text{C}$	
Aktualisieren Wärmeversorgungsgebiet		
	Festlegen der Schlüsselkunden und des Wärmeversorgungsgebietes	
	Potenzial von weiteren Kleinwärmeabnehmer (< 50 kW Anschlussleistung) abschätzen	
	Lastkennlinie und Jahresdauerlinie bestimmen (z.B. Excel-Tabelle Situationserfassung von QM Holzheizwerke)	siehe auch Kapitel 2.3
	Standort der Wärmezentrale evaluieren (evtl. mehrere Varianten)	
	Trassenführung der Haupt- und Zweigleitungen evaluieren (evtl. mehrere Varianten)	
	Dimensionierung der Fernwärmeleitungen (max. Druckabfall Teilstrang 250 bis 300 Pa/m)	gemäss Kapitel 7.3
Erste wirtschaftliche Betrachtung		
	Anschlussdichte bestimmen	
	Wärmeverteilverluste abschätzen	siehe auch Kapitel 7.1
	Investitions- und Betriebskosten abschätzen ($\pm 25\%$)	siehe auch Kapitel 9.2
	Wärmegestehungskosten auf Basis des Energieangebotes abschätzen	siehe auch Kapitel 9.3
	Notwendige Tarife bestimmen	siehe auch Kapitel 5.3.3
Entscheidung		
	Entscheid über die Weiterentwicklung des Projektes (iterativer Prozess)	
	Übergang in die Entwurfsplanung	

6.5 Phase 2: Entwurfsplanung

In der Entwurfsplanung werden die in der Vorstudie gemachten Abschätzungen konkretisiert. Das Ziel ist eine oder mehrere wirtschaftlich vertretbare Varianten zur Auswahl zu haben.

Für die Situationserfassung in der Entwurfsplanung wird für die Berechnung und Optimierung des Wärmenetzes eine Datenbasis der potenziellen Wärmeabnehmer erarbeitet. In den weiteren Projektierungsschritten wird diese aktualisiert und die Genauigkeit erhöht.

Darauf aufbauend wird das Wärmeversorgungsgebiet konkretisiert (Standorte für Wärmezentralen und Trassenführungen). Aufgrund der Randbedingungen wird ein geeignetes Rohrsystem evaluiert und dimensioniert.

Damit erfolgt eine zweite wirtschaftliche Betrachtung. Für die weitere Planungssicherheit sollte bei Baubeginn ein möglichst hoher Deckungsgrad des Jahresenergieabsatzes durch schriftliche Zusicherung (unterzeichnete Wärmelieferverträge oder Absichtserklärungen) gesichert sein.

6.5.1 Konkretisieren der Schlüsselkunden

Für die Umfrage bei Schlüsselkunden und weiteren potenziellen Wärmeabnehmer kann als Vorlage oder direkt nutzbar der im Anhang (Kapitel 14) aufgeführte Fragebogen benutzt werden. Der Fragebogen beinhaltet unter anderem die folgenden Punkte:

- Anschlussinteresse: Sofort, innerhalb der nächsten 5 Jahre, später, kein Anschluss.
- Angaben zum Wärmeleistungsbedarf und zum Jahreswärmebedarf für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme
- Angaben zum jetzigen Wärmeerzeuger (Brennstoff, Baujahr, Wirkungsgrad, Verbrauch)
- Angaben zum Warmwasseraufbereitungssystem (dezentral elektrisch, zentral über Heizkessel, Winter- und Sommerbetrieb)
- Angaben zur Hausanlage (Anzahl Heizkreise, Radiator, Bodenheizung, Temperaturen)
- Erforderliches Temperaturniveau
- Angaben zu Sanierungsabsichten
- Energiebezugsfläche.

Für die Planung wird am besten eine Tabellenkalkulation erstellt und für jeden Abnehmer im möglichen Wärmeversorgungsgebiet ein Datensatz erfasst und die Daten auf Plausibilität geprüft. Die Tabelle ist ein zentrales Planungsinstrument, das im weiteren Planungsablauf laufend aktualisiert und ergänzt wird.

Der Bauherr ist verantwortlich für die Zuteilung eines Abnehmerstatus und eines Anschlusstermins. Mit Fortschreiten des Projekts sollte ein möglichst hoher Deckungsgrad des Jahresenergieabsatzes durch Absichtserklärungen oder unterzeichnete Wärmelieferverträge gesichert sein. Als Empfehlung sollte bis Baubeginn

70 % des Jahresenergieabsatzes vertraglich gesichert sein.

6.5.2 Umfrage Kleinwärmeabnehmer

Potenzielle Kleinwärmeabnehmer zeichnen sich dadurch aus, dass ihr Anschluss die Anschlussdichte nicht negativ beeinflusst. Der Fragebogen kann auch zur Umfrage bei Kleinwärmeabnehmer verwendet werden. Diese sollten allerdings erst bei einer Absicht des Schlüsselkunden angefragt werden.

6.5.3 Festlegen Versorgungsgebiet

Aufgrund der Umfrage bei den Schlüsselkunden und Kleinwärmeabnehmer kann das Wärmeversorgungsgebiet festgelegt werden.

Für das Versorgungsgebiet gilt es nun einen passenden **Standort für die Wärmezentrale** zu finden und die Trassenführung zu definieren. Ökonomisch günstig ist in der Regel ein Standort an zentraler Lage im Versorgungsgebiet, um kleine Leitungsquerschnitte zu ermöglichen.

Bei der **Trassenführung** ist auf wenig Richtungswechsel und Abzweiger zu achten. Weitere Hinweise sind in Kapitel 4 ausgeführt. Die Dimensionierung der einzelnen Leistungsabschnitte erfolgt auf Basis eines maximalen Druckabfalls für die Einzelstränge von 250 bis 300 Pa/m im geplanten Endausbau und bei Auslegetemperatur (siehe Kapitel 7.3). Aufgrund der Trassenführung müssen folgende Aspekte ebenfalls berücksichtigt und geklärt werden:

- Durchleitungsrechte
- Hindernisse, Querungen (Gleise, Fluss, etc.)
- Koordination mit Werkleitungen

6.5.4 Zweite wirtschaftliche Betrachtung

Während die wirtschaftliche Beurteilung der Varianten in der Entwurfsplanung noch auf mittleren Wärmegestehungskosten beruht, genügt dies nicht für das weitere Vorgehen, da zum Beispiel Verluste während der ersten Betriebsjahre nicht durch Gewinne in späteren Jahren kompensiert werden, sondern zu Liquiditätsproblemen führen können. Für die Entwicklung des Unternehmens muss daher eine Planbilanz und Planerfolgsrechnung für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums bestimmt werden.

Die Ausarbeitung kann durch den Planer oder den Bauherrn erfolgen, wozu die Aufgabenteilung frühzeitig erfolgen muss. Mindestens die projektspezifischen Daten wie die Struktur und die Anschlussdichte des Wärmenetzes, welche einen grossen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben, müssen jedoch vom Planer erarbeitet und für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Verfügung gestellt werden. Die Kontrolle der Wirtschaftlichkeit sollten nicht nur in der Planungsphase durchgeführt, sondern während der Laufzeit des Heizwerkes

nachgeführt und nach möglichen Kostenoptimierungen geprüft werden. Die Kostengenauigkeit in der Phase 2 (Entwurfsplanung) beträgt in der Regel $\pm 15\%$.

6.5.5 Akquisition

Die Akquisition von Wärmeabnehmer ist in der Regel Aufgabe des Bauherrn oder des Betreibers der Anlage, sie kann aber auch auf den Planer übertragen werden. Zu beachten ist jedoch, dass der Betreiber nach Über-

nahme der Anlage meist allein verantwortlich ist für Marketing, Kundenbetreuung, Beratung und Akquisition von Neukunden. Aus diesem Grund wird insbesondere neuen Fernwärmenetz-Betreibern empfohlen, diese Aufgaben frühzeitig vorzubereiten. Dabei ist zu beachten, dass Marketing und Kundengewinnung bis zum Vertragsabschluss zeitaufwändig sein kann.

Tabelle 6.11 Checkliste Phase 2 – Entwurfsplanung

Check	Checkliste Phase 2 – Entwurfsplanung	Bemerkungen
Konkretisieren Schlüsselkunden		
	Anschlussbedingungen der Schlüsselkunden konkretisieren (mit Fragebogen bestätigen lassen)	siehe Fragebogen in Kapitel 14
	Daten auf Plausibilität prüfen	
	Standort, Typ und Umfang der Übergabestation abklären (z.B. Umbau bestehender Energiezentralen)	
	Zukünftige Entwicklung des Wärmebedarfs (Sanierungsabsichten, Termine, etc.)	diese Information sollte aus dem Fragebogen hervorgehen; siehe auch Kapitel 2.4
Umfrage Kleinwärmeabnehmer (liegen folgende Angaben vor?)		
	Anschlussinteresse: Ja / Nein	
	möglicher Anschlusszeitpunkt	
	Jährlicher Wärmebedarf in kWh/a aufgeteilt in Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme	
	Anschlussleistung in kW	
	Energiebezugsfläche EBF in m ²	
	Erforderliches Temperaturniveau in °C	
	Eventuell Fragebogen versenden	siehe Fragebogen in Kapitel 14
	Zukünftige Entwicklung des Wärmebedarfs (Sanierungsabsichten, Termine, etc.)	diese Information sollte aus dem Fragebogen hervorgehen; siehe auch Kapitel 2.4
Festlegen Wärmeversorgungsgebiet		
	Aktualisieren der Wärmeabnehmer	
	Festlegen des Wärmeversorgungsgebietes	
	Lastkennlinie und Jahresdauerlinie aktualisieren	
	Standort der Wärmezentrale festlegen	
	Trassenführung der Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen festlegen (Durchleitungsrechte einholen, Hindernisse erfassen wie Strassenquerungen, Bahngleise, Grundwasser, Flüsse und Koordination mit Werkleitungen)	siehe auch Kapitel 4.4 bis 4.6
	Rohrsystem für Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen evaluieren (evtl. mehrere Varianten)	siehe auch Kapitel 4.3.1.7
	Dimensionierung der Fernwärmeleitungen (max. Druckabfall Teilstrang 250 bis 300 Pa/m)	gemäss Kapitel 7.3
Zweite Wirtschaftliche Betrachtung		
	Businessplan mit Planbilanz und Erfolgsrechnung erstellen/aktualisieren	siehe auch Kapitel 9.5
	Anschlussdichte bestimmen	
	Wärmeverteilverluste abschätzen	siehe auch Kapitel 7.1
	Lokales und regionales Energieangebot aktualisieren	
	Investitions- und Betriebskosten abschätzen ($\pm 15\%$)	siehe auch Kapitel 9.2
	Wärmegestehungskosten auf Basis des Energieangebotes aktualisieren	siehe auch Kapitel 9.3
	Notwendige Tarife evtl. anpassen	siehe auch Kapitel 5.3.3
	Wärmeliefervertrag und Technische Anschlussvorschriften verfassen	siehe auch Kapitel 5.3
Entscheidung		
	Entscheid über die Umsetzung des Projektes (iterativer Prozess)	
	Übergang in die Ausschreibungs- und Vergabephase	

6.6 Phase 3: Planung, Ausschreibung und Vergabe

Das Ziel von Phase 3 ist das jeweilige „Projekt Fernwärme“ soweit zu planen und vorzubereiten, dass eine reibungslose Ausführung möglich ist. Die Aufgaben in Phase 3 umfassen folgende Punkte:

- Auslegung Wärmenetz (Rohrsystem, Dimensionierung, etc.)
- Übergabestationen spezifizieren
- Pläne erstellen
- Ausschreibung vorbereiten und Offerten einholen
- Vergabe in Absprache mit dem Bauherrn
- Mithilfe bei der wirtschaftlichen Beurteilung

Die Voraussetzung für die erfolgreiche Auftrags Erfüllung ist eine klare Informations- und Kommunikationsstrategie und soll durch klare Regeln definiert werden. In der Ordnung für Leistungen und Honorare der Bauingenieurinnen und Bauingenieure nach SIA 103 [78] werden die Rechte und Pflichten der Parteien beim Abschluss und bei der Abwicklung von Verträgen über Ingenieurleistungen klar geregelt.

6.6.1 Auslegung Wärmenetz

Planung, Auslegung, Spezifizierung und Berechnung des Wärmenetzes:

- Ausführungsstandard des Wärmenetzes festlegen
 - Wahl des Rohrsystems und Dämmstandard
 - Verlege-Situationen klären und Verlege-Verfahren festlegen
 - Notwendige Armaturen festlegen
 - Datenübertragung und Leckageüberwachung einplanen
- Pläne erstellen
 - Situationspläne 1:200/1:500
 - Längenprofile
 - Detailpläne Freileitungen
 - Grabenprofile
- Dimensionierung Leitungsabschnitte
- Auslegung Netzpumpen, Armaturen und sonstige Sicherheitseinrichtungen
- Rohrstatik erstellen
- Durchleitungsrechte klären und wenn nötig einholen

6.6.2 Spezifikation Übergabestation

Das Konzept der Wärmeübergabe bzw. der Standard für die Übergabestationen muss zwingend definiert werden und das zeitliche Vorgehen muss mit dem Gesamtprojekt abgestimmt werden. Alle technisch relevanten Punkte sollten in den TAV aufgeführt werden (Anschlussart, Grädigkeit des Wärmeübertragers, Druck- und Temperaturbeständigkeit, Sicherheitseinrichtungen, Materialien, Wärmedämmung, Datenübertragung, etc.). Für die Umsetzung ist ein detailliertes Terminprogramm zu erstellen und mit dem Bauherren abzusprechen. In

Ausnahmefällen kann je nach Situation von den Anforderungen abgewichen werden, jedoch nur wenn dies keinen negativen Einfluss z.B. auf die Rücklauftemperatur hat.

6.6.3 Baubewilligungsverfahren

Ziel des Baubewilligungsverfahrens ist das Erlangen der Baubewilligung. Es gilt das Dossier für die Eingabe zusammenzustellen. Dafür benötigt werden unter anderem Pläne, Formulare, Berechnungen etc.. Das Baubewilligungsverfahren ist vorgängig mit den örtlichen Gemeinde- und Kantonsbehörden zu klären. Je nach Kanton kann das Verfahren bis zu 6 Monaten beanspruchen.

6.6.4 Ausschreibung vorbereiten

Primär werden die Leistungen für die Rohr- bzw. Tiefbauarbeiten ausgeschrieben. Es ist möglich, dass die Installation der Leckageüberwachung sowie die Durchführung der Durchstrahlprüfungen (Röntgen-) der Schweissnähte separat ausgeschrieben werden. Für die Ausschreibungen werden Leistungsverzeichnisse erstellt, in denen Allgemeine und besondere Bestimmungen verlangt werden. Die Ausschreibungen enthalten die unten aufgelisteten Bestandteile und mehr oder weniger detaillierte Planunterlagen:

- Ausschreibungspläne für den Tief- und Leitungsbau erstellen
 - Gefälle
 - Materialien
 - Überdeckung
 - Sonderbauwerke (z.B. Schächte)
 - Spriessung
 - Entleerung und Entlüftung
 - Sektionierung (Absperrarmaturen)
 - Kompensationsmassnahmen
 - Aufmasse zum Tief- und Rohrbau
- Anleitung zum Schweißen der Mediumrohre, falls vorhanden Verfahrensprüfung
- Generelle Personalqualifikation und Nachweis für Fachpersonal und beauftragte Firmen
- Zeugnisse der Stahl- und Kunststoffschweisser sowie Arbeitsproben, dasselbe für Muffenmonteure inkl. Nachdämmen

In der Regel sind die Übergabestationen nicht Bestandteil der Ausschreibung des Fernwärmenetzes. Je nach Auftragsumfang kann dafür eine separate Ausschreibung notwendig sein. In diesem Fall ist ein eindeutiges Pflichtenheft zu erstellen.

Anhand des Normpositionen-Katalogs (NPK) [78] kann die Ausschreibung standardisiert und vereinfacht erstellt werden. Der NPK ist, dem Bauablauf entsprechend, in rund 200 Kapitel unterteilt, die alle nach der gleichen Systematik aufgebaut sind und zur Erstellung klarer und detailgenauer Leistungsbeschreibungen beim Bauen dient. Zudem ist er ein Nachschlagewerk und eine Checkliste für die Devisierung. Speziell für Leitungen und Armaturen im Fernwärmebereich ist seit Anfang 2017 im NPK das Kapitel 414 erhältlich.

6.6.5 Submission

Bei öffentlichen Auftraggebern muss die Verfahrensart vorgängig geklärt werden, bei Privaten werden in der Regel mit der Bauherrschaft die Unternehmerlisten bereinigt. Die Submissionsphase endet mit der Offertkontrolle, Offertvergleich und einer Vergabeempfehlung an die Bauherrschaft. Evtl. wird (bei nicht öffentlichen Ausschreibungen) noch eine Abgebotsrunde durchgeführt.

6.6.6 Dritte Wirtschaftliche Betrachtung

Die Planbilanz und Planerfolgsrechnung wird auf den aktuellen Stand gebracht. Die Investitions- und Be-

triebskosten sowie die Wärmegestehungskosten können bestimmt werden. Auf dieser Basis sollten die zum Teil schon gültigen Tarife kontrolliert werden. Die Kostengenauigkeit in der Phase 3 beträgt $\pm 10\%$.

6.6.7 Vergabe

Aufgrund der eingereichten Offerten können die einzelnen Arbeitspakete verteilt und vergeben werden. Mit dem Abschluss von Phase 3 beginnt die Ausführungsphase, die mit der Abnahme der Anlage endet.

Tabelle 6.12 Checkliste Phase 3 – Planung, Ausschreibung und Vergabe

Check	Checkliste Phase 3 – Planung, Ausschreibung und Vergabe	Bemerkungen
Auslegung Wärmenetz		
	Ausführungsstandard des Wärmenetzes festlegen (Rohrsystem, Dämmstärke, Verlege-Methoden und –Verfahren, Armaturen, Datenübertragung, Leckageüberwachung, etc.)	siehe auch Kapitel 4.3.1.7 und 4.4 bis 4.6
	Dimensionierung der Fernwärmeleitungen festlegen (max. Druckabfall Teilstrang 250 bis 300 Pa/m)	gemäss Kapitel 7.3
	Auslegung der Netzpumpen, Armaturen und Sicherheitseinrichtungen	siehe auch Kapitel 7.4, 4.3.3, 8.1.5 und 8.1.6
	Rohrstatik erstellen (Berechnung der Auflager, erforderliche Überdeckung, Kompensation, Festpunkte, Dehnung, Nachweis der statischen Belastbarkeit, etc.)	siehe auch Kapitel 7.5
Spezifikation Übergabestation		
	Grädigkeit des Wärmeübertragers	gemäss Kapitel 8.1.9
	Hydraulische Einbindung primärseitig zw. Lieferant und Kunde sowie sekundärseitig für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme	siehe auch Kapitel 8.4 bis 8.6
	Steuer- und Regelungstechnische Anforderungen festlegen	siehe auch Kapitel 8.1.7
	Wärmezähler (Datenübertragung und –überwachung)	siehe auch Kapitel 8.1.4
Baubewilligung		
	Erstellen der Unterlagen für die Baueingabe	
	Baueingabe mit örtlichen Gemeinde- und Kantonsbehörden klären	
	einholen der Baubewilligung	
Ausschreibung vorbereiten		
	Ausschreibungspläne für den Tief- und Leitungsbau erstellen (Gefälle, Materialien, Überdeckungshöhen, Sonderbauwerke, Spriessung, Entleerung, Entlüftung, Sektionierung und Kompensationsmassnahmen)	
	Generelle Personal- und Firmenqualifikation definieren	
	Evtl. separate Ausschreibung für Übergabestation	
Submission		
	Klären der Verfahrensart (Öffentlich, per Einladung, etc.)	
	Tief- und Leitungsbau	
	Wärmeübergabestation und hydraulische Einbindung	
	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik MSR, Leitsystem, etc.	
	Wärmezentrale (Wärmeerzeugung, Verteilung, Brennstofflager- und Disposition, etc.)	
Dritte Wirtschaftliche Betrachtung		
	Businessplan mit Planbilanz und Erfolgsrechnung aktualisieren	siehe auch Kapitel 9.5
	Investitions- und Betriebskosten bestimmen ($\pm 10\%$)	siehe auch Kapitel 9.2
	Wärmegestehungskosten bestimmen	siehe auch Kapitel 9.3
	Tarife kontrollieren	siehe auch Kapitel 5.3.3
Vergabe		
	Offertenvergleich und Vergabe	

6.7 Phase 4: Ausführung und Abnahme

In der Phase 4 wird das Fernwärmenetz gebaut. Auf Basis von detaillierten Ausführungsplänen werden Gräben ausgehoben, Leitungen gelegt, geschweisst und geprüft. In der Folge werden Teilsysteme und am Ende das Gesamtsystem auf deren Funktionstüchtigkeit geprüft. Mängel und Funktionsstörungen werden detailliert notiert und behoben, bevor die Anlage in Betrieb genommen wird. Auch in dieser Phase ist für eine erfolgreiche Auftragsbefreiung eine klare Informations- und Kommunikationsstrategie die Voraussetzung und soll durch klare Regeln definiert werden. Wie in Phase 3 schon erwähnt, werden in der Ordnung für Leistungen und Honorare der Bauingenieurinnen und Bauingenieure nach SIA 103 [78] die Rechte und Pflichten der Parteien beim Abschluss und bei der Abwicklung von Verträgen über Ingenieurleistungen klar geregelt.

Als Abschluss kommt es zur Abnahme bzw. Übergabe der Anlage an den Bauherren.

6.7.1 Ausführungspläne

Auf Basis der Ausschreibungspläne werden detaillierte Ausführungspläne erstellt oder je nach Stand und Detaillierungsgrad entsprechend angepasst.

6.7.2 Ausführung

Der wesentliche Auftrag während der Ausführung ist die Bauüberwachung. Diese dient der termin- und fachgerechten Ausführung sowie der übergeordneten Baukoordination. Dazu gehören:

- Organisation der Baustelle
 - Startsituation bzw. Begehung mit Behörden und Unternehmer vor Ort organisieren und protokollieren)
 - Termine absprechen und Koordinieren
- Baubesprechungen koordinieren und leiten (Projektstand, Schnittstellen einzelner Lieferanten, Terminplan, etc.)
- Informieren des Bauherrn über den Projektfortschritt
- Prüfen der Ausführungen, evtl. Abnahme einzelner Teilsysteme (Checklisten in AGFW-Arbeitsblatt FW 401 [100] Teil 17)
- Erdverlegte Rohrleitungen sollten durch ein Trassenwarnband über jeder Leitung gesichert werden. Nichtmetallische Leitungen (PMR) sollten mit einem detektierbaren Trassenwarnband verlegt werden.

6.7.3 Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme ist folgender Ablauf zu empfehlen:

- Funktionskontrolle der Anlagenteile und Systeme
- Kalte Inbetriebsetzung der Anlage
- Mängel und Funktionsstörungen beheben
- Inbetriebnahme der Anlage
- Protokoll über den Verlauf und Ergebnis der Inbetriebnahme erstellen und von allen Beteiligten zu unterschreiben.
- Aufgetretene Mängel sind bis zur Übergabe zu beheben.

Mit der Inbetriebnahme geht die Verantwortung grundsätzlich an den Betreiber über. Häufig wird ein Fernwärmenetz jedoch in Betrieb genommen bevor die ganzen Baumassnahmen (z.B. Wiederherstellung der Oberfläche) abgeschlossen sind, in diesem Fall liegt die Verantwortung der Baustelle der Bauleitung bis die Arbeiten vollständig abgeschlossen sind oder bis zur offiziellen Übergabe an den Betreiber.

6.7.4 Dokumentation

Die Voraussetzung für einen sicheren Betrieb und Unterhalt ist die verlässliche, vollständige und aktuelle Leitungsdokumentation. Diese trägt wesentlich dazu bei, dass die Leitungen und Anlagenteile schnell und zuverlässig auffindbar sind und bildet nach [6] die Basis für die Planung von Erweiterungs- und Instandhaltungsvorhaben und hilft bei der Darstellung von detaillierten Anlagendokumentationen. Die Grundlage für eine verlässliche Leitungsdokumentation ist die exakte Einmessung und Nachführung der Unterlagen. Der Aufwand für die Nachführung kann erheblich sein und ist entsprechend einzuplanen.

Der Dokumentationsumfang kann für den technischen Teil in zwei Hauptbereiche gegliedert werden:

- die Prüf- und Nachweisdokumentation
- die Betriebstechnische Dokumentation.

Die Unterlagen der **Prüf- und Nachweisdokumentation** bestehen aus aktuellen Unterlagen der Betriebsanlagen und geben über deren ordnungsgemäße Herstellung Auskunft. Sie umfassen folgende Punkte:

- Herstellungsdocumentation der Anlagen (Planungsunterlagen, Qualitätsprüfungen, Abnahmezeugnisse)
- Baustellendokumentation zum Nachweis der Qualitätskontrolle und der Gewährleistungsansprüche
- Erweiterungen (Neubau, Kundenanschlüsse)
- Anpassung der Dokumentation an Veränderungen an technischen Anlagen im Rahmen der Instandhaltung (Austausch von Baugruppen oder Anlagenteilen)
- Veränderungen der technischen Anlagen durch behördliche oder private Bedürfnisse (Trassenumlegungen, vertragliche Veränderungen).

Eine Übersicht zur Dokumentation der erforderlichen Massnahmen zur Qualitätssicherung umfasst folgende Punkte:

- Abnahmen und dazugehörige Protokolle der Lieferungen und Leistungen
- CE-Erklärungen inklusive Gefahrenanalyse
- Nivellement der Fernwärme-Rohrleitung
- Abrechnungs-Isometrien zum Rohrbau
- Lieferung und Nachweis des Rohrherstellers
- Übersicht zu den Materialbescheinigungen mit Objektzuordnung zu den Stahl-Rohrteilen, Mantelrohren, Muffen, PUR-Schaum, Armaturen, etc.
- Nachweise und Ergebnisse der werksinternen und externen Prüfungen
- Filme und Protokolle zur Durchstrahlung der werkseitigen Schweissnähte
- Protokolle für:
 - Verlegearbeiten und Qualitätskontrollen
 - Schweissarbeiten am Mediumrohr
 - Vorspannung oder Vorwärmung der Fernwärmeleitung
 - Nachdämmarbeiten und Dehnpolstereinbau
 - Schleifenmessung beim Leckageüberwachungssystem
- Berechnungsnachweise (Revisionszustand)
- Pläne, Zeichnungen und statischer Nachweis zu Schachtbauwerken
- Statischer Nachweis zu Press- und Schutzrohre, falls verlangt
- Trassenplangesamtübersicht
- Revidierte Trassen- und Detailpläne
- Revidierter Plan des Leckageüberwachungssystem in Verbindung mit der Begleitkabelführung (geografische Darstellung)
- Teilezeichnungen zu Armaturen, Einbauten, etc. für die Ersatzteilhaltung.

Zur **Betriebstechnischen Dokumentation** gehören alle Unterlagen, welche zur Sicherung und Unterstützung der ordnungsgemässen Betriebsführung sowie zur Einhaltung der Arbeitssicherheit beitragen:

- Vorschriften, Gesetze, Normen
- Betriebsvorschriften und Arbeitsanweisungen
- Betriebshandbücher
- Dokumentation von wiederkehrenden Prüfungen

- Organisatorische Pläne (Verantwortungsstrukturen, Bereitschaftspläne, Notfall- und Einsatzpläne, Weiterbildungspläne)
- Wartungs- und Instandhaltungsplanung
- Lebenslaufunterlagen für Anlagen (Schadensauswertungen, Störungs- und Reparaturberichte etc.)
- Gerätelisten mit Überwachungs- und Prüfnachweisen (elektrische Geräte, Wärmezähler, Manometer, Temperaturfühler, etc.)
- Kundendateien
- Anlagen und Betriebsmittelkennzeichnungssysteme.

Alle im Betrieb notwendigen Unterlagen sind zugänglich zu halten und in speziellen Schulungen zu vermitteln.

Neben der Dokumentation in schriftlicher Form (Planunterlagen, etc.) ist auch der Kennzeichnung der Anlagenteile vor Ort Rechnung zu tragen. Die am Objekt angebrachte Anlagenkennzeichnung sollte demnach der Bezeichnung im Planwerk entsprechen. Weiter sind auch Fernwärmeleitungsanlagen im öffentlichen Raum erkennbar zu gestalten. Folgendes ist zu beachten:

- Oberirdische Bauwerke und Bedienpunkte in Freileitungen sollten mit der Anlagenkennzeichnung sowie Klartext ausgestattet sein.
- Bei unterirdischen Bauwerken sollten Schachtdeckel eingesetzt werden, welche auf eine Fernwärmeanlage hinweisen.
- Erdeinbauarmaturen in erdverlegten Trassen müssen in Analogie zu Gas oder Wasser mit einer Lagekennzeichnung durch Schilder gekennzeichnet sein.

6.7.5 Kostenkontrolle

Zur Ausführung und Abnahme gehört auch eine Bauabrechnung, in der alle Kosten für die Erstellung des Fernwärmenetzes zusammengetragen und in einem Bericht festgehalten werden.

6.7.6 Abnahme

Bei der Abnahme der Anlage wird das Gesamtsystem formell an den Bauherren übergeben. Für die Abnahme sollten mindestens der verantwortliche Planer, der oder die Anlagenlieferanten und der Bauherr anwesend sein. Die Abnahme erfolgt aufgrund:

- Abnahme anhand des Pflichtenhefts
- Dokumentation überprüfen und evtl. Nachführen
- Abnahme der Kostenkontrolle
- Abnahmeprotokoll erstellen und von allen zu visieren.

Tabelle 6.13 Checkliste Phase 4 – Ausführung und Abnahme

Check	Checkliste Phase 4 – Ausführung und Abnahme	Bemerkungen
Ausführungspläne		
	Ausführungspläne für den Tief- und Leitungsbau auf Basis der Ausschreibungspläne erstellen (Gefälle, Materialien, Überdeckungshöhen, Sonderbauwerke, Spriessung, Entleerung, Entlüftung, Sektionierung und Kompensationsmassnahmen)	
Ausführung		
	Abschluss einer Bauwesenversicherung	siehe Kapitel 6.9.4
	Bauüberwachung während der Bauphase (Kontrolle der termin- und fachgerechten Ausführung)	
	Baubesprechungen koordinieren und leiten (Projektstand, Schnittstellen einzelner Lieferanten, Terminplan, etc.)	
	Informieren des Bauherren über den Projektstand	
	Prüfen der Ausführungen, evtl. Abnahme einzelner Teilsysteme	
Inbetriebnahme		
	Funktionskontrolle aller Anlagenteile und Systeme	
	Warminbetriebsetzung der Anlage	
	Mängel und Funktionsstörungen beheben	
	Inbetriebnahme der Anlage	
Dokumentation		
	Prüf- und Nachweisdokumentation erstellen	
	Betriebstechnische Dokumentation erstellen	
	Betriebshandbuch erstellen	
Kostenkontrolle		
	Baubrechnung erstellen, in der alle Kosten für die Erstellung des Fernwärmenetzes zusammengetragen sind.	
Abnahme		
	Abnahme des Gesamtsystems anhand des Pflichtenheftes. An der Abnahme sollten der Planer, der oder die Anlagelieferanten und der Bauherr anwesend sein.	
	Dokumentation überprüfen und nachführen	
	Betriebshandbuch aktualisieren	
	Instruieren des Anlagenbetreibers	
	Abnahmeprotokoll erstellen und von allen Beteiligten unterschreiben lassen	

6.8 Phase 5: Betriebsoptimierung

Die herkömmlichen Methoden der Inbetriebsetzung und Abnahme, vor allem für komplexe Anlagen, ist häufig unzureichend und ist keine Gewährleistung für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage. Auch wenn Anlagen richtig projektiert und entsprechend gebaut wurden, werden sie oft nicht so betrieben, wie dies im Konzept vorgesehen ist. Unabdingbar für eine richtige Funktionsweise ist eine Betriebsoptimierung, mit der nach der Übergabe der Anlage an den Bauherren die Anlagefunktionen systematisch überprüft und mit den Vorgaben der Funktionsbeschreibung verglichen werden. Aufgrund dieser Überprüfung können Mängel an Anlagekomponenten behoben und die Einstellungen von Steuer- und Regelparametern verbessert werden.

Bei subventionierten Projekten kann die Betriebsoptimierung ein wesentlicher Bestandteil der Subventionsbedingungen und somit auch obligatorisch sein.

Die Betriebsoptimierung wird je nach Anlagegrösse in den ersten ein bis zwei Jahren nach der Abnahme der Anlage durchgeführt. Je nach Ausbaugrad und geplantem Endausbau kann oder sollte die Betriebsoptimierung wiederholt oder nachgeholt werden. Bei Fernwärmeanlagen sollte zumindest eine volle Heizperiode für die Betriebsoptimierung herangezogen werden können.

Für eine gezielte Datenerfassung ist es notwendig, dass schon früh in der Planung ein **Konzept** für die **Betriebsoptimierung** erstellt wird. Das Konzept regelt wann, von wem und wie welche Betriebsdaten erfasst und ausgewertet werden. Das Konzept der Betriebsoptimierung, insbesondere deren Auftragserteilung zur Durchführung muss vom Bauherren und vom verantwortlichen Planer unterschrieben werden. Die Datenerfassung hat ab Inbetriebnahme der Anlage zu erfolgen und ist solange durchzuführen wie vertraglich vereinbart wurde. Die Datenerfassung für die Betriebsoptimierung sollte jedoch mindestens über ein Jahr erfolgen.

Damit eine erfolgreiche Betriebsoptimierung gemeinsam mit den Anlagelieferanten erfolgen kann, sind entsprechende finanzielle Sicherstellungen für die Gewährleistungsdauer in den Werkverträgen vorzusehen (Hafrücklässe), da ansonsten nicht alle Anlagelieferanten aus freien Zügen an der Betriebsoptimierung teilnehmen würden.

6.8.1 Datenerfassung

Wie oben erwähnt wird bei der Betriebsoptimierung untersucht, ob die Anlage so funktioniert, wie es bei der Projektierung vorgesehen war. Diese Untersuchung kann nur erfolgen, wenn vorher festgelegt wurde, wie die Anlage funktionieren soll. Die notwendigen Voraussetzungen für eine Betriebsoptimierung sind einerseits ein Konzept zur Betriebsoptimierung und andererseits müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Funktionsbeschreibung mit Prinzipschema, in der detailliert beschrieben ist, wie die Anlage in den verschiedenen Betriebszuständen funktionieren soll.
- Liste der vereinbarten und garantierten Kennzahlen, mit denen der Nachweis für einen optimalen Betrieb erbracht werden soll.
- Messstellenliste, in welcher pro Messstelle der Messort, der Messbereich, die Auflösung und die Messgenauigkeit angegeben sind.
- Beschreibung, wie die automatische Datenaufzeichnung durchgeführt wird. Hier müssen auch die Verantwortlichkeiten festgehalten werden:
 - die Spezifikationen und die Planung der Datenaufzeichnung
 - das Auslesen der Daten
 - die Datenauswertung
- Die Anlage muss mit der entsprechenden Leittechnik ausgerüstet werden und in der Lage sein die gewünschten Daten aufzuzeichnen und zu archivieren.

Eine Fernauslesung für den Planer und den Anlagelieferanten sind von grossem Vorteil für den raschen Zugang zu den Betriebsdaten. Mit einer kontinuierlichen Datenerfassung z.B. mit einem Leitsystem können auch zu einem späteren Zeitpunkt Daten ausgewertet und Optimierungen vorgenommen werden.

Durch eine Datenkommunikation im Fernwärmenetz und der Erfassung der Daten in einem zentralen Leitsystem stehen die Daten der jeweiligen Hausübergabestationen in ständiger Verbindung mit der Wärmezentrale. Dadurch werden alle relevanten Daten der Übergabestationen (Momentanleistung, Durchfluss, Temperaturen, Solltemperaturen, Betriebsstatus, Pumpen- und Ventilstatus, etc.) protokolliert, können grafisch dargestellt und ausgewertet werden.

Diese Datenkommunikation wird durch einen Datenbus hergestellt. Die Datenüberreichweite darf nicht durch die Anzahl der angeschlossenen Regelgeräte eingeschränkt sein. Der Hardwareaufbau der Schnittstellen muss für die Bedingungen im Fernwärmebereich ausgelegt sein (möglicher hoher Störeinfluss durch parallel verlegte Energiekabel, unterschiedliche Erdpotenziale der einzelnen Abnehmerhäuser, Gefahr durch direkten und indirekten Blitzschlag).

Durch den ständigen Datenverbund werden die Abläufe im gesamten Fernwärmenetz transparent gemacht und es ist das Fernverstellen aller Anlageparameter jeder einzelnen Übergabestation möglich. Es kann daher von jedem beliebigen Ort aus (z.B. auch per Notebook und Mobiltelefon) der Wärmeabnehmer bei der Einstellung seiner Anlage unterstützt werden.

Die Verlegung des Kabels erfolgt meist in Baumstruktur mit einer Einschleifung in jedes Haus. Es sind dadurch keine Schleifen, Ringe oder Abschlusswiderstände im Netz notwendig, wobei Kabelmuffen im Erdreich grundsätzlich zu vermeiden sind. Die zu verlegenden Datenkabel sollten mehrpolig (entsprechend den Anforderungen des Systemlieferanten) und abgeschirmt sein. Bevor die einzelnen Fernwärmeregler an das Datenkabel angeschlossen werden, muss unbedingt die gesamte Verkabelung auf Unterbrechungen oder Kurz-

schlüsse ausgemessen werden. Um für spätere Netzerweiterungen und für eine etwaige Fehlersuche eine genaue Dokumentation der erfolgten Kabelverlegung zur Verfügung zu haben, muss die Verlegung der Kabel genau dokumentiert werden.

6.8.2 Auswertung

Damit die erfassten Daten interpretiert und beurteilt werden können, ist eine grafische Darstellung der Daten für unterschiedliche Betriebszustände unerlässlich. Die minimal zu untersuchenden Betriebszustände sind der Schwachlastbetrieb (Übergangs- oder Sommerzeit) und der Betriebszustand bei kalter Witterung. Die Daten der beiden Betriebszustände sollten folgende Anforderungen erfüllen:

- Darstellung von Wochenverläufen
- Darstellung von Tagesverläufen (24h-Verlauf) von ausgewählten Tagen
- Die wichtigsten Daten auf einem einzigen Diagramm gemeinsam darstellen
- Einheitliche Einteilung und Beschriftung der Achsen
- Nicht mehr als Sechs Parameter auf einem Diagramm

Die Auswertung der erfassten Betriebsdaten erfolgt aufgrund folgender Kriterien:

- Soll-Ist-Vergleich mit Referenzwerten (Temperatur- und Druckniveau nach TAV)
- Interpretieren der Abweichungen
- Ermittlung des Optimierungspotenzials
- Fehler- und Schaden-Dokumentation

6.8.3 Optimierung

Aus der Analyse der Datenerfassung ergeben sich Optimierungsmassnahmen. Aus dem ein Massnahmenplan zu erstellen ist, der durch den Bauherrn zu genehmigen und umzusetzen ist. Die Massnahmen können je nach Priorität auch gestaffelt umgesetzt werden.

Die gemachten Optimierungen müssen in jedem Fall kontrolliert und gegebenenfalls nachjustiert werden. Die häufigsten Anpassungen bzw. Optimierungsmassnahmen sind:

- Hydraulischer Abgleich machen
- Einstellen von Sollwerten und Reglerparameter (Temperatur, Druck, etc.)
- Zeitprogramme anpassen

Wenn möglich sollte die Aufzeichnung und Auswertung der wichtigsten Schlüsselwerte der Wärmeabnehmer (z.B. Energie in kWh und Wassermenge in m³) fortgesetzt werden. Somit kann gewährleistet werden, dass mögliche Störungen und Optimierungspotenziale schnell und einfach erfasst werden (siehe Kapitel 10).

Tabelle 6.14 Checkliste Phase 5 – Betriebsoptimierung

Check	Checkliste Phase 5 – Betriebsoptimierung	Bemerkungen
Datenerfassung		
	Erstellen eines Konzeptes für die Datenerfassung (bei subventionierten Projekten in der Regel obligatorisch)	
	Daten der Anlage erfassen und aufzeichnen	
	Einstellung der Referenzwerte protokollieren	
Auswertung		
	Grafische Aufbereitung der Daten	
	Soll-Ist-Vergleich mit Referenzwerten	
	Interpretieren der Abweichungen	
	Ermittlung des Optimierungspotenzials	
	Fehler- und Schaden Dokumentation	
Optimierung		
	Massnahmenplan zur Verbesserung (Umsetzung) erstellen	
	Massnahmen umsetzen	
	Nachkontrolle	

6.9 Phase 6: Betrieb und Bewirtschaftung

6.9.1 Betriebskonzept

Vor Ablauf der Garantiefrist, wenn möglich zusammen mit einer Schlusskontrolle, ist vom Hauptplaner neben der Aktualisierung der Dokumentation ein Betriebs-, Ausbildungs- und Wartungskonzept zu erstellen und dem Bauherrn abzugeben. Dieses Konzept muss folgende Elemente enthalten:

- revidierte Datenblätter für die manuelle Erfassung von Betriebsdaten
- Angaben, wie das Betriebspersonal für die Ausübung seiner Tätigkeit aus- und weitergebildet werden muss.
- revidierter Wartungsplan
- Alarmierung und Pikettorganisation
- Notfallplan
- Erfolgsüberwachung.

Mit der Erfolgsüberwachung wird sichergestellt, dass die Anlage auch nach Ablauf der Garantiefrist die Anforderungen für einen optimalen Betrieb erfüllt. Im Betriebskonzept muss daher festgelegt sein,

- welche Daten wie (manuell, automatisch) erfasst werden
- wie diese Daten ausgewertet werden (z.B. welche Kennzahlen, welche Excel-Auswertungen)
- wer für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse verantwortlich ist
- wer bei welchen Störungen bzw. Ereignissen zu kontaktieren ist
- in welchen Abständen wiederkehrende Prüfungen durchzuführen sind
- welche Betriebsmittel in welchen Intervallen zu analysieren sind

6.9.2 Instandhaltung

Instandhaltung bedeutet Massnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes, sowie zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes von technischen Mitteln eines Systems ergreifen. Diese Massnahmen beinhalten:

- Inspektion
- Wartungen
- Instandsetzungen (Unterhalt).

Die Instandsetzungsziele müssen mit den Unternehmenszielen abgestimmt werden und es sind entsprechende Instandhaltungsstrategien festzulegen.

Um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten, sollte sich die Instandhaltungsstrategie nicht auf die sogenannte ereignisorientierte Instandhaltung, sprich Störungsbeseitigung beschränken. Empfehlenswert ist eine vorbeugende Instandhaltung auf der Basis von Betriebsergebnissen und der Kontroll- bzw. Inspektions-

tätigkeit. Wichtige Voraussetzungen sind regelmässige Inspektionen und eine gezielte Wartung aller wichtigen Anlagen und Anlagenteile.

6.9.3 Wartungsvertrag

Je nach Grösse und Komplexität der Anlage, sowie Anzahl der beteiligten Unternehmen ist mit den Anlagelieferanten, insbesondere der Wärmebereitstellung, ein Wartungsvertrag zu vereinbaren. Auf diese Weise können Störungen auf ein minimales Mass reduziert und die Betriebssicherheit erhöht werden. Mögliche Vertragspartner sind:

- Lieferant des Kessels mit Steuerung
- Lieferant der Brennstoffversorgung
- Lieferant der Abgasbehandlung
- Lieferant der Hydraulik (Verrohrung)
- Lieferant des Regel- oder Leitsystems
- Lieferant der Leckageüberwachungsanlage
- Lieferant der Übergabestationen.

Unter Umständen ist mit allen oben angeführten Lieferanten ein Wartungsvertrag abzuschliessen. Die eingeschlossenen Leistungen sollen bei allen ähnlich oder gleich sein.

In einem Wartungsvertrag sollten folgende Punkte schriftlich festgehalten werden:

- Zweck des Vertrags
- Klare Beschreibung von Liefergrenzen und Leistungen (auch Garantien möglich!)
- Beschreibung von Ausschlüssen und Ausnahmen
- Ausweisen von Stundensätzen und Zulagen sowie Spesen
- Kosten
- Gültigkeit und Dauer
- Kündigung
- Verlängerung
- Kontaktadresse und Organisation für die Anforderung von Service-Leistungen im Notfall
- Pflichten des Betreibers
- Rechte des Unternehmers
- Ort, Datum und Unterschrift von Bauherr und Unternehmer

6.9.4 Versicherungen

Für den langfristig gesicherten wirtschaftlichen Betrieb eines Fernwärmeunternehmens muss auch der Abschluss von entsprechenden Versicherungen überlegt werden. Dies hat insbesondere deshalb grosse Bedeutung, da meist vertragliche Wärmelieferverpflichtungen mit den Abnehmern eingegangen worden sind. Es lässt sich bei keinem Heizwerk gesichert vorhersagen, dass keine unerwarteten Anlagestörungen auftreten können, welche die Wärmelieferung unterbrechen oder unwirtschaftlich machen.

Beim Abschluss von Versicherungen sollten im wesentlichen folgende Gruppen genauer betrachtet werden:

- Bauwesenversicherung (während Bauphase)
- Feuerversicherung
- Maschinenbruch- und Betriebsunterbrechungsversicherung
- Betriebshaftpflichtversicherung.

Da sich das Versicherungswesen relativ umfangreich und komplex darstellt, empfiehlt es sich eine Risikoab-

schätzung durchzuführen und Experten (z.B. Versicherungsmakler) heranzuziehen.

Tabelle 6.15 Checkliste Phase 6 – Betrieb und Bewirtschaftung

Check	Checkliste Phase 6 – Betrieb und Bewirtschaftung	Bemerkungen
Betriebskonzept		
	Betriebskonzept erstellen	
	Erfassen der Betriebsdaten	
	Aus- und Weiterbildungs-Massnahmen des Betriebspersonals festlegen	
	Wartungsplan erstellen	
	Alarmierung und Pikettorganisation	
	Notfallplan	
	Erfolgsüberwachung durchführen	
Instandhaltung		
	Instandhaltungsstrategie festlegen (vorbeugende Instandhaltung auf der Basis von Betriebsergebnissen und der Kontroll- und Inspektionsarbeiten)	
Wartungsvertrag		
	Wartungsverträge mit Lieferanten der wichtigsten Anlagesysteme vereinbaren	
Versicherungen		
	Risikoabschätzung durchführen und bei Bedarf Experten heranziehen (z.B. Versicherungsmakler)	
	Feuerversicherung	
	Maschinenbruch- und Betriebsunterbruchversicherung	
	Betriebshaftpflichtversicherung	

7 Wärmeverteilung – Berechnung

7.1 Wärmeverluste

Die Wärmeverluste der Fernwärmeverteilung werden durch das Rohrsystem (Material, Dimensionierung, Dämmstärke, Verlegung, etc.) und die Betriebsbedingungen des Fernwärmenetzes (Temperatur-Niveau, Temperaturspreizung, Betriebsregime, etc.) beeinflusst.

Für die Bestimmung der Wärmeverluste gibt es grundsätzlich zwei Ansätze.

Erstens können die Wärmeverluste anhand von Wärmezählerdaten bestimmt werden, indem die jährlich ins Netz eingespeiste Wärmemenge mit der gesamthaft an die Wärmeabnehmer gelieferten Wärmemenge verglichen werden. Mitberücksichtigt werden dabei auch Strahlungs- und Konvektionsverluste von Übergabestationen, Pumpen, Armaturen, etc.. Mit dieser Methode kann der Wärmeverlust jedoch erst im Betrieb gemessen werden.

Zweitens können die Wärmeverluste anhand von Netzplänen und Daten der eingesetzten Rohrsysteme abgeschätzt werden. Im Vergleich mit der ersten Methode sollte die zweite einen tieferen Wert aufweisen, da die erwähnten Konvektions- und Strahlungsverluste in der Regel nicht mitberücksichtigt werden.

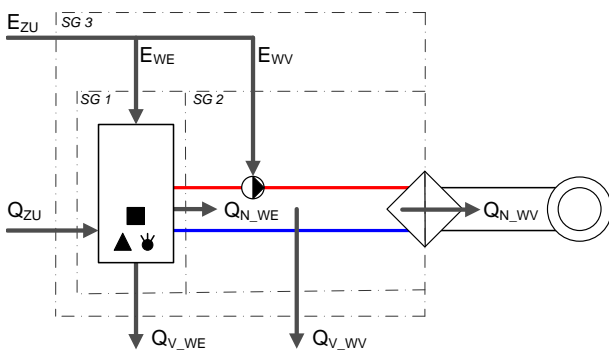


Bild 7.1 Systemgrenzen für die Beurteilung eines Fernwärmenetzes mit Begriffen nach Tabelle 7.1.

- SG1: Wärmeenergieerzeugung
- SG2: Wärmeverteilung Primärseite „Fernwärmenetz“
- SG3: Fernwärmesystem „Wärmeverbund“.

Mit den in Bild 7.1 dargestellten Systemgrenzen kann ein Fernwärmenetz beurteilt werden (Tabelle 7.1). Die Systemgrenze SG1 stellt die Wärmeenergieerzeugung (WE) dar. Zugeführte Energieströme sind einerseits die elektrische Energie für die für die Wärmeenergieerzeugung notwendigen Aggregate wie z.B. Pumpen, Fördersysteme, Ventilatoren, etc. und andererseits die im Brennstoff enthaltene Wärme. Die aus der Systemgrenze SG1 abgeführten Energieströme setzen sich zusammen aus Wärmeverluste (nicht ganz vollständige Verbrennung und Strahlungsverluste der Wärmeenergieerzeugungsanlage) und die zur Nutzung erzeugte Wärmemenge.

Die Systemgrenze SG2 stellt die Wärmeverteilung (WV) dar. Zugeführte Energieströme sind die elektrische Energie für die zur Wärmeverteilung notwendigen Aggregate wie Pumpen, Regelventile, Frequenzumrichter, Leckageüberwachung, etc. und die aus der Wärmeenergieerzeugung ins Fernwärmenetz eingespeisene Wärme. Die aus der Systemgrenze SG2 abgeführten Energieströme setzen sich zusammen aus Wärmeverlusten des Wärmeverteilnetzes und die an die Wärmeabnehmer verkaufte Wärmemenge.

Die Systemgrenze SG3 stellt das gesamte Fernwärmesystem dar. Zugeführte Energieströme sind die elektrische Energie für die Aggregate der Wärmeverteilung und Wärmeenergieerzeugung und die im Brennstoff enthaltene Wärme. Die aus der Systemgrenze SG3 abgeführten Energieströme setzen sich zusammen aus Wärmeverlusten der Wärmeenergieerzeugung, Wärmeverluste der Wärmeverteilung und der an die Wärmeabnehmer verkaufte Wärme.

Tabelle 7.1 Legende zur Darstellung der Systemgrenzen in Bild 7.1

Bezeichnung	Symbol	Einheit
Zugeführte elektrische Energiemenge	E_{ZU}	MWh/a
Elektrische Energiemenge Wärmeenergieerzeugung	E_{WE}	MWh/a
Elektrische Energiemenge Wärmeverteilung	E_{WV}	MWh/a
Zugeführte Wärme	Q_{ZU}	MWh/a
Nutzwärme Wärmeenergieerzeugung	$Q_{N_{WE}}$	MWh/a
Nutzwärme Wärmeverteilung	$Q_{N_{WV}}$	MWh/a
Wärmeverlust Wärmeenergieerzeugung	$Q_{V_{WE}}$	MWh/a
Wärmeverlust Wärmeverteilung	$Q_{V_{WV}}$	MWh/a

Das Bild 7.2 zeigt ein Fernwärmenetz nach Zielwerten von QMH [21] und das Bild 7.3 ein überdimensioniertes Fernwärmenetz aus einer Praxiserhebung [16]. Die Darstellung zeigt, dass durch die Überdimensionierung zwar der elektrische Aufwand um 70 % sinkt, die Wärmeverluste aber um 6.5 % steigen (Tabelle 7.2). Die Praxiserhebung [16] zeigt, dass hauptsächlich überdimensionierte Rohrleitungen für die höheren Wärmeverluste verantwortlich sind.

Tabelle 7.2 Vergleich der Anteile von Wärmeverlust, elektrische Energie für die Wärmeenergieerzeugung und Wärmeverteilung.

Bezeichnung	Beispiel QMH	Beispiel Real
Wärmeverlust Wärmeverteilung ¹	10 %	16.5 %
Elektrische Energiemenge Wärmeenergieerzeugung ¹	1.25 %	1.1 %
Elektrische Energiemenge Wärmeverteilung ¹	0.75 %	0.2 %

1) Bezugsgröße ist die nutzbare Wärme aus der Wärmeenergieerzeugung $Q_{N_{WE}}$

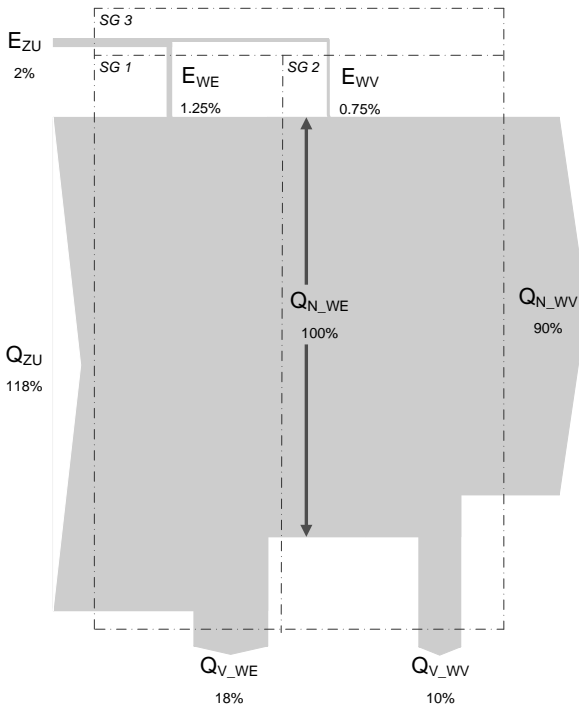


Bild 7.2 Sankey-Diagramm für ein Wärmenetz gemäss Beispiel QMH nach QM Holzheizwerke.

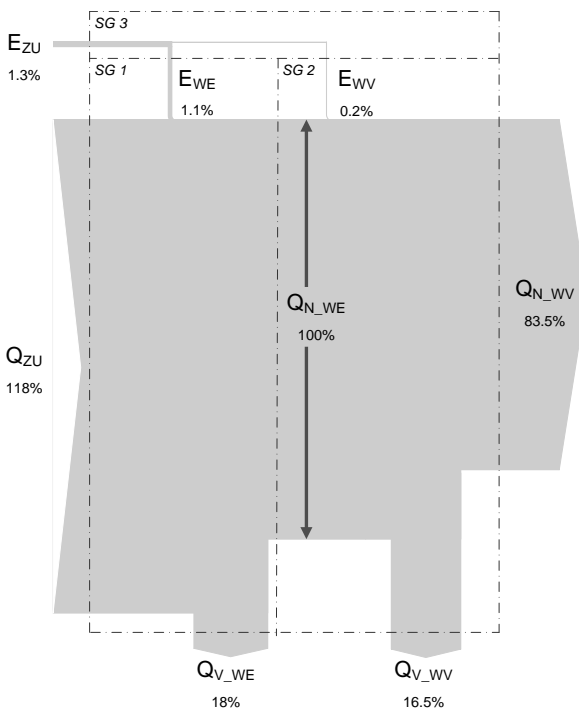


Bild 7.3 Sankey-Diagramm für ein Wärmenetz gemäss realem Beispiel.

7.1.1 Oberirdische Leitungen

Bei oberirdischen (luftumspülten) Rohrleitungen wird der Wärmedurchgangskoeffizient U für wärmegeämmte Rohre auf den Rohinnenradius des medienführenden Innenrohres r_i bezogen, da dieser für die hydraulischen Berechnungen ohnehin verfügbar sein muss.

Bezogen auf das Bild 7.4 berechnet sich der Wärmedurchgangskoeffizient U_i in $W/(m^2 K)$ mit dem Innenradius als Bezugsgrösse wie folgt:

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i}{\lambda_R} \ln\left(\frac{r_R}{r_i}\right) + \frac{r_i}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_i}\right) + \frac{r_i}{\lambda_M} \ln\left(\frac{r_M}{r_D}\right) + \frac{r_i}{r_M \alpha_a}}$$

Mit den im Heizungsbau üblichen Materialien, Rohrdurchmessern und Strömungsgeschwindigkeiten können der innere Wärmeübergangskoeffizient und die Wärmeleitwiderstände der Rohre für die Berechnung vereinfachend als unendlich gross angenommen werden. Für den äusseren Gesamtwärmeübergangskoeffizient α_a bestehend aus Konvektions- und Strahlungsanteil kann für wärmegeämmte Rohre in Gebäuden und Kanälen ein Mittelwert von ungefähr $9.7 W/(m^2 K)$ eingesetzt werden. Für Freileitungen ist der Wärmeübergangskoeffizient von der Windgeschwindigkeit abhängig. Als Mittelwert kann ungefähr ein Wert von $23.2 W/(m^2 K)$ angesetzt werden. Der Wärmedurchgangskoeffizient U_R wird daher auf den Rohraussenradius des Medienführenden Rohres r_R bezogen. Die genannten Vereinfachungen führen zu folgendem Ausdruck [44]:

$$U_R = \frac{1}{\frac{r_R}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{r_R}{r_D \alpha_a}}$$

Multipliziert mit der massgebenden Oberfläche der Rohrleitung in m^2

$$A_R = 2 \pi l r_R$$

und dem Temperaturunterschied zwischen Innen und Aussen in K

$$\Delta T = T_a - T_i$$

ergibt sich für den Wärmeverluststrom in W folgende Gleichung:

$$\dot{Q}_V = U_R A_R \Delta T = \frac{2 \pi l (T_a - T_i)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{1}{r_D \alpha_a}}$$

Der spezifische Wärmeverluststrom pro Meter in W/m ergibt dann:

$$\dot{q}_V = \frac{\dot{Q}_V}{l} = \frac{2 \pi (T_a - T_i)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{1}{r_D \alpha_a}}$$

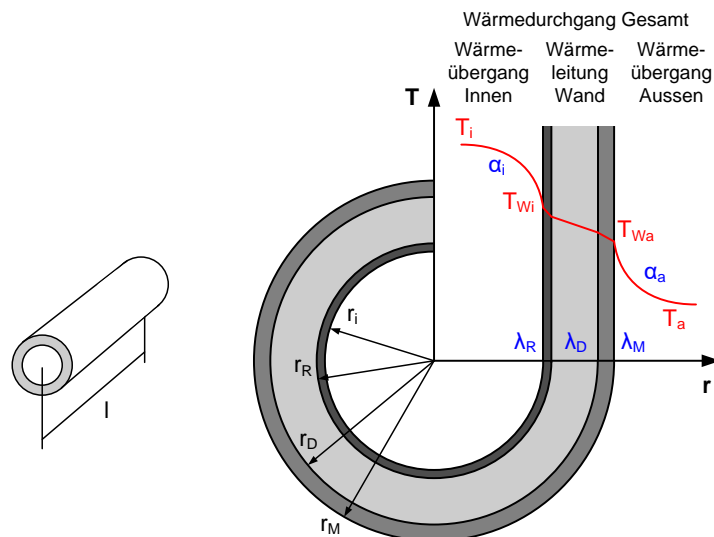


Bild 7.4 Allgemeine Darstellung des Wärmedurchgangs durch ein wärmeisoliertes Rohr.

7.1.2 Erdverlegte Leitungen

Fernwärmenetze werden heutzutage in der Regel in erdverlegten Fernwärmerohren ausgeführt. Stahl- oder Kunststoffrohre sind fest mit einer Wärmedämmung versehen und werden von einem Mantelrohr umhüllt. Die Berechnung der Wärmeverlustströme ist kompliziert, da die Wärmeleitung mindestens zweidimensional wirkt und als Randbedingungen konstante Temperatur am Rohrumfang, konstante Aussenlufttemperatur an der Erdoberfläche und konstante Grundwassertemperaturen in vorgegebener Tiefe angenommen werden. In Wirklichkeit müssten die Rohrtemperatur und die Aussentemperatur als Zeitfunktion und somit für instationäre Wärmeleitung bestimmt werden. Die numerische Berechnung kann mit der Methode der finiten Elemente erfolgen. Dies ist jedoch aufwändig und nicht verallgemeinerungsfähig und setzt Kenntnisse über das genaue Temperaturregime der betrachteten Netzteilstrecke als Zeitfunktion voraus [44].

In guter Näherung kann der Wärmetransport jedoch als stationärer Vorgang behandelt werden, weil folgendes gilt:

- Im Dämmmaterial des Rohres werden etwa 80 % bis 90 % der Temperaturdifferenz (Rohr zu Erdoberfläche) abgebaut. Wegen der relativ geringen Schichtdicke, ist der Temperaturverlauf im Mantel näherungsweise als quasistationär anzusehen.
- Die zeitliche Betriebsweise des Netzes ist im Allgemeinen nicht genau bekannt. Temperaturschwankungen mit kurzen Periodendauern beeinflussen die Erdoberflächentemperatur infolge der grossen Dämpfung nur in unmittelbarer Rohrnähe und können vernachlässigt werden.
- Für die Aussentemperaturen der Erdoberfläche bzw. der Aussenluft und des Grundwassers werden analog der genormten Berechnung für den Wärmeverlust erdoberflächberührender Bauteile zeitliche Mittelwerte verwendet.

Für die heutzutage in der Regel erdverlegten Fernwärmerohre müssen zusätzlich die Wärmeleitung vom Erdreich an die Umgebung und der gegenseitige Einfluss der beiden Rohrleitungen aufeinander berücksichtigt werden. Wie in Bild 7.5 ersichtlich, ist als minimale Wärmedämmstärke des Erdreichs gegenüber der Umgebung die Überdeckungshöhe $h_{\bar{u}}$ und der lichte Rohrabstand a zwischen den beiden Rohrleitungen zu beachten. Wie in Kapitel 7.1.1 werden die Wärmeleitwiderstände der Rohre (Stahlmedium- und Kunststoffmantelrohr) vernachlässigt.

Der Gesamt-Wärmedurchgangskoeffizient setzt sich aus folgenden drei Anteilen zusammen:

- Wärmeleitung durch das Dämmmaterial des Rohres
- Wärmeleitung durch das Erdreich
- Gegenseitiger Einfluss der beiden Rohrleitungen.

Zur Vereinfachung wird im weiteren Verlauf auf erdverlegte Fernwärmeleitungen mit starren Stahlmediumrohren in Einzelrohrführung (KMR) eingegangen. Die Berechnung kann auch auf flexible Rohrsysteme wie MMR und PMR angewendet werden, sofern die benötigten Masse und Daten zur Verfügung stehen.

Für die vereinfachte Berechnung des spezifischen Wärmeverluststroms für erdverlegte Fernwärmeleitungen mit starren Stahlmediumrohren in Einzelrohrführung gelten folgende Einschränkungen:

- Mediumrohr aus Stahl
- Mantelrohr aus Kunststoff (PE)
- Mit dem Medium- und Mantelrohr festverbundener Polyurethan-Schaum (PUR) als Dämmmaterial
- Vor- und Rücklaufleitung haben den selben Nenn-durchmesser
- Immer nur für einen Teilstrang einzeln berechenbar

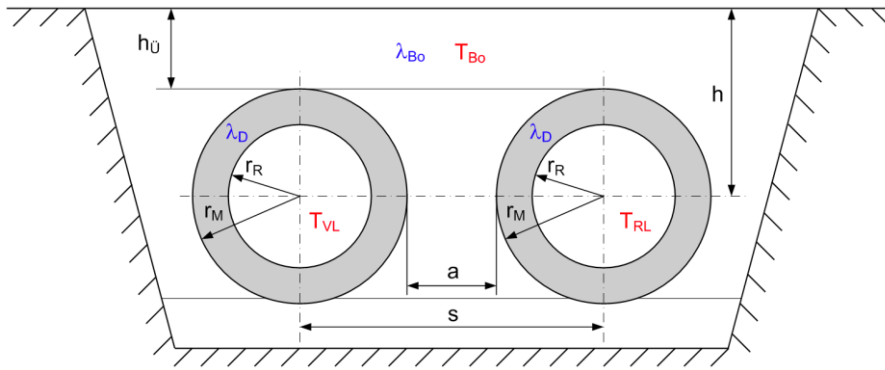


Bild 7.5 Schematische Darstellung von erdverlegten Fernwärmerohren in Einzelrohrausführung.

Aus [3] wurde folgender Zusammenhang für den Wärmeübergangskoeffizienten in $W/(m^2 K)$ von zwei erdverlegten Einzelrohren übernommen. Der Wärmeübergangskoeffizient gilt jedoch nur für eines der beiden Einzelrohre. Die Bezugsgröße ist der Aussenradius des Stahl-Mediumrohres r_R , da der Temperaturabfall durch das Stahlrohr sehr gering ist und vernachlässigt wird:

$$U_R = \frac{1}{\underbrace{\frac{r_R}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_M}{r_R}\right)}_{\text{Dämmung}} + \underbrace{\frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left(\frac{4h}{r_M}\right)}_{\text{Erdreich}} + \underbrace{\frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left[\left[\left(\frac{2h}{s}\right)^2 + 1\right]^{0.5}\right]}_{\text{Gegenseitiger Einfluss}}}$$

Die Verlegetiefe h in m kann in Abhängigkeit der minimalen Überdeckungshöhe h_U folgendermassen ausgedrückt werden:

$$h = h_U + r_M$$

Der horizontale Rohrabstand s in m kann in Abhängigkeit des lichten Rohrabstandes a wie folgt berechnet werden:

$$s = a + 2 r_M$$

Durch Einsetzen der Verlegetiefe h und des horizontalen Rohrabstandes s ergibt sich für den Wärmeübergangskoeffizienten in $W/(m^2 K)$ folgender Ausdruck:

$$U_R = \frac{1}{\frac{r_R}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_M}{r_R}\right) + \frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left(\frac{4(h_U + r_M)}{r_M}\right) + \frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left[\left[\left(\frac{2(h_U + r_M)}{a + 2 r_M}\right)^2 + 1\right]^{0.5}\right]}$$

Die massgebende Oberfläche in m^2 berechnet sich wie in Kapitel 7.1.1 jedoch zusammen für die Vor- und Rücklaufleitung. Die Bezugsgröße ist der Aussenradius des Stahl-Mediumrohres r_R .

$$A_{VR} = 2 \cdot 2 \pi L r_R = 4 \pi L r_R$$

Der Temperaturunterschied für erdverlegte Leitungen in K berechnet sich aus der Differenz zwischen der Betriebsmitteltemperatur Auslegung T_B und der mittleren Bodentemperatur T_{Bo} wie folgt:

$$\Delta T_L = T_B - T_{Bo} = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Bo}$$

Der Wärmeverluststrom für die Vor- und Rücklaufleitung eines Teilstranges in W berechnet sich aus den letzten drei Gleichungen wie folgt:

$$\dot{Q}_V = U_R A_{VR} \Delta T_L$$

$$\dot{Q}_V = \frac{4 \pi L \left(\frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Bo} \right)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_M}{r_R}\right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln\left(\frac{4(h_U + r_M)}{r_M}\right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln\left[\left[\left(\frac{2(h_U + r_M)}{a + 2 r_M}\right)^2 + 1\right]^{0.5}\right]}$$

Der spezifische Wärmeverluststrom pro Trassenmeter in W/m ergibt dann:

$$\dot{q}_V = \frac{\dot{Q}_V}{L}$$

$$\dot{q}_V = \frac{4 \pi \left(\frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Bo} \right)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln \left(\frac{r_M}{r_R} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left(\frac{4(h_U + r_M)}{r_M} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left\{ \left[\left(\frac{2(h_U + r_M)}{a + 2r_M} \right)^2 + 1 \right]^{0.5} \right\}}$$

7.1.3 Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung

Die jährlichen Wärmeverluste eines Wärmenetzes können mit dem spezifischen Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung, der mittleren Betriebsmitteltemperatur und der jährlichen Betriebszeit des Wärmenetzes vereinfacht berechnet werden.

Der spezifische Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung berechnet sich aus dem Wärmeübergangskoeffizienten, der massgebenden Oberfläche und der Länge der Rohrleitung. Diese Angaben können meistens aus Produktinformationen der Rohrsystemhersteller entnommen werden und sind in Watt pro Trassenmeter und Kelvin [W/(m K)] angegeben. Im Bild 13.6 sind die spezifischen Wärmeverluste pro Trassenmeter Rohrleitung bis DN200 für KMR-, MMR- und PMR-Rohre dargestellt und wurden nach der untenstehenden Gleichung berechnet. Die Angaben zu den Doppelrohr-Ausführungen wurden den Produktinformationen folgender Firmen entnommen: Brugg Pipesystems, Isoplus und Logstor.

$$\dot{q}_{V,L} = \frac{U_R A_{VR}}{L} = \frac{U_R 4 \pi L r_R}{L} = U_R 4 \pi r_R$$

$$\dot{q}_{V,L} = \frac{4 \pi}{\frac{1}{\lambda_D} \ln \left(\frac{r_M}{r_R} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left(\frac{4(h_U + r_M)}{r_M} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left\{ \left[\left(\frac{2(h_U + r_M)}{a + 2r_M} \right)^2 + 1 \right]^{0.5} \right\}}$$

7.1.4 Jährliche Wärmeverluste

Die Wärmeverluste der Wärmeverteilung beeinflussen die Wirtschaftlichkeit einer Anlage und sind abhängig von Anschlussdichte, Betriebsdauer (Ganzjahres- oder Saisonbetrieb), Temperaturniveau, Dimensionierung und Dämmstärke der Rohrleitung. Die jährlichen Wärmeverluste werden üblicherweise auf die jährlich ins Netz eingespeiste Wärmemenge bezogen und in Prozent angegeben.

Gemessene Wärmeverluste

Im Betrieb können die Wärmeverluste anhand von Wärmezählerdaten bestimmt werden, indem die jährlich ins Netz eingespeiste Wärmemenge mit der gesamthaft an die Wärmeabnehmer gelieferten Wärmemenge verglichen werden. Mitberücksichtigt werden dabei Strahlungs- und Konvektionsverluste von Übergabestationen, Pumpen, Armaturen, etc. Die Differenz zwischen der jährlich ins Netz eingespeisten Wärmemenge und der gesamthaft an die Wärmeabnehmer gelieferten Wärmemenge bezogen auf die jährlich ins Netz eingespeiste Wärmemenge ergibt der jährlichen Wärmeverlust.

$$q_{v,a} = \frac{\text{jährliche Wärmeverluste Wärmeverteilung } 100\%}{\text{jährlich zugeführte Wärmemenge Wärmenetz}}$$

Berechnete Wärmeverluste

Die Wärmeverluste können anhand von Netzplänen und Daten der eingesetzten Rohrsysteme abgeschätzt werden. Im Vergleich mit der gemessenen Methode sollte die Berechnung einen tieferen Wert aufweisen, da die erwähnten Konvektions- und Strahlungsverluste in der Regel nicht mitberücksichtigt werden. Für die Berechnung des jährlichen Wärmeverlustes der Wärmeverteilung braucht es neben der Information zum spezifischen Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung nach Kapitel 7.1.3 die mittlere Betriebsmitteltemperatur $T_{B,m}$:

$$T_{B,m} = \frac{T_{VL,m} + T_{RL,m}}{2}$$

Die mittlere Betriebsmitteltemperatur $T_{B,m}$ muss bei gleicher Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Aussen-temperatur bestimmt werden. Bei konstanten Vor- und Rücklauftemperaturen entspricht die mittlere Betriebsmitteltemperatur der Betriebsmitteltemperatur nach Auslegung T_B :

$$T_B = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2}$$

Weiter muss der Temperaturunterschied zum Erdreich berücksichtigt werden. Der mittlere Temperaturunterschied in K für die erdverlegte Rohrleitung berechnet

sich aus der Differenz zwischen der mittleren Betriebsmitteltemperatur $T_{B,m}$ (oder Betriebsmitteltemperatur nach Auslegung T_B) und der mittleren Bodentemperatur T_{Bo} wie folgt:

$$\Delta T_{L,m} = T_{B,m} - T_{Bo} = \frac{T_{VL,m} + T_{RL,m}}{2} - T_{Bo}$$

Der jährliche Wärmeverlust für einen Teilstrang in kWh/a berechnet sich aus dem spezifischen Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung, dem mittleren Temperaturunterschied für die erdverlegte Rohrleitung, der Länge des Trassenabschnittes und der jährlichen Betriebszeit des Netzes wie folgt:

$$Q_{V,a,i} = \frac{\dot{q}_{V,L} \Delta T_{L,m} L}{1000} \tau_N$$

Der jährliche Wärmeverlust der Wärmeverteilung in kWh/a berechnet sich aus der Summe der Wärmeverluste der einzelnen Teilstränge:

$$Q_{V,a} = \sum Q_{V,a,i}$$

Die jährlichen Wärmeverluste werden ebenfalls auf die jährlich ins Netz eingespeiste Wärmemenge bezogen und in Prozent angegeben:

$$q_{V,a} = \frac{Q_{V,a}}{Q_{N,zu,a}} 100\%$$

7.1.5 Temperaturabfall in Funktion der Distanz

Aufgrund der Wärmeverluste in den Fernwärmeleitungen kühlt sich das Wärmeträgermedium entlang der Transportdistanz ab. Dies gilt für die Vor- wie auch für die Rücklaufleitung. Für den Fernwärmebetreiber ist der Temperaturabfall der Vorlaufleitung von besonderer Tragweite, da er eine vertraglich vereinbarte Vorlauftemperatur bei der Wärmeübergabe garantieren muss. Der Temperaturabfall von der Wärmezentrale bis zum weitest entfernten Wärmeabnehmer berechnet sich vereinfacht auf Basis der Gleichung für den Wärmestrom wie folgt:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_{pW} \Delta T$$

Somit gilt für die Temperaturdifferenz:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} c_{pW}}$$

Durch Einsetzen des Wärmeverluststroms für die Vorlaufleitung in jedem Teilstrang und Berücksichtigung des darin fließenden Massenstroms ergibt sich der Temperaturabfall in der Vorlaufleitung in diesem Teilstrang als:

$$\Delta T_A = \frac{\dot{Q}_V}{2 \dot{m} c_{pW}}$$

Eine genauere Berechnung der Abkühlung der Vorlauftemperatur in Funktion der Distanz für einen erdverlegten Teilstrang ergibt folgende Gleichung [44]:

$$T_{VL,i,1} = T_{Bo} + (T_{VL,i,0} - T_{Bo}) e^{-\frac{U_R 2 \pi r_R L}{c_{pW} \dot{m}}}$$

Die Vorlauftemperatur am Eintritt des Teilstranges $T_{VL,i,0}$ wird dabei als konstant angenommen.

Der Temperaturabfall im Teilstrang der Vorlaufleitung kann folgendermassen berechnet werden:

$$\Delta T_A = T_{VL,i,0} - T_{VL,i,1}$$

$$\Delta T_A = T_{VL,i,0} - \left[T_{Bo} + (T_{VL,i,0} - T_{Bo}) e^{-\frac{U_R 2 \pi r_R L}{c_{pW} \dot{m}}} \right]$$

Die Abkühlung des Wärmeträgers in der Vorlaufleitung für eine bestimmte Transportdistanz berechnet sich aus der Summe der einzelnen Temperaturabfälle in den zu betrachtenden Teilsträngen wie folgt:

$$\Delta T_{A,Ges} = \sum \Delta T_A$$

Die Vorlauftemperatur am Ende der betrachteten Teilstränge berechnet sich aus der Differenz zwischen der Vorlauftemperatur an der Einspeisestelle und der Abkühlung in der Vorlaufleitung für die gesamte Transportdistanz wie folgt:

$$T_{VL,1} = T_{VL,0} - \Delta T_{A,Ges}$$

7.2 Druckverlust

7.2.1 Gerade Rohrleitungen

Die Strömungsverluste in Rohrleitungsanlagen setzen sich zusammen aus den Druckverlusten der geraden Leitungsabschnitte und der Summe aus Einzelverlusten, die aus Rohrleitungseinbauten wie Krümmer, Abzweigungen, Querschnittsveränderungen, Apparaten usw. herrühren [46].

Der Druckverlust durch Rohrreibung für gerade Rohrleitungsstücke wird folgendermassen bestimmt:

$$\Delta p_V = \lambda \frac{l}{d_R} \rho_w \frac{w_m^2}{2}$$

Für den Druckverlust für Rohrleitungseinbauten gilt (siehe dazu auch Kapitel 7.2.3):

$$\Delta p_V = \zeta \rho_w \frac{w_m^2}{2}$$

Für den Zusammenhang zwischen dem Widerstandsbeiwert für Einbauten ζ und dem Rohrwiiderstandsbeiwert der Rohrströmung λ für einen Leitungsabschnitt gilt:

$$\zeta = \lambda \frac{l}{d_R}$$

Die Reynolds-Zahl Re ist wie folgt definiert:

$$Re = \frac{w_m d_R}{\nu} \quad Re > 2320 \rightarrow \text{turbulente Strömung}$$

Ab einer Reynolds-Zahl grösser als 2320 schlägt die laminare Strömung in eine turbulente um.

Anhand von gängigen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten w_m in Fernwärmeleitungen kann grundsätzlich eine turbulente Rohrströmung vorausgesetzt werden. Der Rohrwiiderstandsbeiwert der Rohrströmung λ ist somit abhängig von der dimensionslosen Reynolds-Zahl und der Rauheit des Rohres. Die Rohrrauheit k für verschiedene Rohre und Rohrwerkstoffe zeigt Tabelle 7.3. Als Richtwert für Fernwärmeleitungen wird ein Wert von ≤ 0.01 mm empfohlen [41].

Mit der Reynolds-Zahl Re , dem Innendurchmesser d_R und der Rohrrauheit k kann in einem Moody-Diagramm der Rohrwiiderstandsbeiwert der Rohrströmung λ für einen Leitungsabschnitt herausgelesen werden (Bild 7.6). Es wird empfohlen, die folgenden Gleichungen für die Bestimmung des Rohrwiiderstandsbeiwertes zu benutzen. Je weiter die laminare Unterschicht die Rohrrauheiten k , die als zusätzliche Turbulenzerzeuger wirken, abdecken, umso geringer ist der Einfluss von k auf den Rohrwiiderstandsbeiwert λ . Die laminare Unterschicht ist deshalb von grosser Bedeutung für den Turbulenzgrad und den Druckverlust. Es wird dabei zwischen drei charakteristischen Rauheitsbereichen der turbulenten Strömung unterschieden [46].

Erfahrungswerte zeigen jedoch, dass mit den in der Fernwärme üblichen Rohrdurchmessern und den maxi-

malen Strömungsgeschwindigkeiten nach [120] der Rohrwiiderstandsbeiwert λ in der Regel dem Übergangsbereich (Bereich 2) zuzuordnen ist (siehe auch Bild 7.6).

Bereich 1: Hydraulisch glatt

Die laminare Unterschicht deckt die Rohrrauheit k komplett zu. Die Rohrströmung, welche praktisch eine turbulente Grenzschicht darstellt, gleitet an der laminaren Unterschicht entlang. Die Turbulenz entsteht von selbst in der Kernströmung (Wirbelbildung) und ist somit lediglich von der Reynolds-Zahl abhängig.

Gültigkeitsbereich:

$$2320 < Re < \frac{d_R}{k} \log\left(0.1 \frac{d_R}{k}\right)$$

Näherungsformel:

$$\lambda = \frac{0.309}{\left(\log \frac{Re}{7}\right)^2}$$

Bereich 2: Übergangsbereich

Mit zunehmender Geschwindigkeit, d.h. dünnerer Unterschicht und/oder grösser werdender relativer Rohrrauheit k beginnen Rauheitsspitzen aus der laminaren Unterschicht herauszuragen. Die Turbulenz bzw. der Rohrwiiderstandsbeiwert der Rohrströmung λ hängt sowohl von k/d_R als auch von der Reynolds-Zahl ab.

Gültigkeitsbereich:

$$\frac{d_R}{k} \log\left(0.1 \frac{d_R}{k}\right) < Re < 400 \frac{d_R}{k} \log\left(3.715 \frac{d_R}{k}\right)$$

Näherungsformel:

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{15}{Re} + \frac{k}{3.715 d_R}\right)\right]^2}$$

Bereich 3: Hydraulisch rau

Bei noch grösserer Reynolds-Zahl und/oder grösserem k/d_R ragen die Rauheitsspitzen so weit aus der Unterschicht heraus, dass die Energieverluste (Druckverlust) nur durch die starken Wirbel (Turbulenzen), die von diesem Rauheitsgebirge ausgehen, verursacht werden. Der Rohrwiiderstandsbeiwert der Rohrströmung λ hängt nur von k/d_R ab.

Gültigkeitsbereich:

$$Re > 400 \frac{d_R}{k} \log\left(3.715 \frac{d_R}{k}\right)$$

Näherungsformel:

$$\lambda = \frac{0.25}{\left(\log \frac{3.715 d_R}{k}\right)^2}$$

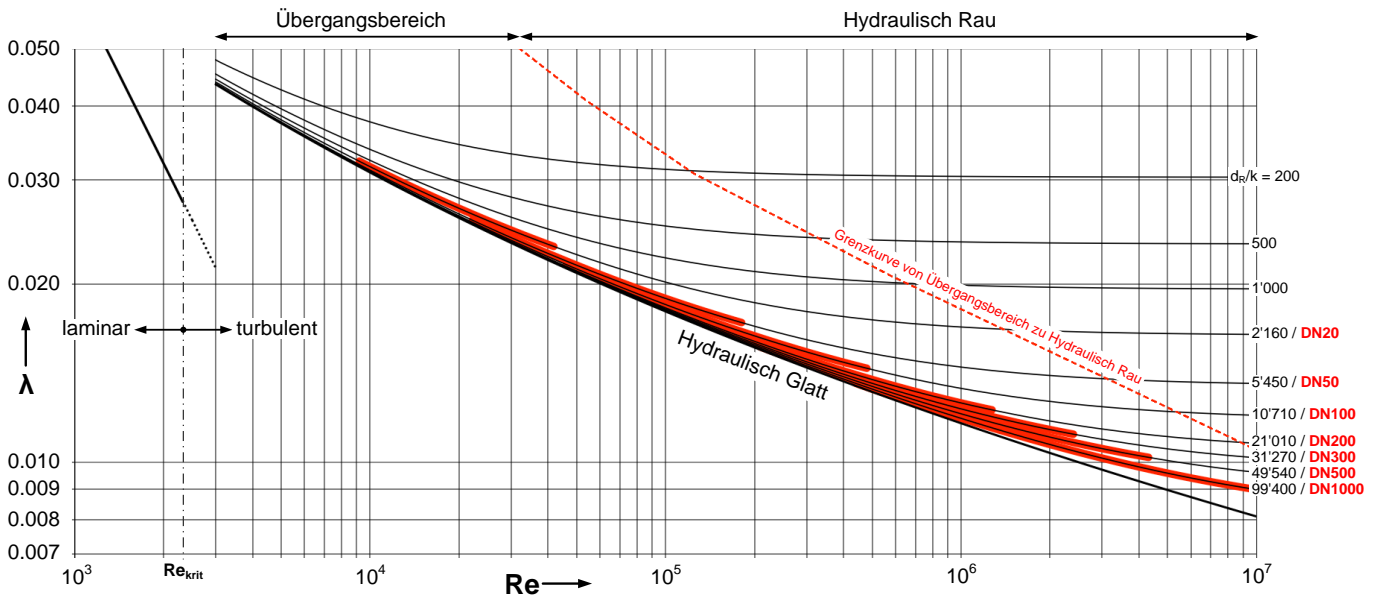


Bild 7.6 Moody-Diagramm (Colebrook-Diagramm) für den Rohrwiderstandsbeiwert der Rohrströmung λ in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re . Rot hervorgehoben sind gängige Nennweiten und der entsprechende Bereich von Rohrwiderstandsbeiwert λ und Reynoldszahl Re bei einer Rohrrauheit k von 0.01 mm und bis zu einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit gemäss [120].

Tabelle 7.3 Rohrrauheit k in mm für verschiedene Rohre und Rohrwerkstoffe [49]

Werkstoff	Art	Zustand	k-Wert
Kupfer Messing Bronze Leichtmetall Glas	gezogen oder gepresst	neu (auch Stahlrohre mit angegebenem Werkstoffüberzug)	0.0013-0.0015
Gummi	Druckschlauch	neu	0.0016
Kunststoff		neu	0.0015-0.007
Stahl	nahtlos (handelsüblich)	neu	
		- Walzhaut	0.02-0.06
		- gebeizt	0.03-0.04
		- verzinkt	0.07-0.10
	längsnahtgeschweisst	neu	
		- Walzhaut	0.04-0.10
		- bitumiert	0.01-0.05
	- galvanisiert	0.008	
nahtlos und längsnahtgeschweisst	gebraucht	- mässig verrostet bzw. leicht verkrustet	0.1-0.2
		empfohlener Richtwert für die Berechnung des Druckverlustes in Fernwärmeleitungen [41]	0.01
Gusseisen		neu	
		- mit Gusshaut	0.2-0.6
		- bitumiert	0.1-0.2
	gebraucht	0.5-1.5	
Faser-Zement		neu	0.03-0.1
Beton		neu	
		- sorgfältig geglättet	0.1-0.2
		- Glattstrich	0.3-0.8
		- mittelrau	1-2
		- rau	2-3

7.2.2 Druckverlust von Wellrohren

Der Rohr widerstandsbeiwert der Rohrströmung λ für ein Wellrohr (Bild 7.7) ist im laminaren Bereich ähnlich wie beim glatten Rohr der umgekehrt proportional zur Reynolds-Zahl. Angaben für λ -Beziehungen in turbulenten Bereichen sind in der Literatur selten zu finden. Vor allem ist die Re-Abhängigkeit nicht im gesamten technisch relevanten Bereich gesichert. Für den folgenden Gültigkeitsbereich gilt nach [45] folgender Ansatz:

Gültigkeitsbereich:

$$5 \cdot 10^4 < \text{Re} < 3 \cdot 10^5$$

$$0.2 < \frac{h}{a} < 0.6$$

$$0.0455 < \frac{h}{d} < 0.0635$$

Näherungsformel:

$$\lambda = 3400 \left(\frac{h}{d} \right)^{4.13} \left(\frac{h}{a} \right)^{230} \left(\frac{h}{d} \right)^{-0.7} \text{Re}^{0.193} e^{\left[-3300 \left(\frac{h}{d} \right)^{2.6} \frac{h}{a} \right]}$$

Einen vereinfachten Ansatz ergibt sich nach [45] für folgenden Gültigkeitsbereich:

Gültigkeitsbereich:

$$\text{Re} = 5 \cdot 10^4$$

$$0.2 < \frac{h}{a} < 1.2$$

Näherungsformel:

$$\lambda = 0.2 \left(\frac{h}{d} \right)^{0.6} \left(\frac{a}{h} \right)^{0.7}$$

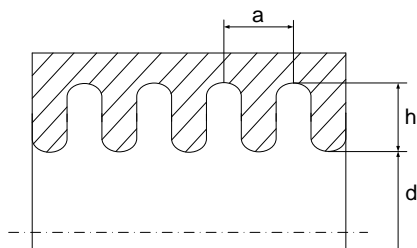


Bild 7.7 Schnitt durch ein Wellrohr mit den für die Berechnung des Rohr widerstandes notwendigen Abmessungen.

Typisch für die turbulente Strömung in Wellrohren ist das Anwachsen der Rohr widerstandsbeiwerte λ bei $\text{Re} > 4 \times 10^4$. Diese Erscheinung wird auf das Ausbilden unterschiedlicher Wirbelformen (Primär- und Sekundärwirbel) in den Wandausstülpungen zurückgeführt. Herstellungsbedingt haben die gewellten Rohre in der Regel die Form eines Gewindes. Dadurch wird dem Medium neben der Axial- zusätzlich eine Rotationsbewegung aufgeprägt. Dieser Einfluss auf das Widerstandsverhalten ist jedoch nur gering. Für den Wärmeübergang ist die Intensität der Rotation allerdings bedeutend, da sie „Totwasserzonen“ in den Rillen verhindern kann [45].

Bei identischen Reynolds-Zahlen weisen Wellrohre einen weitaus grösseren Rohr widerstandsbeiwert λ auf

(Faktor 2- bis 15-mal grösser). Damit der spezifische Druckverlust pro Trassenmeter nicht zu hoch ausfällt, müssen Wellrohre meistens um ein bis zwei Nennweiten grösser ausgelegt werden als glatte Rohre.

7.2.3 Druckverlust von Rohrleitungseinbauten

Einbauten wie Krümmer, Abzweigstücke, Ventile usw. erzeugen zusätzliche Druckverluste. Grundsätzlich ist die Rohrströmung nach Einbauten bei turbulenter Strömung auf einer Länge von 10 bis 30 d gestört, wodurch sich zusätzlich zu den Verlusten in Ventilen, Wärmeübertragern usw. in der anschliessenden Rohrleitung im Vergleich mit Rohrleitungsverlusten bei geradem Rohr weitere Druckverluste ergeben.

Im ζ -Wert von Einbauten sind alle Verluste enthalten, die sich durch den Einbau einer Armatur gegenüber den Verlusten der geraden Rohrleitung ergeben.

Auf eine Herleitung und Auflistung der unterschiedlichsten Berechnungsgleichungen für Rohrleitungseinbauten wird hier verzichtet. Zur Abschätzung empfehlen sich folgende Bücher, in denen sich zu den gängigsten Einbauten Angaben zu Verlustbeiwerten befinden: Glück [45], Wagner [49] und Böswirth [46] sowie in Englisch von Idelchik [47]. In der weiteren Planung sollten dann auch die Herstellerangaben der jeweiligen Einbauten benutzt werden.

7.3 Dimensionierung der Rohrdurchmesser

Die Dimensionierung der Rohrdurchmesser erfolgt auf Basis des spezifischen Druckverlustes pro Meter Leitungslänge. Dazu werden Richtwerte von spezifischen Druckverlusten angegeben.

Von QM Holzheizwerke [21] wird eine Auslegung auf einen mittleren spezifischen Druckabfall von 150 bis 200 Pa/m für den Schlechtpunkt empfohlen. Der Schlechtpunkt entspricht in den meisten Fällen der Fernwärmeleitung von der Wärmezentrale bis zum weitest entfernten Wärmeabnehmer im Netz.

Wegen den unstenen Nennweiten-Abstufungen der Fernwärmerohre, ist es in einem längeren Leitungsabschnitt mit sich ändernden Leitungsquerschnitten bei einer konsequenten Auslegung der einzelnen Teilstränge auf einen maximalen spezifischen Druckverlust von z.B. 200 Pa/m jedoch nicht möglich einen mittleren Druckverlust von 200 Pa/m zu erreichen. Aus diesem Grund und aufgrund von Praxiserfahrungen wird eine Auslegung der einzelnen Teilstränge auf einen maximalen spezifischen Druckabfall von 250 bis 300 Pa/m für den geplanten Endausbau bei Auslegetemperatur empfohlen. Der maximale spezifische Druckabfall wird grundsätzlich nur bei einer geringen Anzahl von Betriebsstunden erreicht, der Rest vom Jahr ist das Fernwärmenetz sozusagen „überdimensioniert“.

In Bild 1.4 werden Empfehlungen für Nenndurchmesser im Vergleich zu maximalen Strömungsgeschwindigkei-

ten mit konstanten spezifischen Druckverlusten von 100 Pa/m, 200 Pa/m und 300 Pa/m gezeigt. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten mit konstanten spezifischen Druckverlusten sind unter Annahme von Rohrreibungsbeiwerten von 0.020 für DN 20, 0.016 für DN 80 und 0.015 für DN 400 berechnet. Die Rohrreibungsbeiwerte basieren auf der Näherungsformel für den Übergangsbereich (Kapitel 7.2.1). Der Vergleich zeigt, dass die Empfehlungen nach ÖKL [120] für Haupt- und Zweigleitungen bis DN150 zu einer ähnlichen Auslegung wie die Berücksichtigung von max. Druckverlusten bei etwas weniger als 300 Pa/m führt.

Bei der Dimensionierung und Berechnung der Rohrdurchmesser werden oft hydraulische Rohrrauheiten von typischerweise 0,04 bis 0,05 mm benutzt. Nach [41] wird jedoch eine **maximale hydraulische Rohrrauheit von 0.01 mm** zur Berechnung des Druckverlustes empfohlen.

7.3.1 Empfehlungen

Zur Dimensionierung der Rohrdurchmesser gelten folgende Empfehlungen:

- hydraulische **Rohrrauheit** $k \leq 0,01$ mm
- Auslegung der **einzelnen Teilstränge** für den geplanten Endausbau bei Auslegetemperatur auf einen max. spezifischen Druckabfall von **250 bis 300 Pa/m**. Es sollte derjenige Nenndurchmesser gewählt werden, bei dem der maximale spezifische Druckabfall gerade unterschritten wird.
- Als **Kontrollgrösse** einen mittleren spezifischen Druckabfall von **150 bis 200 Pa/m** benutzen (z.B. für den Schlechtpunkt).

Bei der Dimensionierung und Beurteilung der Rohrdurchmesser müssen aber noch weitere Faktoren berücksichtigt werden, welche bei der Planung nur schwer abschätzbar sind, wie:

- Effektive Temperaturspreizung im Betrieb
- Effektiver Leistungsbedarf bei Endausbau
- Abschätzen von Ausbaureserven
- Abschätzen des Sanierungspotenzials des anzuschliessenden Gebäudeparks für den geplanten Lebenszyklus des Fernwärmenetzes zum Zeitpunkt der Planung.

Für die Rohrsysteme KMR, KMR-Duo, MMR, MMR-Duo PMR und PMR-Duo sind im Bild 13.1 Richtwerte für mögliche Übertragungsleistungen bei unterschiedlichen Temperaturspreizungen von 15 K, 30 K und 45 K bei einem spezifischen Druckverlust von 300 Pa/m und im Bild 13.2 Richtwerte für mögliche Übertragungsleistungen bei unterschiedlichen spezifischen Druckverlusten von 100 Pa/m, 200 Pa/m und 300 Pa/m bei einer Temperaturspreizung von 30 K zu finden.

Die Werte basieren auf folgenden Annahmen:

- Dichte 983 kg/m^3
- Kinematische Viskosität $4.74 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

- Wärmekapazität $4.183 \text{ kJ}/(\text{kg K})$
- hydraulische Rohrrauheit 0.01 mm

7.3.2 Vorgehen

7.3.2.1 Vorbereitung

Zuerst muss ein Leitungsplan erstellt werden, also eine schematische, nicht massstäbliche Darstellung des vollständigen Wärmenetzes. Der Leitungsplan dient als Grundlage für die Auslegung des Wärmenetzes. Die Leitungen sind gegliedert nach:

- Hauptleitung(en)
- Zweigleitungen
- Hausanschlussleitungen

Der Leitungsplan wird anschliessend in Teilstrecken aufgeteilt, wobei eine Teilstrecke jeweils den gleichen Durchfluss und Rohrdurchmesser haben muss. Im Zuge der Berechnung werden darin eingetragen:

- Nummer der Teilstrecke
- Wärmeleistung der Teilstrecke
- Durchfluss der Teilstrecke
- Länge der Teilstrecke
- Einzelwiderstände der Teilstrecke
- Rohrdurchmesser der Teilstrecke.

Unabhängig von der Berechnungsmethode wird eine Teilstrecke wie folgt berechnet:

1. Berechnung des Durchflusses aus Wärmeleistung und Temperaturdifferenz
2. Bestimmung der Länge der Teilstrecke (Vorlauf + Rücklauf)
3. Bestimmung der Summe der Einzelwiderstände in der Teilstrecke
4. Vorläufige Bestimmung des Rohrdurchmessers aufgrund der Wärmeleistung und Temperaturdifferenz anhand von Bild 13.1 und Bild 13.2.
5. Berechnung der tatsächlichen Fließgeschwindigkeit
6. Berechnung des tatsächlichen spezifischen Druckverlustes.

7.3.2.2 Auslegung in vier Schritten

Die eigentliche Auslegung des Wärmenetzes erfolgt in vier Schritten. Dabei wird eine Teilstrecke nach der anderen durchgerechnet – wenn nötig mehrmals. Weil die Auslegung des Wärmenetzes als Ganzes nur iterativ gelöst werden kann, ergibt sich folgendes Vorgehen:

1. Vorläufige Berechnung der ungünstigsten Strecke
2. Nachrechnung der ungünstigsten Strecke
3. Vorläufige Berechnung der übrigen Zweig- und Hausanschlussleitungen
4. Nachrechnung des gesamten Wärmenetzes.

Schritt 1:

Vorläufige Festlegung der ungünstigsten Strecke (in der Regel der am weitesten entfernte Wärmeabnehmer), bestehend aus,

- der ungünstigsten Hauptleitung
- der ungünstigsten Zweigleitung
- und der ungünstigsten Hausanschlussleitung.

Festlegung einer vorläufigen Druckdifferenz über dem ungünstigsten Verbraucher (für genügende Ventilautorität kann ein relativ hoher Wert notwendig sein). Vorläufige Bestimmung des Rohrdurchmessers aufgrund der Wärmeleistung und Temperaturdifferenz mit Bild 13.1 und Bild 13.2.

Für die Hauptleitung kann zunächst ein tieferer Druckverlust als für die Zweigleitung angenommen werden. Dies ergibt ein günstigeres hydraulisches Verhalten in Folge höherer Autorität der Zweigleitungen.

Falls die Summe der Zeta-Werte der Einzelwiderstände noch nicht bekannt ist, können diese in der Größenordnung von 10 % bis 20 % auf die Rohrlänge aufgerechnet werden.

Schritt 2:

Nachrechnung der Druckabfälle mit den tatsächlichen Rohrdurchmessern und den definitiven Zeta-Werten der Einzelwiderstände. Als Resultat ergeben sich die tatsächlichen Druckdifferenzen an den Abzweigstellen, die zur Auslegung der übrigen Zweigleitungen zur Verfügung stehen.

Schritt 3:

Das Vorgehen ist grundsätzlich gleich wie in Schritt 1. Im Unterschied dazu ist hier die Druckdifferenz an der Abzweigstelle vorgegeben, die in der betreffenden Zweig- und der ungünstigsten Hausanschlussleitung dieses Zweiges «aufgebraucht» werden muss.

Schritt 4:

Endgültige Festlegung der ungünstigsten Strecke. Diese könnte sich gegenüber der Annahme in Schritt 1 noch geändert haben. Nachrechnung der Druckabfälle mit den definitiven Rohrdurchmessern und Zeta-Werten der Einzelwiderstände. Wo genügend grosse Druckdifferenzen zur Verfügung stehen, können kleinere Rohrdurchmesser gewählt werden. Grundsätzlich sollten Druckabfälle eher über den Regelquerschnitten

der Regelventile und nicht in Drosselorganen abgebaut werden, da dies bessere Ventilautoritäten ergibt.

7.3.3 Berechnungsmethoden

Die Berechnung des Druckverlustes und um daraus die Dimensionierung der Rohrleitung abzuleiten, kann auf unterschiedliche Methoden erfolgen.

7.3.3.1 Von Hand

Mit Hilfe von Tabellen, Tafeln und Formularen zur Rohrnetzberechnung. Dazu werden benötigt:

- R-Wert, Durchfluss, Geschwindigkeit, Staudruck (dynamischer Druck) für unterschiedliche Rohrdurchmesser
- Zeta-Werte für unterschiedliche Bauteile

Wie in Kapitel 7.3.1 Empfehlungen erwähnt, wird die Verwendung einer hydraulischen Rohrrauheit von maximal 0,01 mm empfohlen. Da heute vorliegende Publikationen die mit einer wesentlich höheren Rohrrauheit berechnet werden, ist im Anhang 13.3 eine R-Wert-Tafel mit einer hydraulischen Rohrrauheit von max. 0,01 mm zu finden.

7.3.3.2 Berechnungsprogramme

Es gibt reine Rohrnetz-Berechnungsprogramme, die nur zur Berechnung der Druckverluste dienen, wie z.B. das im Internet frei verfügbare Kanalnetz- und Rohrnetz-Berechnungsprogramm auf EXCEL-Basis vom Zentrum für Integrale Gebäudetechnik ZIG der Hochschule Luzern - Technik & Architektur: www.hslu.ch/zig. Bei diesem Programm kann die Rohrrauheit frei vorgegeben werden.

Es gibt auch umfangreichere Berechnungsprogramme, die neben der Druckverlustberechnung auch die Ermittlung der Wärmeverluste einbeziehen und so eine Optimierung der Gesamtanlage ermöglichen. Kommerzielle Berechnungsprogramme sind zum Beispiel folgende:

- EC-Netz
- STANET
- R-Design
- ROKA GS
- SIR-3S
- Termis

Für Berechnungen ist zu beachten, dass als Voreinstellwert meistens Rohrrauheiten > 0.01 mm (ca. 0.04 bis 0.05 mm) vorgegeben sind. Der Wert jedoch meistens angepasst werden.

7.4 Pumpenauslegung

7.4.1 Pumpenkennlinie

Die Pumpenkennlinie zeigt die Förderhöhe in Funktion des Volumenstromes. Es kann zwischen flachen und steilen Pumpenkennlinien unterschieden werden (Bild 7.8). Je steiler die Pumpenkennlinie, desto grösser sind die Druckschwankungen und die Störung des hydraulischen Netzes, wenn sich der Volumenstrom ändert. Für die Regelung der Druckdifferenz ist jedoch eine steile Kennlinie von Vorteil.

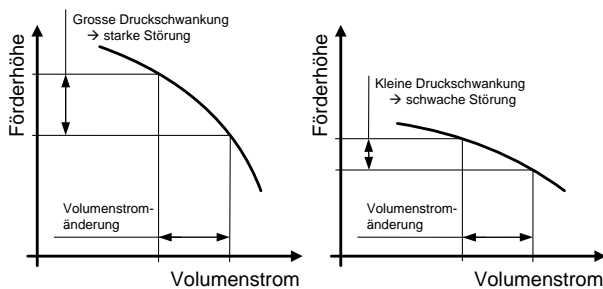


Bild 7.8 Pumpenkennlinie: Steil (links) und flach (rechts) [21].

7.4.2 Anlagenkennlinie

Die Druckverluste des Netzes steigen mit dem Volumenstrom. Diese Abhängigkeit wird in der Anlagenkennlinie dargestellt. Da sowohl die Pumpenkennlinie als auch die Anlagenkennlinie die Abhängigkeit zwischen Druck (Förderhöhe) und Volumenstrom beschreiben, lassen sich beide in das gleiche Koordinatensystem eintragen (Bild 7.9). Beide Kennlinien haben einen gemeinsamen Schnittpunkt. Dieser ist der Betriebspunkt der Pumpe. Im Betriebspunkt ist die Förderhöhe der Pumpe genauso gross wie der Druckverlust der Anlage.

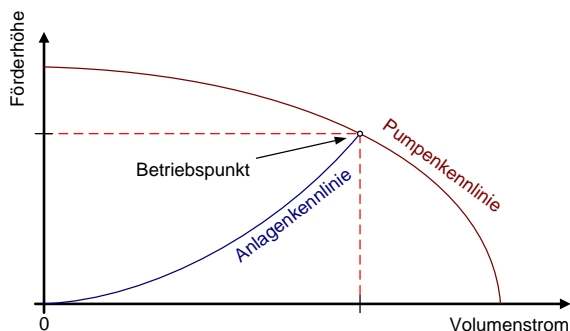


Bild 7.9 Pumpen- und Anlagenkennlinie im selben Koordinatensystem.

7.4.3 Proportionalitätsgesetze

Bei der Änderung der Drehzahl einer Umwälzpumpe verhalten sich die Förderhöhe, der Volumenstrom und die hydraulische Leistung entsprechend der folgenden drei Proportionalitätsgesetze.

Der Volumenstrom verhält sich proportional zur Drehzahl der Pumpe:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Die Förderhöhe (Druckdifferenz) verändert sich mit dem Quadrat der Drehzahl:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

Die hydraulische Pumpenleistung ändert sich mit der 3. Potenz der Drehzahl:

$$\frac{P_{hydr 1}}{P_{hydr 2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Bei halber Drehzahl sinkt also der Volumenstrom auf die Hälfte, die Förderhöhe, also der Druckabfall, sinkt auf ein Viertel und der Leistungsbedarf der Pumpe auf ein Achtel.

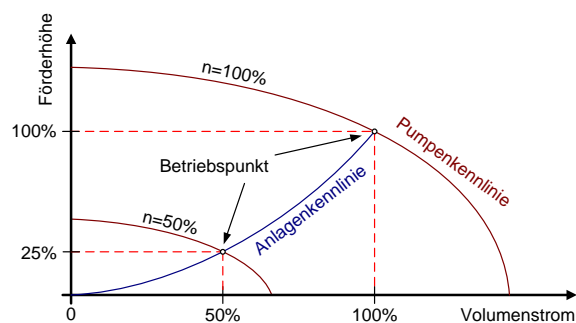


Bild 7.10 Pumpen- und Anlagenkennlinie für zwei verschiedene Drehzahlen.

7.4.4 Leistungsbedarf Pumpen

Der notwendige Volumenstrom der Fernleitungspumpe ergibt sich aus dem Durchfluss des gesamten Wärmenetzes, also dem notwendigen Durchfluss in der ersten Teilstrecke unmittelbar nach der Fernleitungspumpe. Der für die Auslegung der Pumpe relevante Volumenstrom ergibt sich aus dem aufzubringenden Wärmebedarf der Wärmeabnehmer und der zu kompensierenden Wärmeverluste im Netz am kältesten Tag im Jahr bei einer definierten Temperaturspreizung im Netz.

$$\dot{V}_P = \frac{\dot{Q}_N}{\rho_W c_{pW} \Delta T_N}$$

Die notwendige Förderhöhe der Fernleitungspumpe ergibt sich aus der Summe von:

- Druckverlust zum ungünstigsten Wärmeabnehmer (ungünstigste Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitung → Schlechtpunkt SP)
- Notwendige Druckdifferenz über dem Hausanschluss des ungünstigsten Wärmeabnehmers
- Weitere, bisher nicht berücksichtigte Druckverluste vor der Fernleitungspumpe, wie Regelventil der Vorregelung, Speicher, Anschlussleitungen usw., welche sich meistens in der Wärmezentrale befinden.

$$H_P = \frac{\Delta p_{SP} + \Delta p_{HA} + \Delta p_{WE}}{\rho_W g} = \frac{\Delta p_P}{\rho_W g}$$

Damit ist der Betriebspunkt bei Auslegebedingungen bekannt und es können Fernleitungspumpen mit geeigneten Pumpenkennlinien gesucht werden. Da der Wirkungsgrad von Pumpen (hydraulischer und elektrischer Wirkungsgrad) eine starke Abhängigkeit vom Volumenstrom aufweist, ist für die Auslegung darauf zu achten, dass die Pumpe einerseits den Volumenstrom und die Förderhöhe im Auslegepunkt erreicht und andererseits im häufigsten Betriebspunkt (in der Regel bei Teillast) einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Die Angaben zum hydraulischen Wirkungsgrad werden von den Herstellern durch Messungen auf dem Prüfstand bestimmt und wird in der Pumpenkennlinie ausgewiesen. Der höchste Wirkungsgrad liegt bei Pumpen für Fernwärmenetze in der Regel zwischen 65 % bis 85 %. Für eine Abschätzung kann ein Wirkungsgrad (hydraulisch und elektrisch) von 75 % angewendet werden.

Die Förderleistung der Pumpe kann aus dem Volumenstrom und der Förderhöhe folgendermassen berechnet werden:

$$P_P = \frac{\Delta p_P \dot{V}_P}{\eta_{hydr} \eta_{el}} = \frac{H_P \rho_W g \dot{V}_P}{\eta_{hydr} \eta_{el}} = \frac{H_P \rho_W g \dot{V}_P}{\eta_P}$$

7.4.5 Energiebedarf Pumpen

Wichtig ist, dass Pumpen mit möglichst hohem Wirkungsgrad eingesetzt werden. Im Normalfall muss deshalb der Pumpenwirkungsgrad – mindestens im Arbeitspunkt berechnet werden. Dass es sich lohnt, Pumpen miteinander zu vergleichen, zeigt Bild 7.11. Kleinere Pumpen haben tendenziell tiefere Wirkungsgrade als grössere. So erzielen Kleinpumpen auch im besten Betriebspunkt kaum über 50 %. Eine wesentliche Verbesserung, auch bei Kleinpumpen, ergibt neuerdings der Einsatz von Gleichstrom-Synchronmotoren mit Permanentmagnet-Rotor.

Der Jahresenergiebedarf der Pumpen wird bestimmt über die aufsummierten Mittelwerte der resultierenden Durchflussmengen und Förderdrücken aus der Jahresdauerlinie des Netzes. Dabei nehmen die Betriebsart der Pumpen und der pumpenspezifische Wirkungsgrad Einfluss auf den Strombedarf. Als überschlägige Näherung des Pumpenstrombedarfs genügt folgende Beziehung, in der die nominale Pumpenleistung mit den Vollbetriebsstunden der Wärmeabnehmer multipliziert wird:

$$E_P = P_P \tau_{WA}$$

Aus Erfahrung beträgt, bei einer optimalen Auslegung des Fernwärmenetzes, der jährliche Energiebedarf der Pumpen zwischen 0.5 % bis 1.0 % der verteilten Wärme.

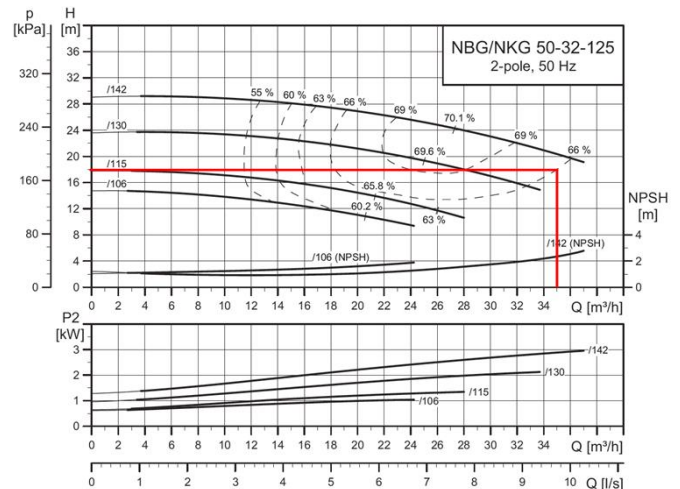
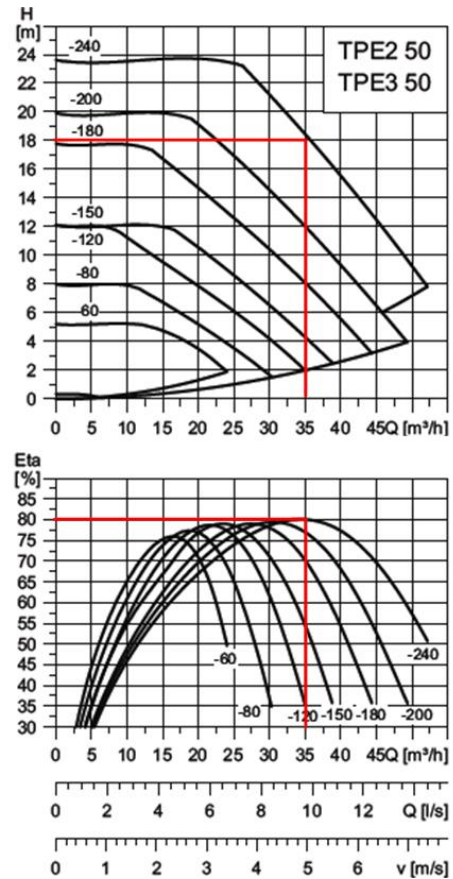


Bild 7.11 Beispiel für zwei Pumpen mit einer Förderhöhe von 18 m und einem Volumenstrom von 35 m³/h [Quelle Grundfos]. Je nach Bauart und nach Lage des Arbeitspunktes ergeben sich unterschiedliche Wirkungsgrade: 80 % (oben): Inline-Pumpe mit dem Laufrad-Durchmesser 240 mm und hocheffizientem Permanentmagnetmotor. 66 % (unten): Normpumpe mit Laufrad-Durchmesser 125 mm mit Norm-Motor IE3 (Asynchronmotor).

7.4.6 Besonderheiten Auslegung

Fernleitungspumpen sind das Herzstück von Fernwärmeanlagen. Ohne deren sichere Funktionsweise ist eine Wärmelieferung nicht möglich. In diesem Abschnitt wird auf Besonderheiten bei der Auslegung und Gestaltung von Pumpen bei Fernwärmanlagen eingegangen, um auch bei sich ändernden Betriebszuständen die Versorgung sicherstellen zu können. Bei Fernwärmenetzen wird dies deutlich bei der Inbetriebsetzung, wenn mit einer noch kleinen Anzahl von Wärmekunden der Betrieb aufgenommen wird. Oft ist hierbei bereits eine für den späteren Ausbau geplante Netzdimensionierung realisiert. Dies bedeutet, dass der Betrieb mit geringen Volumenströmen und deutlich geringeren Differenzdrücken im Netz aufgenommen wird.

7.4.6.1 Problematik Überstrom

Wie im vorangehenden Abschnitt aufgeführt, sollten Pumpen bei den typischen Betriebsfällen zwar im Be-

reich eines hohen Wirkungsgrades betrieben werden. Es sollte jedoch dem Umstand Rechnung getragen werden, dass bei einem schwach ausgelasteten bzw. einem noch nicht im geplanten Endausbau befindlichen Netz, der erforderliche Pumpendruck gering ausfällt. Hierbei kann infolge geringen hydraulischen Netzwerdstandes und bei spezifisch hohem Volumenstrom der Pumpstrom ansteigen und die Grenze des Überstromschutzes des Pumpenmotors übersteigen. Um den Pumpbetrieb robuster zu gestalten empfiehlt sich den Betriebspunkt (Anlagenkennlinie) der Pumpe in einem signifikanten Abstand zum maximalen Volumenstrom Q_{Max} zu wählen. Dadurch kann eine Grenzüberschreitung der Stromaufnahme des Motors vermieden werden. Ein geringfügig geminderter Pumpenwirkungsgrad muss ggf. hierfür in Kauf genommen werden. Die Überstromgrenze muss auch im Teillastfall berücksichtigt werden, da dem Motor mit reduzierter Drehzahl eine reduzierte Stromaufnahme möglich ist (Bild 7.12).

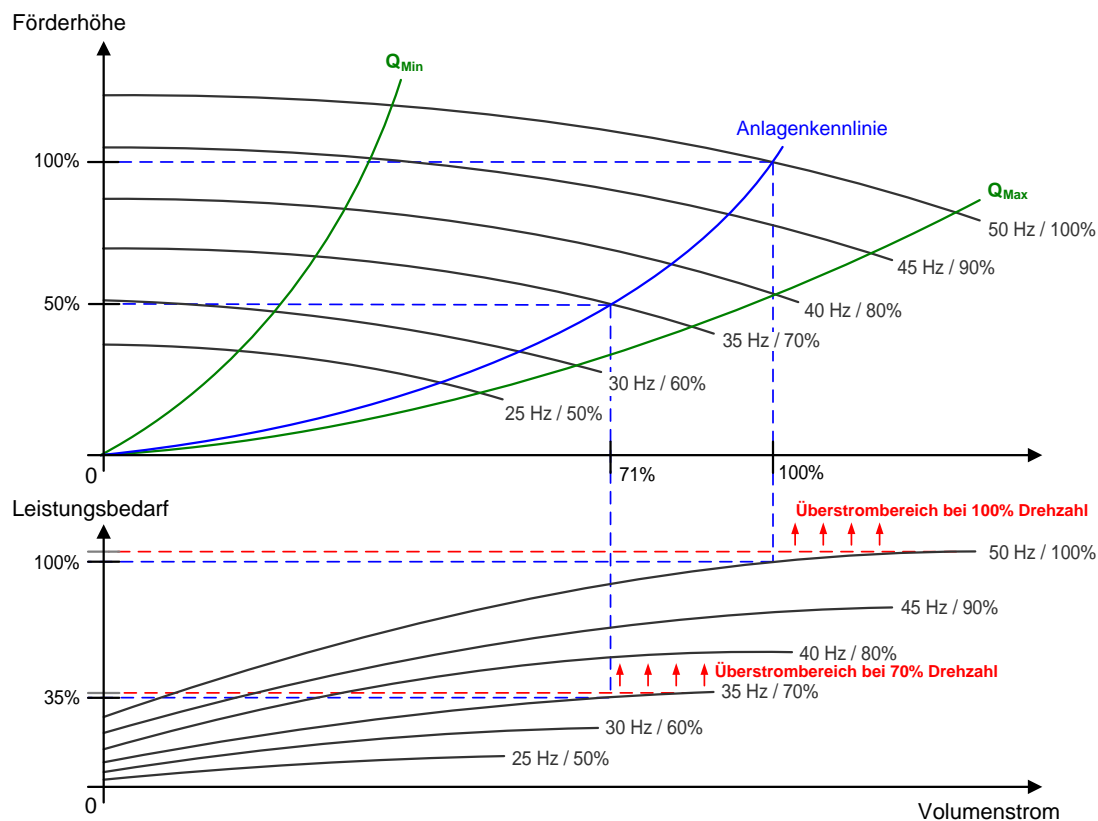


Bild 7.12 Beispielhaftes Pumpenkennlinienfeld für eine drehzahlgeregelte Pumpe. Zu sehen ist die Förderhöhe (oben) und der Leistungsbedarf (unten) in Abhängigkeit des Volumenstromes sowie die Darstellung vom maximal (Q_{Max}) und minimal (Q_{Min}) zulässigen Volumenstrom der Pumpe (oben). Weiter ist beispielhaft eine Anlagenkennlinie (Blau) und der Bereich Überstrom eingetragen.

7.4.6.2 Zulaufgeschwindigkeit

Bei Vorhandensein einer genügenden Drucküberlagerung bei Fernwärmepumpen kann Kavitation vermieden werden. Jedoch kann bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten v.a. beim Pumpenzulauf, aber auch beim Pumpenaustritt Schäden durch Kavitation und Erosion auftreten. Es empfiehlt sich daher zur Gestaltung eines robu-

sten Pumpenbetriebes, die Zulaufquerschnitte und auch die Austrittsquerschnitte so zu wählen, dass sich im normalen Betriebsfall keine besonders hohen Zulaufgeschwindigkeiten (> 3 m/sec. bei DN100) und Austrittsgeschwindigkeiten einstellen. Durch die Wahl des Zulauf- und Austrittsquerschnittes, und damit auch die konstruktive Gestaltung der Pumpen, sofern im Planungsablauf

wählbar, werden die Pumpen für allfällig hohe Volumenströme verträglicher.

7.4.6.3 Minimalvolumenstrom

Pumpenhersteller geben für die Betriebsweise der Pumpen leistungsabhängige Minimalvolumenströme Q_{Min} vor (Bild 7.12). Diese liegen bei typischen Pumpen für Fernwärme bei 25% des Maximalvolumenstromes. Der Minimalvolumenstrom dient einerseits dem Schutz der Pumpe vor Überhitzung, andererseits dient er dem Schutz der Gleitringdichtungen, die auf Schmierung und Kühlung durch das Eigenmedium angewiesen sind. Unterschreitungen des Minimalvolumenstromes sollten unter Berücksichtigung der Medientemperatur vermieden und abgesichert werden, z.B. durch einen Systembypass für den Fall geringen Netzvolumenstromes.

7.5 Rohrstatik

Dieser Abschnitt enthält Berechnungsgrundlagen, Hinweise und Auslegungsmerkmale zur Bewertung der Festigkeit und zur korrekten Auslegung von Leitungen und Leitungsbestandteilen. In die Betrachtung einbezogen sind Leitungen der Wärmeverteilung und verbindende Leitungen von Anlagen. Dargestellt sind grundlegende Zusammenhänge und Methoden zur Festigkeitsberechnung von Leitungen und zur Berechnung wärmebedingter Spannungen, sowie einige Hilfsmittel und Diagramme zur Gestaltung von Rohrhalterungen und Dehnungsausgleichen. Es wird auf Aspekte der Verlegetechnik eingegangen, um die statische Auslegung erdverlegter Leitungen bewerten zu können.

Auf eine umfassende statische Berechnung und den statischen Nachweis einer Fernwärmeleitung, insbesondere für die am häufigsten eingesetzten erdverlegten Rohrsysteme kann in diesem Planungshandbuch aus Platzgründen nicht eingegangen werden. Dafür wird explizit auf einschlägige Dokumente wie die Merkblätter von AGFW (FW 401 [100], FW 410 [101] und FW 411 [102]) oder auf Normen wie SN EN13941 [94] verwiesen.

7.5.1 Was ist Rohrstatik

Die Berechnung und Dokumentation der Rohrstatik zielt darauf ab, die Wärmeverteilungen so zu installieren, zu dämmen und zu betreiben, dass keine Beschädigungen durch Bewegungsbehinderungen über eine angemessenen lange Lebensdauer (mind. 50 Jahre bei erdverlegten, mind. 80 bei frei verlegten Systemen) auftreten. Die Verantwortung für die sachgemässe Ausführung und den regelkonformen Betrieb von Druckgeräten und damit ggf. auch Leitungen mit Fernwärmemedien liegt beim Anlagenbetreiber. Ihm obliegt es im Projektablauf bei der Errichtung einer Fernwärmeanlage den statischen Nachweis einzufordern.

Das Wissen, wie mit der Längenausdehnung der Rohre umgegangen werden muss, hat direkte Auswirkungen auf die Trassenplanung (siehe unter Kap. 4.7.2). Dabei sollte sich der Planer über folgende Fragen im Klaren sein:

- Was macht die Leitung bei Erwärmung?
- Wie kann die Längsdehnung aufgefangen werden?
- Was ist Vorspannung und was bewirkt sie?

Eine Leitung dehnt sich bei **Erwärmung** ab einem Festpunkt in beide Richtungen aus, diese Dehnung muss in irgendeiner Weise aufgefangen werden (Bild 7.13).



Bild 7.13 Schematische Darstellung der thermischen Ausdehnung.

Die Aufnahme der **Längsdehnung** erfolgt auf natürlichem Weg über Dehnschenkel (L-, Z- oder U-Bogen), bei Freileitungen können auch Kompensatoren zum Einsatz gelangen.

Mit der **Vorspannung** wird die Längenausdehnung der Rohre unter Betriebszustand reduziert. Dadurch können z.B. Dehnschenkel verkleinert werden. Unterschieden wird dabei zwischen einer thermischen und einer mechanischen (Kalt-) Vorspannung.

Die folgenden Kapitel bieten einen Einblick in die physikalischen Grundlagen sowie Lösungsansätze für die Verlegung und dienen dem Techniker, Planer und Ingenieur sich grundsätzliche rohrstatische Zusammenhänge vorstellen zu können und um einfache Fragestellungen der Rohrstatik selbst bearbeiten zu können.

Hinweis: Die Erläuterungen über die Rohrstatik beziehen sich auf die im Fernwärmeleitungsbau gebräuchlichen Stahlsorten P235TR1, P235TR2 und P235GH (St. 37.0 bzw. St. 35.8). Für PE- oder PEX-Mediumrohre gelten, trotz rund 20-fachem Wärmeausdehnungskoeffizient, völlig andere Voraussetzungen und werden am Ende des Kapitels behandelt.

7.5.1.1 Druckfestigkeit und Wandstärke

Der folgende Abschnitt widmet sich der vereinfachten Berechnung der alleine durch den Druck in Behältern oder Rohren auftretenden Spannungen und die daraus resultierenden erforderlichen Wandstärken. Diese vereinfachte Berechnung ermöglicht bereits eine Bewertung oder Ermittlung von Spannungen und Wandstärken mit meist verlässlichen Ergebnissen für die Projektierung bzw. grobe Auslegung eines Behälters oder Rohres.

Die Berechnung der Druckfestigkeit und der Wandstärken von zylindrischen Behältern und Rohren erfolgt über die Betrachtung des mehrachsigen Spannungszustandes. Dieser besteht im Falle einer Zylinderform aus der Überlagerung von Längs-, Umfangs-, und Radial- bzw. Innendruckspannungen. Hergeleitet aus Festigkeitshypothesen erfolgt die Berechnung von Vergleichsspannungen in vereinfachter Form. Damit wird die Berechnung eines komplexen Spannungszustandes auf leicht anwendbare Beziehungen reduziert.

Die Festigkeitsberechnung erfolgt dabei nach dem Schema welches in Bild 7.14 abgebildet ist. Der linke Ast kann unter dem Begriff Beanspruchungsermittlung zusammengefasst werden, während der rechte Ast die Tragfähigkeitsermittlung zur Aufgabe hat. Die Verknüpfung beider Randbedingungen erfolgt unter der Forderung, dass die Beanspruchung im Bauteil die Tragfähigkeit des Werkstoffes nicht überschreitet [50].

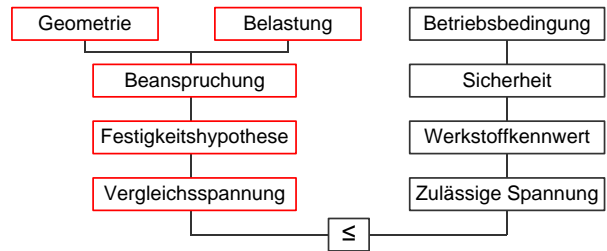


Bild 7.14 Berechnungsschema für die Festigkeitsberechnung nach [50]. Links: Beanspruchungsermittlung; Rechts: Tragfähigkeitsermittlung

Die Festigkeitsbedingung ist gemäss Bild 7.14 durch den Vergleich der Vergleichsspannung σ_v nach der Schubspannungshypothese (SH) mit der zulässigen Beanspruchung σ_{zul} im Bauteil durch folgende Gleichung gegeben:

$$\sigma_v(SH) \leq \sigma_{zul}$$

Die Vergleichsspannung σ_v nach der Schubspannungshypothese (SH) für Rohre und zylindrische Behälter, auch Kesselformel genannt, ist gegeben durch:

$$\sigma_v = \frac{p d_m}{2 s}$$

Die zulässige Beanspruchung muss gewährleisten, dass die errechnete Spannung mit einer genügenden Sicherheit S unter dem entsprechenden Festigkeitskennwert des Werkstoffes (R_e, R_m) bleibt.

$$\sigma_{zul} = \frac{R_e}{S_e} = \frac{R_m}{S_m}$$

Übliche Sicherheitsfaktoren liegen bei:

- $S_e = 1.5$
- $S_m = 2.4$

Die Wandstärke s kann durch Umstellung der Kesselformel folgendermassen berechnet werden:

$$s = \frac{p d_m}{2 \sigma_v}$$

Die rechnerische Rohrwandstärke s_v kann auch nach Tabelle 7.4 berechnet werden.

Bei der Ermittlung der Bestellwandstärke sind die Fertigungstoleranzen und die durch Korrosion hervorgerufene Abnutzung durch entsprechende Zuschläge (c_1, c_2) zu berücksichtigen.

Die aufzuführende Mindestwandstärke s beträgt somit:

$$s = s_v + c_1 + c_2$$

Die Bestellwandstärke s_e ergibt sich damit zu:

$$s_e \geq s$$

In [50] (8. Auflage 2012, Seite 33ff) sind vertiefte Angaben zur Berechnung und weitere Informationen bezüglich der Sicherheitszuschläge etc. nachzuschlagen.

Tabelle 7.4 Gleichungen zur Berechnung der Rohr- bzw. Zylinderwandstärke s_v unter Innendruck ohne Zuschläge und Toleranzen bei vorwiegend ruhender Beanspruchung (nach [50]).

Berechnungsvorschrift	Anwendungsgrenzen	Werkstoffbeanspruchung u. Vergleichsspannung	Berechnungsgleichungen mit	
			Aussendurchmesser	Innendurchmesser
SN EN 13480-3 [93]	$d_a/d_i \leq 1.7$	vollplastisch Schubspannungshypothese (Mittelspannung)	$s_v = \frac{d_a p}{2 \sigma_{zul} v_N + p}$	$s_v = \frac{d_i p}{2 \sigma_{zul} v_N - p}$
	$d_a/d_i > 1.7$	Lame-Gleichung	$s_v = \frac{d_a}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_{zul} v_N - p}{\sigma_{zul} v_N + p}} \right)$	$s_v = \frac{d_i}{2} \left(\sqrt{\frac{\sigma_{zul} v_N + p}{\sigma_{zul} v_N - p}} - 1 \right)$
AD2000 [119]	$d_a/d_i \leq 1.2$ (für $d_a \leq 200$ mm $d_a/d_i \leq 1.7$)	vollplastisch Schubspannungshypothese (Mittelspannung)	$s_v = \frac{d_a p}{2 \sigma_{zul} v_N + p}$	$s_v = \frac{d_i p}{2 \sigma_{zul} v_N - p}$
	$1.2 \leq d_a/d_i \leq 1.5$	elastisch GE-Hypothese (Spitzenspannung)	$s_v = \frac{d_a p}{2.3 \sigma_{zul} - p}$	$s_v = \frac{d_i p}{2.3 \sigma_{zul} - 3 p}$

v_N = Schweissnahtwertigkeit (bei nahtlosen Rohren =1, bei Schweissnähten je nach Ausführung 0.7-1)

Das Ergebnis einer berechneten Spannung einer Rohr- oder Zylinderwand gilt nur unter Berücksichtigung des Druckes als Ursache für Materialspannungen und unter Voraussetzung der Berücksichtigung der zulässigen Spannungen (σ_{zul}) des jeweiligen Werkstoffes. Diese zulässigen Spannungen sind abhängig u.a. von der minimalen und maximalen Betriebstemperatur und von der Wandstärke. So verkleinert sich die zulässige Spannung in metallischen Werkstoffen mit gegenüber Umgebungstemperaturen zunehmenden Temperaturen und mit zunehmenden Wandstärken. Ein typischer Rohrleitungswerkstoff P235GH (Werkstoffnummer 1.0345, frühere Bezeichnung St35.8 oder auch Kesselblech HII), hat eine zul. Spannung bei Raumtemperatur von 235 N/mm² bei Wandstärken < 16 mm. Bei Wandstärken von 40 bis 60 mm liegt die zulässige Spannung bei Raumtemperatur bei lediglich 215 N/mm². Bei einer Temperatur von 100°C beträgt die zul. Spannung noch bei 198 N/mm² und bei 200°C noch 170 N/mm².

7.5.1.2 Biegespannung bei Rohren

Die Berechnung der Biegespannung σ_B bei Rohren erfolgt durch folgenden Zusammenhang:

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_B}$$

Das Biegemoment M_B muss je nach Belastungsfall individuell beurteilt und berechnet werden. Das Widerstandsmoment W_B für eine Hohlwelle bzw. Rohr berechnet sich folgendermassen:

$$W_B = \frac{\pi (d_a^4 - d_i^4)}{32 d_a}$$

7.5.1.3 Wärmedehnung und Wärmespannung

Ein einseitig fixiertes Bauteil Bild 7.15 dehnt sich bei Erwärmung von der Anfangstemperatur T_0 auf die Endtemperatur T_1 um den Betrag ΔL .

$$\Delta L = L \alpha_L \Delta T$$

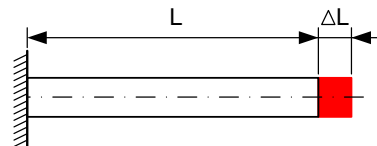


Bild 7.15 Längendehnung eines einseitig eingespannten Bauteils (nach [50]).

Wird die Wärmedehnung behindert, entstehen Spannungen (Bild 7.16). Ursache der Behinderung kann eine fixe Einspannung, unterschiedliche Temperaturen an verschiedenen Orten im Bauteil oder ungleichmässige Ausdehnungskoeffizienten im Bauteil sein.

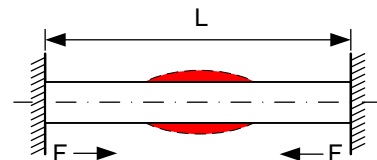


Bild 7.16 Längendehnung eines beidseitig eingespannten Bauteils (nach [50]).

Die Stauchung oder Dehnung ist definiert als:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Die Spannung im Bereich des Hookschen-Gesetzes (elastischer Bereich) ist proportional zu den Dehnungen bzw. Stauchungen. Es ergibt sich mit dem Proportionalitätsfaktor E (E-Modul) folgender Zusammenhang:

$$\sigma = \varepsilon E$$

Die maximal zulässigen Werte der Spannung ergeben sich aus dem eingesetzten Material des Bauteils und der im Einsatz herrschenden Temperaturen. Die im Einsatz erzeugte Spannung bei maximaler Temperaturdifferenz darf die maximal zulässige Spannung nicht überschreiten.

$$\sigma_T < \sigma_{zul}$$

Die Spannung bei maximaler Temperaturdifferenz ergibt sich aus:

$$\sigma_T = \varepsilon E = \frac{\Delta L}{L} E = E \alpha_L \Delta T$$

Die maximale Temperaturdifferenz ist dabei:

$$\Delta T_{zul} = \frac{\sigma_{zul}}{E \alpha_L}$$

Tabelle 7.5 Längenausdehnungskoeffizient α_L und E-Modul E einiger Werkstoffe.

Material	Längenausdehnungskoeffizient 10 ⁻⁶ / K	E-Modul 10 ³ N/mm ²
Stahl unlegiert	12.0	210
Stahl hochlegiert	10.0 (ferritisch), 16.7 (austenitisch)	200
Kupfer	16.5	100-130
Aluminium	23.0	70
Grauguss	9.0	90-145

7.5.1.4 Überlagerung von Spannungen

Für eine rohrstatische Auslegung und einen statischen Nachweis müssen alle einwirkenden Spannungen und deren Überlagerungen in die Berechnung mit einbezogen werden. Es genügt also nicht, eine Rohrwand oder Behälterwand einzig auf die Festigkeit bedingt durch den Druck auszulegen, sondern es müssen alle überlagerten Spannungen aus Biegung, Torsion, Knickung, Wärme und deren wechselseitigen Wirkungen in den statischen Nachweis integriert werden. Für die Berechnung und Bewertung weiterer Spannungsarten wie z.B. Knick-, Torsions-, Abscher- und Wärmespannungen wird z.B. auf [50] verwiesen.

Zu den ermittelten Spannungen unter Grenzlastbedingungen kommt für eine Bewertung der Statik die zeitliche Verteilung der Belastung hinzu. Die Belastung eines Bauteiles (Rohres) kann **statisch (ruhend)** oder **dynamisch (wechselnd)** sein. Ein Werkstoff weist gewöhnlich bei dauerhaft gleichbleibender statischer Belastung (z.B. gleichbleibender Innendruck in einem Behälter) eine höhere Dauerfestigkeit auf, als bei wechselnder Belastung (Druckschwankungen) und bei schwingender Belastung (Wechsel Zugspannung – Druckspannung). Eine hohe Lastwechselzahl führt zur Festigkeitsminderung.

Gerade bei Fernwärmleitungen und -anlagen muss durch Temperaturschwankungen mit entsprechenden **Lastwechselzahlen** gerechnet werden. Als ein Lastwechsel versteht sich dabei ein Aufheiz/-Abkühlvorgang im Temperaturbereich zwischen minimaler und maximaler Betriebstemperatur. Für die statische Berechnung einer Fernwärmeleitung muss als Berechnungsgrundlage die Lastwechselzahl mit einbezogen werden. So haben Fernleitungen, die saisonal ausser Betrieb genommen werden wesentlich höhere Lastwechselzahlen als Leitungen, die nur geringe leistungsbedingte Temperaturschwankungen aufweisen.

7.5.1.5 Statischer Nachweis

In die Betrachtung für den statischen Nachweis werden alle sich überlagernden mechanischen Beanspruchungen mit einbezogen. Daher kann sich ein statischer Nachweis sehr aufwändig gestalten. Berechnungsprogramme wie z.B. SIS-KMR, ROHR2, CAESAR, AUTO-PIPE, EASYPIPE ermöglichen je nach Anwendungszweck einen umfänglichen statischen Nachweis. Wegen der Komplexität und der erforderlichen Qualität rohrstatischer Berechnungen ist eine umfängliche Anwendungspraxis zur zielgerichteten Bearbeitung hilfreich. Somit wird der statische Nachweis häufig durch Institutionen und Personen erbracht, welche die entsprechenden Kenntnisse und Erfahrungen in Festigkeitslehre und Statik mitbringen.

Das Ergebnis der statischen Berechnungen für Rohrleitungen beinhaltet folgende Punkte:

- Definition des betrachteten Rohrleitungsabschnittes
- Bezugnahme auf die Eignung des gewählten Werkstoffes.
- Nachweis der Einhaltung werkstoffbedingter Spannungsgrenzwerte für den betrachteten Rohrleitungsabschnitt im Rahmen der betrieblichen Temperaturen.
- Nachweis Grenzwerteinhaltung unter Berücksichtigung der voraussichtlichen Lastwechselzahlen
- Nachweis der Statik der Leitungshalterung
- Angabe der dreiachsigen Spannungen und Momente für alle Elemente des betrachteten Rohrabschnittes.
- Statischer Nachweis der Rohrleitungshalterung (Festpunkte, Loslager).

Bei erdverlegten Kunststoffverbundmantelrohre (KMR) kommen folgende Punkte hinzu (siehe auch 7.5.3):

- Belastung des Dämmmaterials (PUR-Schaum) und der PE-Ummantelung.
- Eignung und Dimensionierung der Kompensationselemente wie Dehnpolster.

Aus den Ergebnissen der statischen Berechnungen können sich bei Grenzwertverletzungen folgende Massnahmen ergeben:

- Wandstärken der Rohrelemente, Bögen, T-Stücke, Anbohrungen anpassen.
- Überbelastung eines Rohrelementes durch Anpassung der geometrische Anordnung entschärfen.

- Positionierung von Festpunkten und anderen Haltepunkten anpassen.

Nach Korrektur der Gestaltung und Auslegung des Rohrleitungsabschnittes und nach erneuter Überprüfung der Statik in korrigierter Anordnung kann nach Bereinigung aller Grenzwertverletzungen die statische Eignung des Rohrabschnittes nachgewiesen werden.

7.5.2 Verlegetechnik und Auslegung

7.5.2.1 Dehnungsaufnahme

Ein natürlicher Rohrdehnungsausgleich wird gewöhnlich einer Kompensation der Wärmedehnung durch Kompensatoren vorgezogen, vor allem wenn die Trassenführung ohnehin eine Geometrie aufweist, die einen natürlichen Dehnungsausgleich ermöglicht. Wichtig ist, dass die Rohre nach der Inbetriebnahme, also nach der Längenausdehnung, möglichst spannungsarm verlegt bzw. montiert sind.

Bei erd- wie auch bei freiverlegten Rohren wird durch Richtungswechsel der Rohrleitungen ein natürlicher Dehnungsausgleich ermöglicht. Die dabei entstehenden Dehnschenkel erleichtern die elastische Verbiegung des Rohres, womit die Längenänderungen auf natürliche Weise kompensiert werden. Dehnschenkel bzw. Dehnungsausgleicher werden als Winkelbogen (L-

Bogen), doppelter Winkelbogen (Z-Bogen) und U-Bogen realisiert (Bild 7.18). Auf die spezifischen Gegebenheiten für erdverlegte Rohre (KMR) wird in Kapitel 7.5.3, für frei verlegte Rohre in Kapitel 7.5.4 und für Kunststoffmedienrohre (PMR) in Kapitel 7.5.5 eingegangen.

Die Winkellage der Dehnschenkel im Dehnungsbogen hat einen zusätzlichen Einfluss auf den Dehnbereich, der durch Dehnungspolster aufgenommen bzw. kompensiert werden muss (Bild 7.17). Nach Möglichkeit sind die Bögen rechtwinklig auszuführen, da mit 90°-Bögen die Dehnung am besten aufgenommen werden kann. Bei Bögen mit einem stumpfen Winkel (> 90°) vergrößert sich der Dehnbereich im Vergleich mit einem 90°-Bogen. Bögen mit einem spitzen Winkel (< 90°) sind generell nicht zu empfehlen.

Mit einer Thermischen-Vorspannung wird die Auswirkung der Dehnung entschärft. Bei Hochtemperatur-Systemen ist es fast unerlässlich die Leitungen vorzuspannen. Näheres zur Technik der Vorspannung wird in den Kapiteln 7.5.3 und 7.5.4 beschrieben.

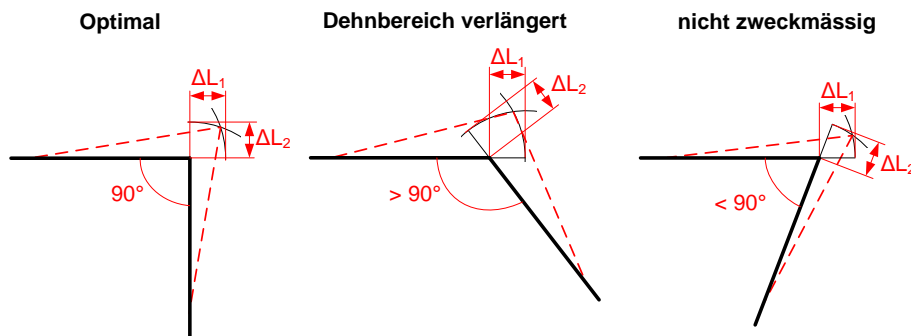


Bild 7.17 Beispielhafte Darstellung der Winkellage bei einem L-Bogen. Die thermisch bedingten Ausdehnungen ΔL ($\Delta L_1 = \Delta L_2$) sind bei den drei Fällen identisch.

7.5.2.2 Rohrstatische Auslegungstemperatur

Massgebend für die Berechnung der Rohrstatik ist immer die rohrstatische Auslegungstemperatur ΔT_{RS} . Diese lässt sich aus der Auslegungstemperatur T_{Aus} und der Verlegetemperatur T_{Ver} folgendermassen berechnen:

$$\Delta T_{RS} = T_{Aus} - T_{Ver}$$

Für erdverlegte Rohrsysteme wird bei einer maximalen Betriebstemperatur unter 100°C eine Auslegungstemperatur T_{Aus} von 110°C empfohlen. Bei einer maximalen Betriebstemperatur über 100°C wird eine Auslegungstemperatur T_{Aus} von 130°C, jedoch mindestens 10°C über der Betriebstemperatur empfohlen.

Für frei verlegte Rohrsysteme wird eine Auslegungstemperatur in Abhängigkeit der Betriebstemperatur empfo-

len. Die Auslegungstemperatur T_{Aus} beträgt dabei 10°C mehr als die maximale Betriebstemperatur.

Für die Verlegetemperatur bzw. die Aussentemperatur bei der Verlegung der Rohre können folgende Werte angenommen werden:

- Erdverlegt: Sommer: 20°C
Frühling/Herbst: 10°C
Winter: 0°C
- Freileitungen in Kellern, Einstellhallen und Gebäuden: generell 20°C

Anmerkung: Es wird nicht zwischen der Vorlauf- und Rücklaufstemperatur unterschieden! Der Rücklauf wird bei der statischen Betrachtung gleich wie der Vorlauf behandelt.

7.5.3 Erdverlegte Rohre (KMR)

Aufgrund der bewährten Technik und langen Lebensdauer sind Kunststoffverbundmantelrohre (KMR) das am meisten eingesetzte Rohrsystem bei erdverlegten Fernwärmeleitungen.

Wie oben bereits erwähnt, wird durch Richtungswechsel der Rohrleitungen ein natürlicher Dehnungsausgleich mittels Winkelbogen (L-Bogen), doppelter Winkelbogen (Z-Bogen) und U-Bogen realisiert. Angenommen die Ausladelänge L_A (Schenkellänge) von den in Bild 7.18 dargestellten Arten der Dehnungsausgleichung sei bei allen drei Typen identisch, so zeigt der L-Bogen die kleinste und der U-Bogen die grösste Flexibilität zur Dehnungsaufnahme.

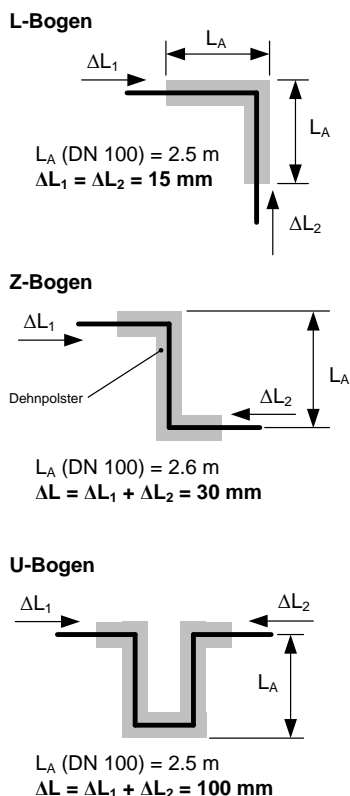


Bild 7.18 Beispielhafter Vergleich der maximal möglichen Dehnungsaufnahme bei identischen Ausladelängen L_A (Schenkellängen) gemäss Brugg Pipesystems (Premant DN 100).

Beispielhaft zeigt dies die Verlegung einer KMR-Leitung DN 100 gemäss Brugg Pipesystems (Premant DN 100): Bei einer identischen Ausladelänge L_A von 2.4 m bzw. 2.5 m beträgt die maximal kompensierbare Rohrausdehnung ΔL bei der Verlegung eines L-Bogens (ohne Fixpunkte) rund 15 mm, bei einem Z-Bogen lassen sich insgesamt 30 mm kompensieren ($\Delta L_1 + \Delta L_2$) und bei einem U-Bogen lassen sich insgesamt 100 mm kompensieren ($\Delta L_1 + \Delta L_2$). Damit zeigt ein U-Bogen zur Dehnungskompensation bei KMR-Leitungen die höchste Flexibilität.

Für die Beurteilung der Dehnschenkel und notwendigen Dehnpolsterlängen wird auf die im AGFW-Arbeitsblatt

FW 401 [100] erstellten Ausführungen und Diagramme (Teil 10 und 11) sowie auf die herstellereigenen Angaben verwiesen.

Weiter zu beachten ist, dass bei KMR das Mediumrohr, das Dämmmaterial und das Mantelrohr eine fest miteinander verbundene Einheit bilden, das heisst, die Rohre dehnen sich als Ganzes. Dies hat zur Folge, dass durch den Erddruck (Überdeckung), der über den Rohren lastet, die **Dehnung behindert** wird. Die Behinderung der Dehnung führt zu einer Druckspannung der Stahlrohre, welche die zulässige Spannung von 190 N/mm² nicht überschreiten darf. Um dies zu gewährleisten, werden Verlegungsmethoden wie die Kaltverlegung Methode 1, Kaltverlegung Methode 2 oder Verlegung mit thermischer Vorspannung angewandt (Übersicht in Tabelle 7.6).

Tabelle 7.6 Übersicht, Vor- und Nachteile der Verlegung von erdverlegten KMR.

Verlegung	Vorteil	Nachteil	
Kaltverlegung Methode 1	Kaltverlegung	geringe Axialspannungen aus Wärmedehnung Rohrgraben kann sofort verfüllt werden	maximale zulässige Betriebstemperatur $\leq 85^\circ\text{C}$
	Konventionell	maximal zulässige Axialspannung wird nicht überschritten Rohrgraben kann sofort wieder verfüllt werden	zul. Verlegelänge ist durch die Anordnung der notwendigen Dehnschenkel (L, Z, U) einzuhalten
Kaltverlegung Methode 2	Betr. Selbstvorspannung	Rohrgraben kann sofort verfüllt werden Einsparung von Dehnungsschenkeln eventuell auch im Gleitbereich möglich	extrem grosse Dehnungsbewegungen Ausknickgefahr Axialspannungen übersteigen die Streckgrenze des Materials Nachtägliche Anbohrar-zweige nicht möglich
Therm. Vorspannung		Begrenzung der Axialspannung beliebige Verlegelänge Geringe Axiale Dehnung Einsparung von Dehnungsschenkel	Rohrgraben muss bis zur Fertigstellung der Vorspannung offen gehalten werden Je nach Methode ist ein regulierbares Betriebsmedium oder ein 380 V

7.5.3.1 Kaltverlegung Methode 1

Mit dieser Methode wird die von den Herstellern vorgegebene maximale Verlegelänge nicht überschritten. Spätestens bei Erreichen dieser Länge wird ein Dehnungsbogen installiert, um die Dehnungen aufzunehmen. Etwa in der Mitte zwischen zwei Bogen entsteht somit ein natürlicher Festpunkt (NFP), ab welchem sich die Leitungen in beide Richtungen ausdehnen (Bild 7.19). Die maximale Verlegelänge ist abhängig von der Auslegungstemperatur, der Rohrdimension sowie der Überdeckung.

Hinweis: Bei einer maximalen Betriebstemperatur von 85°C wird die zulässige Spannung von 190 N/mm² nie

erreicht. Infolgedessen entfällt eine Beschränkung der Verlegelänge. Allerdings darf die statische Auslegung auch nicht höher als 85°C sein.

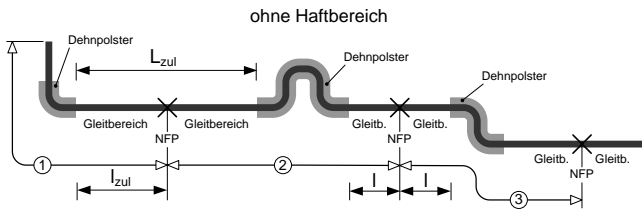


Bild 7.19 Beispiel Trasse mit natürlichen Festpunkten (NFP) und Dehnpolster an Kompensationselementen nach AGFW-Merkblatt FW 401 [100] Teil 10.

Die Kaltverlegung Methode 1 hat den Nachteil, dass relativ viele Formstücke in Form von Bögen verbaut werden müssen, was die Verlegung teurer macht. Andererseits sind Gehrungsnähte (3°-Knicke) und der nachträgliche Einbau von T-Stücken sowie Anbohrungen statisch unbedenklich.

Anwendung: z.B. Gebiete mit vielen Gefälls- oder Richtungswechseln, Erschliessungsleitungen (Zweigleitungen), Hausanschlüsse.

7.5.3.2 Kaltverlegung Methode 2

Hier handelt es sich um eine Kaltverlegung ohne Berücksichtigung von den Herstellern vorgegebenen maximalen Verlegelängen. Das Verfahren wird auch als ‚Betriebliche Selbstvorspannung‘ bezeichnet. Mit der Inbetriebnahme wird die zulässige Streckgrenze von 235 N/mm² überschritten und die Rohre werden plastisch gestaucht. Dies hat einerseits zur Folge, dass grosse Dehnschenkel und Dehnpolsterstärken benötigt werden. Andererseits müssen die T-Abgänge verstärkt ausgeführt werden und Gehrungsnähte (3°-Knicke) sowie der nachträgliche Einbau von T-Stücken sowie Anbohrungen sind unzulässig.

Den oben erwähnten Nachteilen steht eine kostengünstigere Verlegung im Vergleich zur Kaltverlegung Methode 1 gegenüber.

Anwendung: z.B. Transportleitungen ausserhalb Siedlungsbereich, Gebiete mit «endgültigen» Strukturen (z.B. grosse Überbauungen, Genossenschaftssiedlungen), Hausanschlüsse, etc.

7.5.3.3 Thermische Vorspannung

Werden die Leitungen einer thermischen Vorspannung unterzogen, entfällt eine Beschränkung der Verlegelänge. Die zulässige Spannung wird nicht überschritten. In der Regel wird die fertig verlegte Leitung auf die Vorspanntemperatur T_{Vor} erwärmt. Die Vorspanntemperatur T_{Vor} entspricht der Verlegetemperatur T_{Ver} abzüglich der Hälfte der rohrstatischen Auslegungstemperatur ΔT_{RS} und berechnet sich wie folgt:

$$T_{Vor} = T_{Ver} + \frac{\Delta T_{RS}}{2} = T_{Ver} + \frac{T_{Aus} - T_{Ver}}{2} = \frac{T_{Aus} + T_{Ver}}{2}$$

Sobald die Leitung erwärmt ist und sich somit ausgedehnt hat, wird die Leitung eingesandt und der Graben verfüllt. Erst nach der Grabenverfüllung darf die Leitung wieder abgekühlt werden. Der Gleitbereich der Rohre ist relativ kurz und folglich auch die Dehnschenkel- und Dehnpolsterlängen (Bild 7.20).

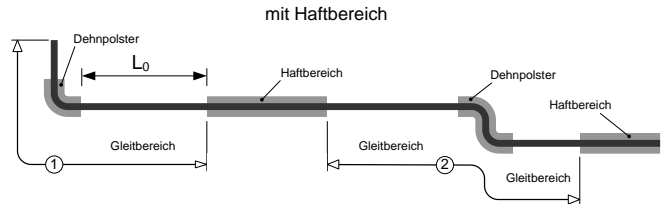


Bild 7.20 Beispiel Trasse mit Gleit- und Haftbereich und Dehnpolstern an Kompensationsbereichen nach AGFW-Merkblatt FW 401 [100] Teil 10.

Die thermische Vorspannung erfordert lange Bauetappen (> 100 m) und wirkt sich somit auf die Bauzeit aus. Gegenüber der Kaltverlegung ist der Leitungsbau aber kostengünstiger. Gehrungsnähte (3°-Knicke) und nachträgliche T-Stücke und Anbohrungen sind statisch unproblematisch.

Anwendung: z.B. Transportleitungen, Siedlungsgebiete mit wenigen Gefälls- oder Richtungswechseln, Erschliessungsleitungen.

7.5.3.4 Doppelrohre, Mehrfachrohre

Bei vorgefertigten und vorisolierten Mehrfachrohren oder Doppelrohren sind die Medienrohre an Bogen- und Endstellen miteinander fest verbunden. Dazwischen werden statisch nicht bedeutende Abstandhalter zwischen den Medienrohren eingesetzt. Aus rohrstatischen Gründen hat dies zur Folge, dass die maximale Temperaturspreizung zwischen den einzelnen Medienrohren auf maximal 100 K begrenzt ist. Insbesondere beim Hochfahren aus ausgekühlten Anlagen muss diese maximale Temperaturspreizung berücksichtigt werden.

7.5.4 Frei verlegte Rohre

Frei verlegte Rohre bezeichnen Leitungen in Kellern, Einstellhallen Energieleitungstunneln (ELT), Freileitungen im Gelände, aber auch erdverlegte Leitungen in Betonkanälen. Zudem sind auch die unter Kapitel 4.3.1.5 beschriebenen Stahlmantelrohre statisch gesehen ebenfalls frei verlegt.

Im Gegensatz zu den erdverlegten Systemen werden frei verlegte Leitungen in ihrer Längendehnung nur marginal durch Reibungsverluste der Rohrlager behindert. Die Ausdehnung ΔL kann theoretisch beliebig gross sein, wenn die entsprechenden Massnahmen zur Dehnungsaufnahme vorhanden sind. Allerdings werden diese Massnahmen bei Dimensionen ab DN 100 sowie bei hohen Temperaturen zunehmend schwieriger zu handhaben. Zu beachten ist auch, dass sich die Leitungen in

alle Richtungen bewegen können. Im Folgenden werden Möglichkeiten aufgezeigt die Dehnungen aufzufangen.

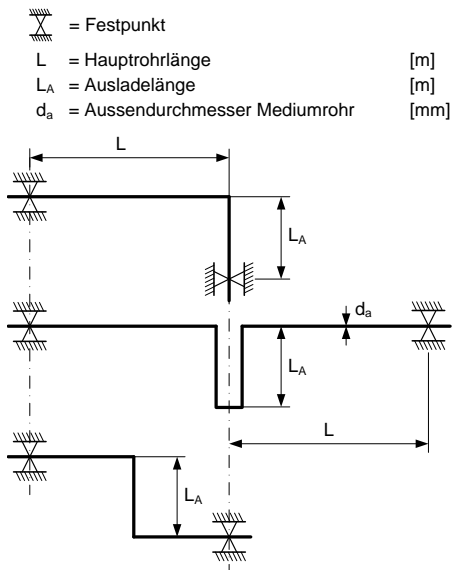


Bild 7.21 Typische Formen von Dehnschenkeln freiverlegter Rohre (Darstellung nach [49])

Für die Aufnahme der Längenausdehnung wird durch Richtungswechsel der Rohrleitungen ein natürlicher Dehnungsausgleich ermöglicht. Bei freiverlegten Rohrleitungen werden Dehnschenkel ebenfalls als Winkelbogen (L-Bogen), doppelter Winkelbogen (Z-Bogen) und U-Bogen realisiert (Bild 7.21).

Die Länge der Ausladelänge L_A ist gemäss [49] nicht nur von der Ausdehnung ΔL bzw. der Hauptrohrlänge L abhängig, sondern nimmt auch mit zunehmender Rohrdimension d_a bzw. der rohrstatischen Auslegungstemperatur ΔT_{RS} zu. Das heisst: Je grösser die Ausdehnung ΔL und Rohrdimension d_a ist, umso grösser werden die benötigten Dehnschenkel bzw. umso länger wird die Ausladelänge L_A.

Bei freiverlegten Rohren kann für die überschlägige Berechnung der Ausladelänge L_A folgende Gleichung nach [49] verwendet werden:

$$L_A \approx \frac{\Delta T_{RS}}{64} \sqrt{L d_a}$$

Das Diagramm in Bild 7.22 gibt einen Anhaltspunkt zur Gestaltung der Dehnungsausgleicher für die oben aufgeführte Gleichung zur Bestimmung der Ausladelänge L_A bei frei-, gebäude- oder kanalverlegten Systemen normiert auf einen maximalen Temperaturunterschied von 100°C. Die Ausladelänge L_A des Dehnschenkels kann anhand des Diagramms in Bild 7.22 für andere Temperaturen proportional umgerechnet werden.

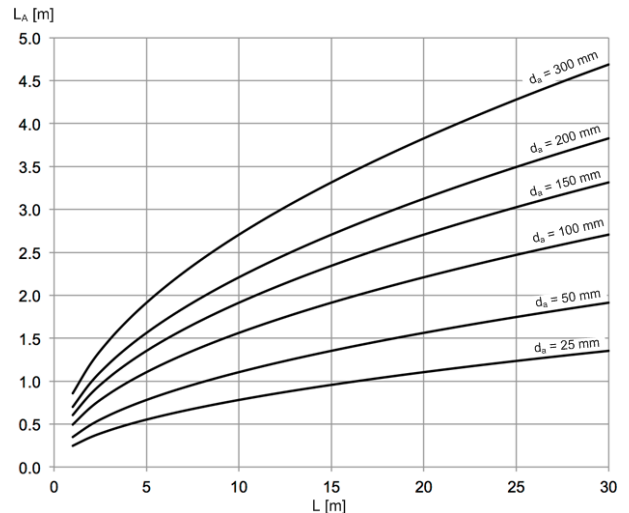


Bild 7.22 Dehnschenkelängen bei warmgehenden ferritischen und austenitischen Rohrleitungen bei frei-, gebäude- oder kanalverlegten Rohrsystemen normiert auf einen maximalen Temperaturunterschied von 100°C (berechnet nach [49]).

Alternativen zum natürlichem Dehnungsausgleich für freiverlegte Systeme sind Lateral-, Axial-, Gelenk-Kompensatoren, die durch flexible Balgkomponenten eine gezielte Verformung aufnehmen können. Das AGFW-Merkblatt FW411 [102] bietet Auslegunggrundlagen für frei-, gebäude-, und kanalverlegte Systeme. Enthalten sind Tabellen und Diagramme zur statischen Auslegung bis zu einem Durchmesser DN 80. Für grössere Nennweiten muss der Nachweis für die Beanspruchung durch Wärmedehnung, durch das Eigengewicht und für die Belastung der Auflager, sowie der Nachweis für Festpunkte, Lager, Bögen, T-Abgänge, Anbohrungen, Dehnschenkel, Stützweiten erbracht werden. Grundlagen für die statische Berechnung liefern SN EN 13480 [93], SN EN13941 [94] und AD-2000 [119].

7.5.4.1 Rohrhalterung

Rohre werden zur Abstützung mit Rohrschellen versehen, welche mit der Decke, der Wand oder dem Boden verbunden und verankert werden. Je grösser die Rohrdimension, umso weniger Abstützungen werden benötigt. Grundsätzlich gibt es vier verschiedene Typen von Rohrhalterungen bzw. Rohrlagern, welche bei freiverlegten Systemen zum Einsatz gelangen.

- **Festpunkte (Fixpunkte):** Für die Rohre ist keinerlei Bewegung in eine Richtung möglich. Die Festpunkte können bei grossen Dimensionen massive Ausmasse annehmen. Oft sind Spezialanfertigungen zu erstellen.
- **Gleitlager:** Die Rohre sind in der Lage, sich in Längsrichtung zu bewegen. Zusätzlich bleibt ein kleiner Spielraum für Querverschiebungen sowie nach oben/unten. Dieser Lagertyp kommt mit Abstand am häufigsten zum Einsatz.
- **Querdehnungslager (Kreuzgleiter):** Die Rohre sind in der Lage, sich in Längs- und Querrichtung zu bewegen. Zusätzlich bleibt ein kleiner Spielraum für

Verschiebungen sowie nach oben/unten. Dieser Lagertyp kommt im Bereich von Dehnschenkeln, wenn die Ausdehnung von zwei Seiten aufgenommen werden muss, zum Einsatz.

- **Führungslager:** Diese Lager sind spezielle Gleitlager, die ausschliesslich in Längsrichtung eine Bewegung zulassen. Notwendig sind Führungslager ausschliesslich beim Einsatz von Kompensatoren.

Im AGFW-Merkblatt FW 411 [102] wird eine Auswahl und Anordnung von Rohrleitungshalterungen von Stahlmediumrohren mit einer Wärmedämmung aus Faserdämmstoff beschrieben. Aufgeführt ist auch die geeignete Positionierung von Gleitlager im Bereich der Dehnungsausgleicher. Für erd- und freiverlegte Stahlmantelrohre gilt das AGFW-Merkblatt FW 410 [101].

Bei der Festlegung der Rohrleitungsunterstützungen sind aus verfahrenstechnischen Gründen der Durchbiegung bereits enge Grenzen gesetzt und die durch das Eigengewicht resultierenden Rohrleitungsbeanspruchungen sind in der Regel gering. Für die festigkeitsmässige

Beurteilung kann dafür ein vereinfachtes Nachweisverfahren, welches als Stützweitenkontrolle bezeichnet wird, angewendet werden. Wegen des Eigengewichts spielt es auch eine Rolle, ob die Leitungen mit Wasser oder Gas gefüllt sind oder ob sie isoliert sind. Für Stahlrohre mit Durchmesser von 50 bis 500 mm, einer Dichte des Durchflussmediums von 1000 kg/m³ und einem konstanten Wanddickenverhältnis von $d_i/s \approx 30$ ergibt sich für die Stützweiten folgender Zusammenhang:

$$L \approx f d_i^{2/3}$$

$f = 0.3$ für leeres und ungedämmtes Rohr

$f = 0.23$ für gefülltes und ungedämmtes Rohr

$f = 0.2$ für gefülltes und etwas gedämmtes Rohr

Die Gleichung ist in Bild 7.23 dargestellt. Ab DN 500 bleibt die Stützweite zur Begrenzung der Spannung an der Auflagestelle konstant.

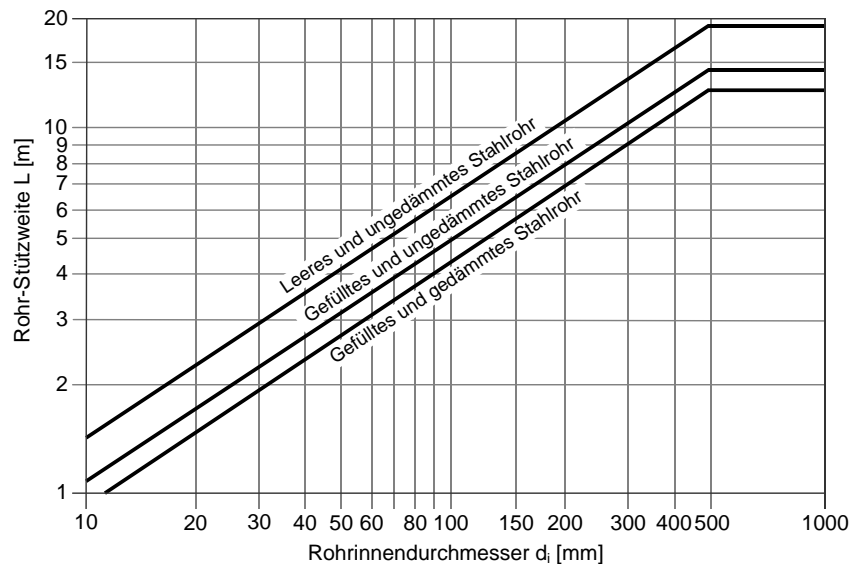


Bild 7.23 Richtwerte für die max. zulässige Rohr-Stützweite L in Abhängigkeit von der Leitungsführungsform und dem Stahlrohrinnendurchmesser d_i (Rohrleitungen im Gebäude) nach [49].

7.5.4.2 Verlegung mit Vorspannung

Bei frei verlegten Rohren (innen wie auch aussen) empfiehlt es sich, Rohre ab DN 100 vorzuspannen. Zwischen DN 50 und DN 80 kann eine Vorspannung von Vorteil sein. Noch kleinere Dimensionen sind in der Regel so elastisch, dass die Dehnungen problemlos aufgenommen werden können. Bei der Vorspannung von frei verlegten Rohren handelt es sich ausnahmslos um eine **Kaltvorspannung**, das heisst, dass die Rohrlängen zwischen den Dehnbereichen um das Vorspannmass gekürzt werden (Bild 7.24). Das Vorspannmass entspricht in der Regel der halben Längendehnung bei einer Temperaturdifferenz zwischen der Verlegetemperatur T_{Ver} und der Auslegetemperatur T_{Aus} .

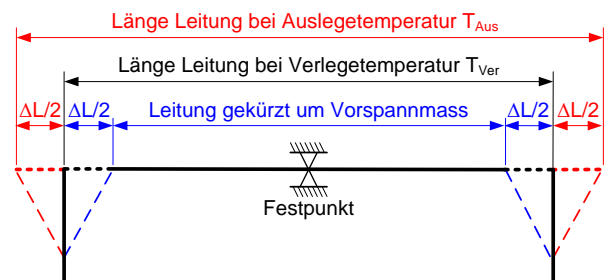


Bild 7.24 Schematische Darstellung der Kaltvorspannung bei Freileitungen im Bereich der Dehnschenkel (Vereinfachte Darstellung der Dehnung nur eines Dehnschenkels).

Mit einer Kaltvorspannung lassen sich die Ausladelängen von Dehnschenkeln somit verkleinern. Die Verbindung der beiden Dehnschenkel bzw. das Verschweissen geschieht durch eine mechanische Vorspannung.

Dabei wird ein Dehnschenkel soweit an den gekürzten Schenkel gepresst, bis der Spalt kompensiert ist und die beiden Enden miteinander verschweisst werden können.

Reichen diese Massnahmen aufgrund der knappen räumlichen Verhältnisse nicht aus, um die Dehnungen aufzunehmen, kann mit dem Einsatz von Kompensatoren Abhilfe geschaffen werden, wobei auch diese Systeme vorgespannt werden.

Hinweis: Oben beschriebene Verlegeverfahren liegen oft im Heisswasser- oder Dampfbereich. Auf eine detaillierte Beschreibung unter Einbezug von Kompensatorsystemen wird aus Platzgründen verzichtet. An dieser Stelle sei auf die Arbeitsblätter der AGFW FW 401 [100], FW 411 [102] und auf Spezialliteratur verwiesen.

7.5.5 Kunststoff-Medienrohre (PMR)

Da die Kunststoffrohre eine viel höhere Elastizität als Stahlrohre besitzen, sind sie selbstkompensierend, das heisst die Dehnung wird durch die Rohre selbst aufgefangen, indem sich der Durchmesser erweitert. Obwohl der Ausdehnungskoeffizient von PE rund 20 mal höher ist als von Stahl, **muss die Ausdehnung verhindert** werden. Bei erdverlegten Rohren ist dies aufgrund des Erddrucks problemlos möglich. Auf Dehnungskissen kann vollständig verzichtet werden. Bei frei verlegten PMR wird durch Festpunkte vor Bögen die Längsdehnung verhindert (Bild 7.25). Die Lager zwischen den Festpunkten dienen nur der Fixierung der Rohre. Gleitlager und Kompensatoren kommen bei Kunststoffrohren nicht zum Einsatz.

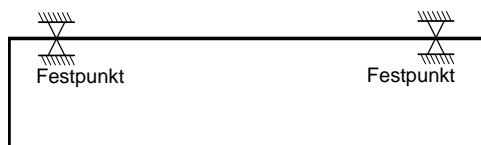


Bild 7.25 Anordnung der Festpunkte bei PMR vor Bögen bzw. Richtungsänderungen.

8 Wärmeübergabe – Technik und Hydraulik

In diesem Kapitel werden die Komponenten und technischen Grundlagen einer Hausstation beschrieben. Zudem wird auf die hydraulischen Grundlagen bei der Wärmeübergabe eingegangen und die für Fernwärmenetze wichtigsten Standard-Schaltungen beschrieben.

8.1 Komponenten und Technik einer Hausstation

Das vorliegende Kapitel vertieft die Ausführungen von Kapitel 5.2 und bezieht sich auf Bild 5.2 und Bild 5.3. Je nach Anschlussleistung und Ausführungsstandard wird die Hausstation als Einheit (Kompaktstation) eingebaut, welche die Komponenten der Übergabestation und der Hauszentrale beinhaltet, oder die Station und die Hauszentrale bilden eine separate Einheit.

Eine Kompaktstation beinhaltet mindestens folgende Komponenten:

- An- und Abschlussarmaturen im Vor- und Rücklauf (primär- und sekundärseitig)
- Entleerung bzw. Entlüftung (je nach Gefälle der Anschlussleitungen)
- Wärmemesseinrichtung (Volumenstrommessteil, Temperaturmessung, Rechenwerk)
- Anzeigende Temperatur- und Druckmessung
- Differenzdruck- und Volumenstromregler (Kombiventil)
- Wärmeübertrager
- Pumpe/n
- Schmutzfänger

Je nach Anlagengröße sind zusätzlich folgende Komponenten möglich:

- Kurzschlussverbindung
- Zählerumgehung
- Zusätzliche Anzeige von Temperatur und Druck
- Zusätzliche Differenzdruck- und Volumenstromregler (Kombiventile).
- Zusätzliche Wärmeübertrager

Den Standard hält der Wärmelieferant in den technischen Anschlussvorschriften (TAV) fest. Mit dem Wärmelieferanten sind auch die Kombinationsmöglichkeiten mit der Hauszentrale abzustimmen, was bei einer Kompaktstation unerlässlich ist. Bestimmte Funktionen werden oft auch von beiden Parteien genutzt. So können zum Beispiel Regelventile mit Notstellfunktion die Kundenanlage absichern.

8.1.1 Wärmeleistungsbedarf

Die im Wärmelieferungsvertrag maximal vereinbarte Wärmeleistung des Kunden wird bei der Inbetriebnahme üblicherweise an der Drossel des Volumenstrombegrenzers (VBS) eingestellt und plombiert. Damit wird der maximale Volumenstrom begrenzt. Der Wärmelieferant sollte bei Bedarf die bezogene Leistung stichprobenartig kontrollieren.

8.1.2 Werkstoffe und Verbindungen

Die Auswahl der Werkstoffe für die primärseitigen Bauelemente ist nach DIN 4747-1 [78] vorzunehmen, wobei entgegen der DIN 4747-1 vielfach Buntmetalle und gelötete Wärmeübertrager mit Buntmetall-Lot nicht zugelassen werden. Die verwendeten Verbindungselemente und Dichtungen müssen für die Betriebsbedingungen bezüglich Druck, Temperatur und Wärmeträgermedium geeignet sein.

Die Rohrleitungen und Formstücke sind mit einem temperaturbeständigen Korrosionsschutzanstrich zu versehen. Nicht vorzusehen sind automatische Entlüftungen, Pressverbindungen, Gummikompensatoren, konische Verbindungen und Hanf als Dichtungsmaterial.

Weitere Anforderungen und Abweichungen zur DIN 4747-1 sind in den Technischen Anschlussvorschriften aufzuführen.

8.1.3 Wärmedämmung

Die Wärmedämmung muss alterungsbeständig sein und darf im nassen Zustand keine korrodierende Wirkung auf die Anlagenteile ausüben. Sie muss zudem bei Betriebstemperatur chemisch stabil und masshaltig sein. Die Montage und Demontage des Wärmezählers und der zugehörigen Fühler muss ohne Verletzung der Wärmedämmung erfolgen können. Vor- und Rücklaufleitungen sind grundsätzlich getrennt und dehnungskonform zu dämmen. Die Wärmedehnung der Rohre darf die Wärmedämmung nicht beeinträchtigen. Wärmedämmungen sind sattgestossen und fugenversetzt anzubringen. Die Längs- und Stossfugen sind vollständig mit einem geeigneten Dichtstoff zu schliessen.

Die primärseitigen Leitungen sind z.B. mit Glasfaserschalen zu dämmen (Rohdichte mindestens 80 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0.034 \text{ W/(mK)}$ bei $t_m 50^\circ\text{C}$ und 0.039 W/(mK) bei $t_m 100^\circ\text{C}$): Die verlegten Leitungen sind zusätzlich mit einer korrosions- und temperaturbeständigen Ummantelung zu schützen.

Die Tabelle 8.1 zeigt minimale Dämmstärken für in Gebäude verlegte Heizungsleitungen in unbeheizten Räumen und Warmwasserleitungen. Die angegebenen Dämmstärken gelten für eine Betriebstemperatur bis 90°C . Bei höheren Betriebstemperaturen sind die Dämmstärken angemessen zu erhöhen und bei maximalen Vorlauftemperaturen von 30°C können die Dämmstärken reduziert werden.

Tabelle 8.1 Minimale Dämmstärken für in Gebäude verlegte Heizungsleitungen in unbeheizten Räumen und Warmwasserleitungen.

Nenndurchmesser DN	Dämmstärke [mm] bei	
	$0.03 > \lambda \leq 0.05$ W/(mK)	$\lambda \leq 0.03$ W/(mK)
10-15	40	30
20-32	50	40
40-50	60	50
65-80	80	60
100-150	100	80
175-200	120	80

8.1.4 Wärmehähler

Für die Abrechnung von Brennstofflieferungen oder der von einem Wärmeabnehmer bezogenen Wärme ist der Einsatz von geeichten Wärmehählern notwendig. Die Wärmemessung erfordert eine Durchfluss- und eine Temperaturdifferenzmessung zwischen Vor- und Rücklauf.

Die Genauigkeitsklasse eines Wärmehählers ist durch die Messgenauigkeit von Durchfluss und Temperaturdifferenz bestimmt.

Der Messbereich des Durchflusses ist durch den Arbeitsbereich zwischen Nenndurchfluss Q_N und Minimaldurchfluss Q_{\min} gegeben. Das Verhältnis von Nenndurchfluss zu Minimaldurchfluss ist ein Mass für die Bandbreite des Durchflussbereichs, innerhalb dessen eine bestimmte Genauigkeit der Volumenstrommessung garantiert ist. Auch die Wasserqualität hat bei Langzeiteinsatz grossen Einfluss auf die Messgenauigkeit.

Der Druckabfall bei Nenndurchfluss ist oft sehr hoch (20 – 25 kPa für Flügelradzähler). Ein hoher Druckabfall vergrössert zwar den Arbeitsbereich, verschlechtert aber auch die Ventilautorität des Regelventils, das sich oft in der gleichen Durchflussstrecke befindet.

Für die Durchflussmessung werden folgende Messverfahren verwendet (siehe auch Tabelle 8.2):

- Mechanische Durchflussmessung mittels Flügel- oder Turbinenrad
- Magnetisch-induktive Durchflussmessung
- Durchflussmessung mittels Ultraschall.

8.1.4.1 Einbau von Wärmehählern

Zur Erreichung der erforderlichen Messgenauigkeit müssen folgende Hinweise beachtet werden [21]:

- Einhalten der Einbauvorschriften des Wärmehählerlieferanten (Einlaufstrecke, Auslaufstrecke, Einbauanordnung horizontal/vertikal, Fühlereinbau usw.).
- Auslegung auf eine Temperaturdifferenz > 20 K. Temperaturdifferenz im Betrieb mindestens 3 K.
- Gleichmässige Temperaturverteilung über den Rohrquerschnitt vor den Temperaturfühlern (nötigenfalls Einbau eines statischen Mischers).

- Stabile Regelkreise (schwingende Regler können grosse Messfehler verursachen).
- Fehlzirkulationen (inkl. Einrohrzirkulation), welche die Wärmemessung beeinflussen können, sind zu verhindern. Dabei ist speziell dem Anschluss der Expansionsleitung Beachtung zu schenken, sowie unkontrollierten Strömungen. Diese können entstehen, wenn ein Teil der Anlage (z.B. die Gruppenpumpe) ausgeschaltet ist und wenn der Verteiler mit einem schwachen Differenzdruck behaftet ist. Über das Mischventil, das sich in einer Zwischenstellung befindet, kann eine Fehlzirkulation direkt in den Rücklauf entstehen.
- Wenn die Temperaturdifferenzmessung auf der gleichen Ebene erfolgt wie die Durchflussmessung, können Störungen durch ungewollte Fehlzirkulationen minimiert werden (Fehlzirkulation wird wenigstens korrekt gemessen).
- Betreiben des Wärmehählers nur im zulässigen Durchflussbereich Q_N bis Q_{\min} .
- Vorteilhaft sind Kompaktwärmehähler, weil Störeinflüsse auf die kurze Signalübertragung vom Sensor zum Messumformer und zum Rechenwerk praktisch ausgeschlossen sind.
- Fachtechnisch einwandfreie Inbetriebnahme der Wärmehähler und wenn nötig systematische Störquellensuche durch Fachleute.
- Das Verlängern der Fühlerkabel ist grundsätzlich zu vermeiden, um die Messgenauigkeit nicht zu beeinträchtigen.

Bei mechanischen Durchflussmessgeräten:

- Einbau eines Schmutzfilters vor dem Wassereintritt des Durchflussmessers, um Beschädigung oder Verstopfen des Flügel-/Turbinenrads zu vermeiden.
- Regelmässige Revision, um Abnützungserscheinungen als Fehlerquelle auszuschliessen.
- Durch sorgfältige Auslegung ist dafür zu sorgen, dass bei variablem Volumenstrom der Betriebsdurchfluss möglichst nicht oder nur in seltenen Ausnahmefällen unter den Minimaldurchfluss Q_{\min} fällt.

Bei magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten:

- Im Wasser darf kein Magnetit enthalten sein, da sich dieses auf den Messsonden absetzt und so die Messung beeinflusst (Reduktion des Durchflussmesswertes).
- Bei bestehenden Anlagen kann mit einem Magnetschlammabscheider in Verbindung mit einem Entgasungsgerät die geforderte Wasserqualität (klares Wasser) erreicht werden.
- Bei Neuanlagen ist darauf zu achten, dass von Anfang an das Wasser ausreichend entgast und der Sauerstoffgehalt gegen Null reduziert wird.
- Beim Auftreten von grossen Messfehlern wird empfohlen die Innenwände der Durchflussmesser zu reinigen, womit die Ursache (z.B. schmutziges Wasser) allerdings nicht behoben ist.
- Da über die Messsonden eine sehr geringe Spannung anliegt (einige Millivolt), ist das Messverfahren, vor allem bei Splitgeräten (Sensor und Messumformer getrennt), empfindlich auf elektrische Störfelder.

Dies kann durch Verwendung von Kompaktdurchflussgebern entschärft werden.

- Nur abgeschirmte und verdrehte Kabel verwenden und die Nähe von starken Magnetfeldern von Elektromotoren oder Frequenzumrichtern meiden.

Bei Ultraschall-Durchflussmessgeräten:

- Verschmutzung der Umlenkspiegel bei kleiner Nennweite und Gaseinschlüsse im Wasser können Messungenauigkeiten verursachen. Die Vermeidung dieser Störeinflüsse erfordert eine hohe Wasserqualität, die Ablagerungen auf den Umlenkspiegeln verhindert, sowie eine ausreichende Entgasung des Wassers.

8.1.4.2 Einhalten der Messbeständigkeit

Der Wärmezähler ist gemäss Messmittelverordnung MessMV [64] und Verordnung des EJPD über Messgeräte für thermische Energie [65] auszuführen und in Verkehr zu bringen. Der Wärmezähler wird in der Regel vom Wärmelieferanten überwacht und unterhalten. Die Messbeständigkeit des Wärmezählers ist durch den Wärmelieferanten zu gewährleisten.

Eine Nacheichung ist gemäss Messmittelverordnung alle fünf Jahre durch eine ermächtigte Eichstelle durchzuführen. Sind jedoch mindestens 150 Wärmezähler bei einem Wärmeverbund in Betrieb und werden diese Messdaten im Betrieb überwacht, so kann beim METAS ein Gesuch für ein Verfahren eingereicht werden, mit dem die Eichperiode unter folgenden Bedingungen verlängert werden kann:

- Das Verfahren muss geeignet sein, durch Massnahmen korrekte Messungen zu gewährleisten.
- Alle eingesetzten Wärmezähler müssen gemäss [65] in Verkehr gebracht werden und keiner dieser Zähler darf zu irgendeinem Zeitpunkt länger als zehn Jahre ohne Nacheichung in Betrieb sein.
- Defekte Zähler müssen durch konforme ersetzt werden.
- Alle eingesetzten Zähler müssen unter vergleichbaren Einsatzbedingungen betrieben werden.
- Die Verwenderin informiert einmal jährlich das METAS über die Resultate des Verfahrens.

Beträgt die Nennleistung der Wärmemesseinrichtung mindestens 10 MW, so kann zur Erhaltung der Messbeständigkeit gemäss [65] eine Kalibrierung durchgeführt werden. Folgende Bedingungen müssen jedoch erfüllt sein:

- Die thermische Energie wird zwischen zwei ständigen Partnern über feste Versorgungsleitungen in einer Messstation aus den Messdaten eines oder mehrerer Wärmezähler ermittelt, wobei die Summe der Nennleistungen der eingesetzten Wärmezähler mindestens 10 MW beträgt.
- Die Wärmemesseinrichtung wird zwischen zwei Handelspartnern eingesetzt, die grundsätzlich in der Lage sind, die Messergebnisse zu beurteilen.
- Die Wärmemesseinrichtung steht unter der regelmässigen messtechnischen Aufsicht des fachkundigen Betriebspersonals.

- Können Teile der Messanlage nicht im eigenen Betrieb kalibriert werden, so werden die Messmittel von einem vom METAS anerkannten Kalibrierlabor, einer ermächtigten Eichstelle oder vom METAS kalibriert. Die Wärmemesseinrichtung wird nach der Kalibrierung mit identifizierbaren Betriebsplomben gesichert.
- Die Kalibrierung der Wärmemesseinrichtung muss bei Bedarf erfolgen, jedoch in der Regel alle 12 Monate. Für keinen Teil der Messeinrichtung darf die Kalibrierung mehr als zwei Jahre zurückliegen.
- Über die an der Wärmemesseinrichtung durchgeführten Arbeiten (Wartung, Justierung, Kalibrierung) wird ein Protokoll geführt. Aus den Eintragungen muss ersichtlich sein, welche Arbeiten wann und von wem durchgeführt wurden. Bei Beanstandungen müssen die Protokolle der zuständigen Stelle vorgelegt werden können.

8.1.4.3 Einfluss auf die Ventilautorität

Hersteller von Wärmezählern geben den sogenannten Nenndurchfluss an. Wenn Wärmezähler tatsächlich auf diesen Nenndurchfluss ausgelegt werden, ergeben sich jedoch hohe Druckabfälle von 20 bis 25 kPa. Diese führen immer wieder zu Fehlinterpretationen, da Durchflusszähler oft in einer Strecke mit variablem Durchfluss eingebaut werden, damit die dazugehörige Temperaturdifferenz möglichst gross wird (höchste Messgenauigkeit). Dies hat aber zur Folge, dass die Ventilautorität des Regelventils verschlechtert wird, was zu einem Zielkonflikt führt. Einerseits soll der Druckabfall über dem Zähler für eine gute Ventilautorität klein sein, andererseits verursacht ein kleiner Druckabfall auch eine geringere Genauigkeit im unteren Durchflussbereich. Zu beachten sind deshalb folgende Empfehlungen:

- Wenn kleinere Wärmezähler so ausgelegt werden, dass der tatsächliche Auslegedurchfluss etwa 50 % des Nenndurchflusses gemäss Hersteller entspricht, ergeben sich vernünftige Druckabfälle um 5 kPa bei akzeptabler Genauigkeit.
- Mit den heute angebotenen unterschiedlichen Bauarten lassen sich immer geeignete Lösungen finden. Mit magnetisch-induktiven Durchflussgebern können grössere Wärmezähler mit geringem Druckabfall realisiert werden.

Tabelle 8.2 Beurteilung der wichtigsten Durchflussmessverfahren [21].

	Mechanisch	Magnetisch-Induktiv	Ultraschall
Verhältnis Q_N/Q_{\min}	25-100 60-190*	100-150	100-150
Druckabfall bei Nenndurchfluss Q_N [kPa]	10-15	7-15	7-20
Messgenauigkeit	mittel	hoch	hoch
Empfindlichkeit der Messgenauigkeit auf die Wasserqualität	klein	hoch	klein bis mittel**
Abnützung / Serviceaufwand	hoch	gering	gering
Empfindlichkeit der Messgenauigkeit auf elektrische Störfelder	gering bis mässig***	hoch	gering

* Spezialausführung (Voltmanzzähler); ** Verschmutzung der Umlenkspiegel bei kleinen Nennweiten; *** bei induktiven Impulsgebe

8.1.5 Druckabsicherung

Die Druckabsicherung beim **direkten Anschluss** kann ohne Druckminderung und -absicherung erfolgen, wenn der Maximaldruck im Netz $p_{N\max}$ kleiner oder gleich dem zulässigen Druck der Hausstation oder der Hausanlage $p_{H\text{zul}}$ ist. Andernfalls ist eine Druckminderung und eine Druckabsicherung erforderlich, wie in Bild 8.1 und Tabelle 8.3 nach DIN 4747-1 [78] beschrieben.

Beim **indirekten Anschluss** ist die Primärseite des Wärmeübertragers für den maximalen Netzdruck $p_{N\max}$ zu bemessen. Die Anordnungen der Sicherheitseinrichtungen gegen Überschreiten des sekundärseitigen Betriebsüberdrucks sind in Anlehnung an SN EN 12828 [98] bzw. DIN EN 12953 [108] vorzunehmen. Bezüglich der abzusichernden Druckbehälter ist AD 2000 [119] Merkblatt A 2 zu beachten. Hierzu ist jeder Wärmeübertrager sekundärseitig durch Sicherheitsventile gegen Überschreiten des zulässigen Betriebsdruckes abzusichern. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Anschluss von maximal drei Sicherheitsventilen je Wärmeübertrager.
- Senkrechter Einbau mit Steigleitung so kurz wie möglich, max. 1 Meter.
- Leitungen ohne Absperrung, Schmutzfänger und Formstücke, die zur Verengung des Querschnittes führen einbauen.
- Anordnung an leicht zugänglicher Stelle.
- Ausschliesslich senkrechter Einbau.
- Anbringung eines Hinweisschilds.
- Separate Ausblasleitung mit Gefälle, Mündung frei und beobachtbar.
- Sicherheitsventil muss bauteilgeprüft sein.

Besteht die Möglichkeit der Aufheizung im Wärmeübertrager durch die Sekundärseite, so sind auch Druckabsicherungsmassnahmen auf der Primärseite zu treffen. Jeder Wärmeübertrager muss mindestens mit einem Ausdehnungsgefäss verbunden sein.

Die Auslegung und Masse der Membran-Sicherheitsventile für die Sekundärseite müssen mindestens den Angaben aus Tabelle 8.4 entsprechen.

8.1.6 Temperaturabsicherung

Eine Temperaturabsicherung in der Hauszentrale ist abhängig von der höchstzulässigen Hausanlagentemperatur und der maximalen primären Vorlauftemperatur. In der DIN 4747-1 sind dazu Anforderungen nach Tabelle 8.5 festgelegt.

Wird eine Warmwassererwärmungsanlage einer Unterstation oder einer Anlage für Raumwärme mit Vorlauf-temperaturregelung und Temperaturabsicherung nachgeschaltet, so ist zur Auslegung der sicherheits-technischen Ausrüstung zur Temperaturabsicherung der Warmwassererwärmung die primäre Betriebsmitteltemperatur und nicht die maximale primäre Vorlauftemperatur massgebend (Tabelle 8.6).

Werden nach Tabelle 8.5 und Tabelle 8.6 Stellgeräte mit Sicherheitsfunktionen gefordert, können Regel-, Wächter- und Begrenzungsimpuls auf ein gemeinsames Stellgerät wirken, wenn es typisiert ist. Als typengeprüfte Stellgeräte können auch Volumenstromregler ohne Fremdenergie, die mit einem Stellantrieb mit Sicherheitsfunktion ausgerüstet sind, eingesetzt werden.

Der Einstellbereich der sicherheitstechnischen Ausrüstung darf die höchstzulässige Temperatur der Hausanlage um nicht mehr als 10 %, begrenzt auf höchstens 5 K, überschreiten.

Das Stellgerät ist so anzuordnen, dass die Gefahr der Verdampfung oder des Leerlaufens der Hauszentrale bzw. der Hausanlage vermieden wird. Bei Warmwassererwärmungsanlagen soll das Stellgerät im Vorlauf angebracht sein.

Um die Temperatur möglichst schnell und unverfälscht zu messen, sollen die Temperatursensoren für den Regel-, Wächter- und Begrenzungsimpuls bei direktem Anschluss so installiert werden, dass die Mischtemperatur sicher erfasst werden kann.

Bei indirektem Anschluss sollen die Temperaturmessfühler möglichst im oder dicht am Wärmeübertrager angeordnet sein.

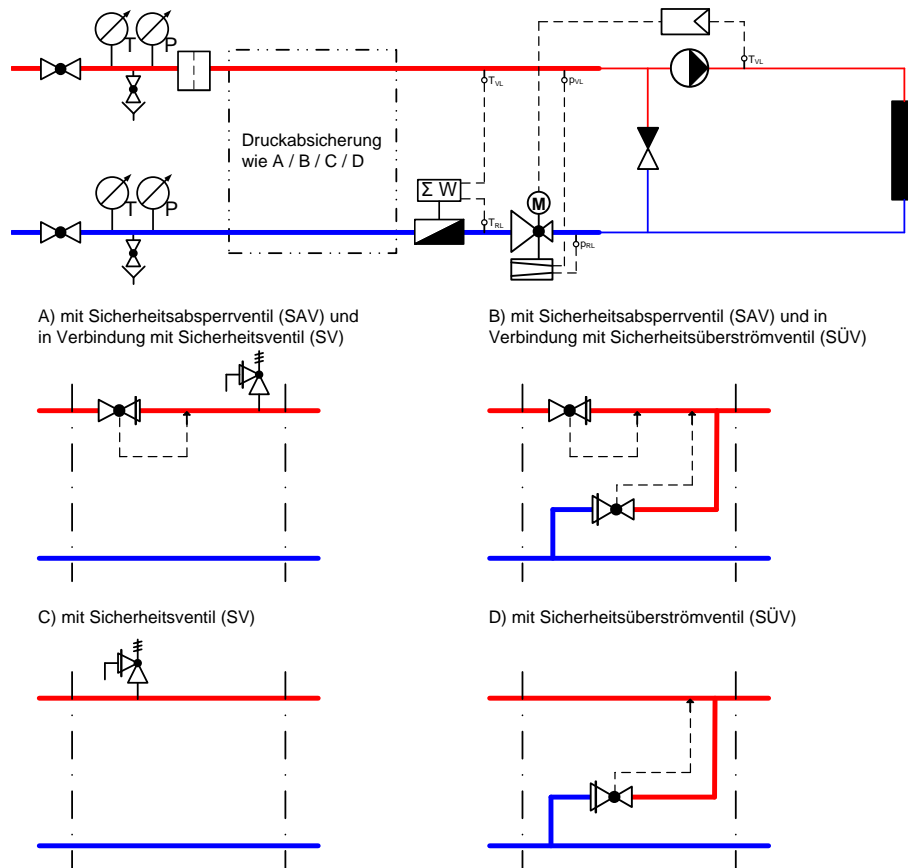


Bild 8.1 Prinzipschema für die Ausrüstung einer Hausstation mit direktem Anschluss mit Sicherheitseinrichtungen für die Druckabsicherung mit Druckminderung (nach DIN 4747-1 [78]). Siehe auch Tabelle 8.3.

Tabelle 8.3 Sicherheitstechnische Ausrüstung zur Druckabsicherung von en nach DIN 4747-1[78].

zulässiger Betriebsdruck in der Hausanlage	Direkter Anschluss					Indirekter Anschluss (sekundär)	
	SAV mit SV*	oder SAV mit SÜV*	oder SV	oder SÜV	Ausdehnungsgefäß	SV	Ausdehnungsgefäß
$\geq p_{Nmax}$	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich
$< p_{Nmax}$	erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich

SAV = Sicherheitsabsperventil, bauteilgeprüft

SV = Sicherheitsventil, bauteilgeprüft

SÜV = Sicherheitsüberströmventil, bauteilgeprüft

* SV- und SÜV-Auslegung mindestens für 1 % des k_{VS} -Wertes des SAV

Tabelle 8.4 Auswahl von Membran-Sicherheitsventilen gegen Drucküberschreitung infolge Wasserausdehnung bei indirekten Anschlüssen nach DIN 4747-1[78]. Gilt für einen Ansprechdruck ≤ 3.0 bar.

		Ausblaseleistung für Wasser in l/h = Nennwärmeleistung in kW		
		≤ 100	≤ 350	≤ 900
Zuleitung	Minstdurchmesser bzw. Mindestdnennweite DN	15	20	25
	Anschlussgewinde*	G 1/2	G 3/4	G 1
Ausblaseleitung	Minstdurchmesser bzw. Mindestdnennweite DN	20	25	32
	Anschlussgewinde*	G 3/4	G 1	G 1 3/4

* Rohrgewinde nach DIN ISO 228-1

Tabelle 8.5 Sicherheitstechnische Ausrüstung zur Temperaturabsicherung von Hausstationen für Raumwärme nach DIN 4747-1[78].

Netzfahrweise	maximale primäre Vorlauftemperatur	höchstzulässige Hausanlagen-temperatur	Vorlauftemperaturregelung	Temperaturregler TR ^a	Sicherheitstemperaturwächter STW ^a	Sicherheitsfunktion nach SN EN 14597 [71]
konstante Netzfahrweise	≤ 120°C	≥ primäre Vorlauftemperatur	erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich
		< primäre Vorlauftemperatur	erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich
	> 120°C	< primäre Vorlauftemperatur	erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich
gleitende und gleitend-konstante Netzfahrweise	≤ 120°C	≥ primäre Vorlauftemperatur	nicht erforderlich ^b	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich
		< primäre Vorlauftemperatur	erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich ^{c, d}
	> 120°C ≤ 140°C	< primäre Vorlauftemperatur	erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich ^{c, d}
	> 140°C	< primäre Vorlauftemperatur	erforderlich	erforderlich	erforderlich	nicht erforderlich

a) Definition nach SN EN 14597
 b) Dezentrale Temperaturregelung mit thermostatischen Heizkörperventilen
 c) Nicht erforderlich bei Anlagen, deren primär zur Verfügung gestellter Heizwasservolumenstrom 1 m³/h nicht überschreitet. Bei Fortfall des STW wird ein TR erforderlich. Flächenheizsysteme und Warmwassererwärmungsanlagen sind von der Erleichterung ausgenommen.
 d) In Anlehnung an die SN EN 14597 erfüllt das Stellgerät die Forderung nach innerer Dichtheit (0.05 % vom k_{VS}-Wert)

Tabelle 8.6 Sicherheitstechnische Ausrüstung zur Temperaturabsicherung von Hausstationen für Warmwassererwärmung nach DIN 4747-1 [78].

Netzfahrweise	primäre Betriebsmitteltemperatur	höchstzulässige Hausanlagen-temperatur ^d	Vorlauftemperaturregelung	Temperaturregler TR ^a	Sicherheitstemperaturwächter STW ^a	Sicherheitsfunktion nach SN EN 14597 [71]
konstante, gleitende und gleitend-konstante Netzfahrweise	≤ 100°C	≤ 75°C	erforderlich	erforderlich	erforderlich max. T _{Hzul}	erforderlich
		> 75°C	erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	nicht erforderlich
	> 100°C ≤ 120°C	≤ 75°C	erforderlich	erforderlich	erforderlich max. T _{Hzul}	erforderlich
		> 75°C	erforderlich	erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich ^c
	> 120°C	≤ 75°C	erforderlich	erforderlich	erforderlich max. T _{Hzul}	erforderlich ^c
		> 75°C	erforderlich	erforderlich	erforderlich max. 75°C ^b	erforderlich ^{b, c}

a) Definition nach SN EN 14597
 b) Nicht erforderlich bei Warmwassererwärmungsanlagen mit Durchflusswassererwärmern, deren primär zur Verfügung gestellter Heizwasservolumenstrom 2 m³/h nicht überschreitet.
 c) In Anlehnung an die DIN 32730 erfüllt das Stellgerät die Forderung nach innerer Dichtheit (0.05 % vom k_{VS}-Wert)
 d) Die Regelung der Warmwassertemperatur kann bereits durch die sicherheitstechnische Ausrüstung gegeben sein.
 e) Sofern die Sicherheitsfunktion nach SN EN 14597 erforderlich ist, kann ein bereits für die Raumheizung vorhandenes Regelventil (primär) genutzt werden.

8.1.7 Regelfunktionen

Zur Regelung der sekundärseitigen Vorlauftemperatur ist ein Kombiventil mit Sicherheitsfunktion zu verwenden (Durchgangsstellorgan mit integriertem Differenzdruckregler/ Volumenstrombegrenzer). Der Differenzdruckregler gewährleistet eine konstante Druckdifferenz über dem Stellorgan, wodurch eine hohe Ventilautorität erzielt wird. Mit dem Volumenstrombegrenzer wird die im Wärmelieferungsvertrag vereinbarte Leistung eingestellt. Der Wirkdruckendwert des Kombiventils beträgt 20 kPa. Regelungstechnisch muss die erforderliche Wärmezählermindestdurchflussmenge gewährleistet werden (Ventilöffnung). Die Sicherheitsfunktion schliesst das Ventil im stromlosen Zustand, wobei Druckschläge vermieden werden müssen.

Die sekundärseitige Vorlauftemperatur der Hauszentrale kann z.B. aussentemperaturgeführt reguliert werden. Die primärseitige Rücklauftemperatur ist auf die maximal zulässige Rücklauftemperatur nach Wärmelieferungsvertrag zu begrenzen.

Ist die Rücklauftemperatur zu hoch, sind zwei Funktionen zulässig. Entweder wird das primärseitige Kombiventil geschlossen oder die primärseitige Rücklauftemperatur wird anstelle der sekundärseitigen Vorlauftemperatur als Regelgrösse verwendet, solange die Rücklauftemperatur zu hoch ist.

Die Fühler zur Messung der sekundärseitigen Vorlauftemperatur und der primärseitigen Rücklauftemperatur sind unmittelbar beim Austritt aus dem Wärmeübertrager anzuordnen. Anlegefühler sollten dafür nicht verwendet werden.

8.1.8 Rücklauftemperatur

Die in den Technischen Anschlussvorschriften angegebenen Rücklauftemperaturen sind als Maximalwerte zu verstehen, nach Möglichkeit sind tiefere Rücklauftemperaturen anzustreben.

Die maximale Rücklauftemperatur sollte zu keinem Zeitpunkt überschritten werden. Ausnahmen können bei der Warmwasserladung bewilligt, sollten aber auf eine kurze Zeit beschränkt werden. Die Bedingungen für die maximalen Rücklauftemperaturen sind im Wärmeliefervertrag (Technische Anschlussvorschriften TAV) festzuhalten.

Geeignete Massnahmen zur Senkung der Rücklauftemperatur sind grosszügige Wärmeübertragerflächen, Durchfuss- oder Speicherladesysteme zur Brauchwarmwassererwärmung, Heizkörperthermostatventile, Begrenzung der Warmwasser-Zirkulationsmenge sowie ein hydraulischer Abgleich der Hauszentrale und -anlage.

8.1.9 Wärmeübertrager

Für die festigkeitsmässige Auslegung und Konformitätserklärung ist die Verordnung über die Sicherheit von Druckgeräten (Druckgeräteverordnung) zu beachten [66]. Die Ausführung der Wärmeübertragung sollte prinzipiell im Gegenstromprinzip erfolgen.

Der Auslegungsdruck, die Auslegungstemperatur und die Grädigkeit sind in den Technischen Anschlussvorschriften festzulegen. Eine **Grädigkeit** von 4 bis 5 K bei Auslegebedingungen (tiefste Aussentemperatur) und eine Grädigkeit von ≤ 3 K im Teillastbereich sind als Zielwert zu definieren. Dies hat zur Folge, dass der Wärmeübertrager eine genügend grosse Übertragungsfläche aufweist.

Als Wärmeübertrager kommen folgende Ausführungen in Frage:

- Plattenwärmeübertrager (geschraubt, gelötet oder geschweisst)
- Rohrbündelwärmeübertrager
- Spiralwärmeübertrager

Werden gelötete Wärmeübertrager wegen dem Kupfer- oder Nickel-Lot oder aus anderen Gründen nicht erlaubt, muss dies zwingend aus den Technischen Anschlussvorschriften hervorgehen. Die

Die Wärmeübertrager müssen mechanisch spannungsfrei eingebaut werden, auf die Verbindungen zum Wärmeübertrager dürfen keine Axialkräfte und Biegemomente übertragen werden.

Die sekundärseitige Wärmeübertrager-Austrittstemperatur sollte nicht zu hoch und nicht zu tief sein. Empfehlenswert ist eine um rund 5°C erhöhte Austrittstemperatur zur höchsten geforderten Vorlauftemperatur aller angeschlossenen Heiz- und Warmwasserkreise.

8.1.10 Erdung

Die Übergabestation und die Hauszentrale und müssen an den Potentialausgleich angeschlossen werden. Insbesondere Niederspannungs-Elemente wie z.B. das Bussystem sollten zusätzlich mit einem Überspannungsschutz ausgerüstet werden.

8.1.11 Datenerfassung

Wenn immer möglich ist eine direkte oder indirekte Datenverbindung zur Wärmezentrale (Busanbindungen wie z.B. Modbus, etc.) in die Hausstation zu integrieren.

Dies vereinfacht im wesentlichen die Fakturierung, Störungserfassung und Anlagenoptimierung.

8.1.12 Schmutzfänger

In der primärseitigen Vorlaufleitung sollte ein grossflächiger Schmutzfänger mit Trag- und Feinfilter und mit folgenden Eigenschaften eingebaut werden:

- Tragfilter Lichte Maschenweite 0.8 mm
- Feinfilter Lichte Maschenweite 0.25 mm

8.2 Warmwassererwärmung

Die Erwärmung von Trinkwasser bzw. Warmwassererwärmung mit Fernwärme ist ganzjährig möglich, sofern der Wärmelieferant das Fernwärmenetz über das ganze Jahr mit der für die Warmwassererwärmung notwendigen Temperatur betreibt.

Entsprechend der Vorlauftemperatur, dem Druckverhältnis im Primärnetz und der Toxizität des Kreislaufwassers (Flüssigkeitskategorie 3 oder 4 gemäss Kapitel 4.8.1) muss auf eine adäquate Wärmeübertragung zwischen Kreislaufwasser und Warmwasser geachtet werden.

Entspricht das Kreislaufwasser der Flüssigkeitskategorie 3, kann die Trennung zwischen Kreislaufwasser und Warmwasser einwandig erfolgen.

Flüssigkeiten der Kategorie 4 müssen jedoch doppelwandig getrennt werden. Eine doppelwandige Trennung besteht aus mindestens zwei festen und abgedichteten Bereichen oder Behälter, welche eine neutrale Zwischenzone zwischen dem Warmwasser auf der einen Seite und dem Kreislaufwasser auf der anderen Seite bilden. Die Zwischenzone kann ein Gas, inertes poröses Material oder eine Flüssigkeit der Kategorie 1, 2 oder 3 beinhalten und mit einem visuellen oder akustischen Alarm verbunden sein [88].

Tabelle 8.7 Varianten zur Warmwassererwärmung.

	Durchflusswassererwärmer (Frischwasserstation)	Speicherwassererwärmer (mit internem Wärmeübertrager)	Warmwasserspeicher mit externem Wärmeübertrager
Beschreibung	Beim Durchflusswassererwärmer wird das Warmwasser direkt zum Bedarfszeitpunkt über einen Platten-Wärmeübertrager erwärmt. Anschluss üblicherweise an der Primärseite.	Wassererwärmer in Form eines Behälters mit eingebauten Heizflächen, in denen das Kaltwasser erwärmt und gespeichert wird. Lastspitzen werden über den Speicher abgedeckt. Anschluss üblicherweise an der Sekundärseite.	Diese Variante stellt eine Kombination von Durchfluss- und Speicherprinzip dar. Die Speicherladung erfolgt über einen externen Wärmeübertrager und Ladepumpe (Kreislauf mit Warmwasser). Lastspitzen werden über den Speicher abgedeckt.
Vorteil	Tiefe Rücklauftemperatur Geringe Kosten Geringer Platzbedarf Geringe Bereitschaftsverluste Verminderte Legionellenproblematik	Hohe Zapfmenge möglich Unempfindlich gegen Kalk Geringe Anforderungen an die Regelung	Tiefe Rücklauftemperatur Hohe Zapfmenge möglich Kleine konstante Ladeleistung (Reduzierung des Anschlusswertes) Hoher Nutzungsgrad des Speichers
Nachteil	Hohe Anschlussleistung erforderlich (mit vorgeschaltetem Wärmespeicher vernachlässigbar) benötigt eine gute (aufwändige) Regelung empfindlich bei hohem Kalkgehalt im Wasser	Ansteigende Rücklauftemperatur während des Ladevorganges Wärmeverluste des Speichers Abnehmende Aufheizleistung während des Ladevorganges Legionellenproblematik	Hohe Investitionskosten benötigt eine aufwändige Regelung Wärmeverluste des Speichers Legionellenproblematik

Bei der Umsetzung von Warmwasserversorgungsanlagen mit Trinkwasser in Gebäuden sind die Normen SIA 385/1 [83] und SIA 385/2 [84] anzuwenden. Bei einer Wärmebereitstellung mit Fernwärme ist zusätzlich auf folgende Punkte zu achten:

- Vorgaben der Technischen Anschlussvorschriften
- Minimale und maximale primäre Vorlauftemperatur (bei gleitender oder gleitend-konstanter Fahrweise)
- Maximal zulässige primäre Rücklauftemperatur

Das System der gesamten Warmwassererwärmung ist auf die minimale primärseitige Vorlauftemperatur (Übergangszeit und Sommer) und auf die maximale primärseitige Vorlauftemperatur auszulegen. Dies betrifft insbesondere die Dimensionierung des Wärmeübertragers und die Regelung. Das ganze System ist weiter auf eine möglichst tiefe Primärücklauftemperatur auszulegen. Es gibt für die Warmwassererwärmung grundsätzlich drei verschiedene Varianten:

- Durchflusserwärmer (Frischwasserstation)
- Speicherwassererwärmer (mit internem Wärmeübertrager)
- Warmwassererwärmer mit externem Wärmeübertrager

Die in Tabelle 8.7 beschriebenen Varianten können direkt am Fernwärmenetz (primärseitig) oder indirekt (sekundärseitig) über einen Wärmeübertrager angeschlossen werden.

Beim Durchflusswassererwärmer kann z.B. durch einen vorgeschalteten Warmwasserspeicher die relativ hohe Anschlussleistung kompensiert werden und der Anschluss erfolgt zudem sekundärseitig. Ansonsten ist der Anschluss aus exergetischer Sicht nur sinnvoll, wenn er auf der Primärseite erfolgt. Hat jedoch den Nachteil, dass eine hohe Anschlussleistung erforderlich ist.

Die Speichersysteme sind auch für den Anschluss auf der Sekundärseite (nach dem Hauptwärmeübertrager) geeignet. Die Speichersysteme, insb. die Speicherwassererwärmer mit internem Wärmeübertrager, sollten nach Möglichkeit als Warmwasser-Vorrangschaltung (veraltet: Boilervorrangschaltung) konzipiert werden. Sie garantiert die vorrangige Wärmeversorgung des Warmwasserspeichers gegenüber dem Bedarf für z.B. Raumwärme. Durch die Vorrangschaltung kann die abonnierte Anschlussleistung kleiner definiert werden. Durch ein intelligentes Regelungssystem wird bei der Vorrangschaltung bzw. Warmwassererwärmung die Leistung im Heizkreis nur soweit gesenkt, dass die abonnierte Anschlussleistung gemäss Wärmeliefervertrag nicht überschritten wird und genügend Leistung der Warmwassererwärmung zur Verfügung gestellt wird. Wenn möglich sollte die Warmwassererwärmung auch in die Nachtstunden verlegt werden.

Beim Warmwasserspeicher mit externem Wärmeübertrager sind konstant niedrige Primärücklauftemperaturen möglich. Beim Aufheizen und während des Warmwassers- und Zirkulationswasserentzuges ist auf eine einwandfreie Schichtung des Kalt- und Warmwassers zu achten (z.B. Strömungsgeschwindigkeit bei der Einspeisung maximal 0.1 m/s).

Mit einem zusätzlichen Wärmeübertrager zur Vorwärmung des Kaltwassers kann die primäre Rücklauftemperatur weiter abgesenkt werden und bietet sich als Möglichkeit für alle drei oben genannten Varianten der Warmwassererwärmung an.

8.3 Legionellenproblematik

Die Legionellenproblematik ist ein ernstzunehmendes Phänomen, das insbesondere bei der Speicherung und Verteilung von Warmwasser zu beachten ist. Informationen sind der SIA 385/1 [83] und dem SVGW-Merkblatt [88] zu entnehmen. Die folgenden Ausführungen sind aus [69] zusammengefasst worden.

Legionellen sind stäbchenförmige Bakterien und können in Menschen eine Erkrankung auslösen. Die bekannteste Art der Legionellen ist die Legionella pneumophila, welche auch der Hauptverursacher der meisten Legionellenerkrankungen ist. Allerdings sind diese Bakterien nur gefährlich, wenn mit Legionellen kontaminierte Aerosole in Form feinsten Wassertröpfchen von etwa 5 µm Durchmesser eingeatmet werden und in die Lunge gelangen. Hingegen kann mit Legionellen belastetes Trinkwasser gefahrlos getrunken werden.

Die Legionellenvermehrung tritt hauptsächlich bei Temperaturen von 25°C bis 45°C auf. Ab 55°C beginnen Legionellen abzusterben (Tabelle 8.8). Unter 20 °C sind sie zwar lebens- aber nicht vermehrungsfähig.

Tabelle 8.8 Überlebensdauer von Legionellen [69].

Temperatur °C	Zeit min	Wirkung
55.0	19	Reduktion der
57.5	6	Legionellenzahl um je
60.0	2	eine 10er-Potenz
70.0	einige Sekunden	(D-Wert)

Um Legionellenvermehrung vorzubeugen sind folgende Grundsätze zu beachten:

- Im Warmwasserverteilsystem darf keine unbenutzte Leitung vorhanden sein, die mit Wasser gefüllt ist. Dies gilt insbesondere bei der nachträglichen Stilllegung einer Entnahmestelle.
- Trinkwasser, das bei einer Temperatur von 25°C bis 50°C während mehr als 24 Stunden nicht genutzt wird, muss thermisch desinfiziert, d.h. während einer Stunde auf 60°C erwärmt werden. In Gebäuden mit geringem Risiko wird diese Regel nur empfohlen.
- Die Warmwasserversorgung wird so ausgelegt, dass die Wassertemperatur am Ausgang des Wassererwärmers 60°C beträgt, damit 55°C in den warm gehaltenen Leitungen und 50°C an den Entnahmestellen erreicht werden können.
- Für Durchflusswassererwärmer gelten die Mindesttemperaturen nicht, wenn das Warmwasser im angeschlossenen Warmwasserverteilsystem bis zu seiner Entnahme nicht länger als 24 Stunden bei einer Temperatur von 25°C bis 50°C bleibt.
- Die Warmwassermenge, die gespeichert werden soll, wird knapp ausgelegt (keine überdimensionierten Warmwasserspeicher).
- Behälter mit Warmwasser müssen regelmässig gereinigt, insbesondere entkalkt werden. Rost-, Kalk-

und weitere Ablagerungen begünstigen die Bildung von Biofilmen und dienen Legionellen und anderen Bakterien als Träger für ihre Vermehrung.

- Kaltwasserleitungen sollten so installiert werden, dass eine Erwärmung durch parallellaufende Warmwasser- oder Heizungsleitungen vermieden und eine Kaltwassertemperatur von höchstens 20°C erreicht wird.
- Selten benutzte Entnahmestellen sollten regelmässig gespült werden.

Die **Wassertemperatur in einem Speicher** zur Vorwärmung erreicht systembedingt nicht mehr als 45°C und ist somit im Idealbereich der Legionellenvermehrung. Das erwärmte Trinkwasser sollte so wenig wie möglich in diesem Temperaturbereich sein. Deshalb sollte das Bereitschaftsvolumen des Speichers im Bereich der Nacherwärmung des Trinkwassers nie unter 60°C sinken. Das Bereitschaftsvolumen ist das zu erwartende Spitzenvolumen (gewöhnlich ist dieses Volumen die grösste Stundenspitze) und entspricht dem Volumen, das bis zum Einschaltpunkt der Speicherladung reicht.

Die Nacherwärmung des Trinkwassers kann mit einer Sekundärenergiequelle erfolgen, die immer mindestens die 60 °C erreichen kann.

Um die Abkühlung des Warmwasserleitungssystems bei Stillstandzeiten zu verhindern, sollte die **Zirkulationspumpe oder das Heizband** im Dauerbetrieb laufen. Dies führt jedoch zu erhöhten Wärmeverlusten und kann die Schichtung im Warmwasserspeicher stören.

Beim Einsatz von **Zentralmischorganen** werden Versorgungs- und Ausstossleitungen mit Trinkwassertemperaturen im Idealbereich der Legionellenvermehrung (25°C bis 45°C) betrieben. Aus diesem Grund sind diese Anlagen ohne spezielle Massnahmen (z.B. Ionisierung oder Ozonisierung) für die Risikogruppen 1 und 2 nicht geeignet. Für die Risikogruppe 3 ist empfehlenswert, das Warmwasser in der Installation einmal täglich während mindestens einer Stunde auf 60°C zu erwärmen (Tabelle 8.9).

Tabelle 8.9 Risikogruppen für Gebäude und Anlagen und deren Massnahmen zur Legionellenproblematik [69].

Risiko-gruppe	Beschreibung	Gebäudekategorie	Empfohlene Massnahmen nach SVGW
1 Hohes Risiko	Gebäude bei denen sich die Menschen mit geschwächtem Immunsystem aufhalten. Gebäude mit umfangreichen Rohrleitungssystemen sowie Installationen mit unregelmässiger Wasserentnahme (lange Stagnationszeiten)	Spitäler mit Intensivpflegestationen, Transplantationsabteilung respektive Spezialabteilungen (Onkologie, Neonatologie).	Befolgung der Instruktionen, welche von den Verantwortlichen für die Hygiene zusammengestellt wurden. Routinemässige Warmwassertemperaturkontrolle und bakteriologische Analysen.
2 Mittleres Risiko	In diesen Gebäuden resultieren Risiken überwiegend aus umfangreichen Installationen mit z.T. langen Stagnationsphasen.	Wohnen MFH mit Warmwasser-Zentralversorgungen, Schulen mit Duschen, Hotels, Kasernen, Gefängnisse, Spitäler ohne die oben erwähnten Abteilungen, Alters- und Pflegeheime, Sportbauten, Hallen- und Freibäder	Regelmässige Kontrolle der Warmwassertemperatur (mindestens alle 2 Monate) Einhaltung der Warmwassertemperatur: in der ganzen Aufbereitungsanlage mindestens 60 °C während einer Stunde pro Tag, an den Zapfstellen mindestens 50 °C. Wenn aus technischen Gründen oder in Folge des Energiesparens die Sicherheitstemperaturen nicht eingehalten werden, sind bakteriologische Kontrollen oder Alternativsysteme (Ionisierung, Ozonisierung oder andere) vorzusehen. Wasseranalysen hinsichtlich von Legionellen sind nur bei Auftreten von Krankheitsfällen oder aufgrund der erwähnten Gründen notwendig. Bei Krankheitsfällen und positivem Befund der Wasseranalyse müssen zusätzliche Massnahmen ergriffen werden.
3 Geringes Risiko	Gebäude mit überwiegend langen Stagnationsphasen.	Wohnen EFH, Wohnen MFH ohne Warmwasser-Zentralversorgung, Verwaltung, Schulen ohne Duschen, Verkauf, Restaurants, Versammlungslokale, Lager	Wenn Zweifel an der Hygiene der Trinkwasserinstallationen bestehen, können entsprechende Untersuchungen durchgeführt werden. Massnahmen müssen ergriffen werden bei Auftreten von Krankheitsfällen und positivem Befund der Wasseranalyse.

8.4 Hydraulik

8.4.1 Hydraulisches Grundkonzept

Die Wärmeübergabe kann nach Kapitel 5.2 indirekt über einen Wärmeübertrager oder direkt erfolgen. In der Regel wird heutzutage eine indirekte Wärmeübergabe bevorzugt. Damit eine möglichst tiefe Rücklauf-temperatur erreicht wird, darf die sekundärseitige Hauszentrale und Hausanlage keine hydraulischen Kurzschlüsse zwischen Vor- und Rücklauf aufweisen.

Folgende Einrichtungen sind deshalb unzulässig:

- Offene Expansionsgefässe
- Doppelverteiler (Rohr in Rohr, Vierkant)
- Bypässe (auf Verteiler, bei Verbrauchern etc.)
- Überströmregler und -ventile zwischen Vor- und Rücklauf
- Einspritzschaltungen mit Dreiwegventilen
- Umlenkschaltungen mit Dreiwegventilen
- Vierwegmischer
- Heizregister / Lüftungsanlagen ohne Zonenventil

Tabelle 8.10 Beimischschaltung, Einspritzschaltung mit Durchgangsventil und Drosselschaltung.

	Beimischschaltung	Einspritzschaltung mit Durchgangsventil	Drosselschaltung
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefe Rücklauf-temperatur bei kleiner Last (gut geeignet bei kondensierendem Wärmeerzeuger) • Konstanter Massenstrom mit variabler Vorlauf-temperatur im Verbraucher-kreis, sofern keine Massenstrom-regler (z.B. Thermostat-ventile) bei der Wärme-ab-gabe eingesetzt werden • Variabler Massenstrom über dem Erzeuger-kreis (Pumpe reguliert). • Gleichmässige Temperatur-vertei-lung über dem Heizkreis 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefe Rücklauf-temperatur • Konstanter Massenstrom mit variabler Vorlauf-temperatur im Verbraucher-kreis, sofern keine Massenstrom-regler (z.B. Thermostat-ventile) bei der Wärme-ab-gabe eingesetzt werden • Variabler Massenstrom über dem Erzeuger-kreis (Pumpe reguliert) • Gleichmässige Temperatur-vertei-lung über dem Heizkreis • Bei Einspritzschaltungen mit Durch-gangs-stellorgan muss immer eine Hauptpumpe berücksichtigt werden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefe Rücklauf-temperatur • Variabler Massenstrom über dem Verbraucher und dem Erzeuger-kreis • Langsame Strömungs-geschwindigkeiten bei Teillast • Gleichmässige Temperatur-vertei-lung über dem Heizkreis • Bei Drosselschaltungen mit Durch-gangs-stellorgan muss immer eine Hauptpumpe berücksichtigt werden
Einsatzgebiet	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung von Heizkörper- und Fussbodenheizungen • Anlagen mit Niedertemperatur-Wärme-erzeugern (kondensierende Wärme-erzeugung; Brennkessel) oder Wärmepumpen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fernwärmeanschlüsse (direkt / indirekt) • Regelung von Heizkörper- und Fuss-bodenheizungen • Anlagen mit Niedertemperatur-Wärme-erzeugern (kondensierende Wärme-erzeugung; Brennkessel) oder Wärmepumpen • Brauchwarmwassererwärmung mit max. Temperaturbegrenzung bei hartem Wasser oder max. Rücklauf-temperatur-begrenzung • Lüfterhitzer (Heizregister) mit Einfrier-gefahr 	<ul style="list-style-type: none"> • Fernwärmeanschlüsse (indirekt) • Wärmespeicher • Zonen-Regelung von Heizkörper- und Fussbodenheizungen • Einzelraumregelung (z.B. über Thermo-stat-ventile) • Kühlregister in grossen Systemen • Lüfterhitzer (Heizregister) • Anlagen mit Niedertemperatur-Wärmeerzeugern (kondensierende Wärmeerzeugung; Brennkessel)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefe Rücklauf-temperaturen • Gute Regelbarkeit beim Einsatz auf drucklosen oder druckarmen Verteilern • Mehrere Heizkreise beeinflussen sich weniger (einfacherer Abgleich, stabiler) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefe Rücklauf-temperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefe Rücklauf-temperaturen • Einfache Einzelraumregelung über Thermostatventile
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • primärseitig kein Differenzdruck erlaubt (druckarmer Verteiler) 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von min. zwei Umwälzpumpen • Verteiler muss differenzdruckbehaftet sein 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfriergefahr bei Lüfterhitzer (Register) • Verteiler muss differenzdruckbehaftet sein

8.4.2 Grundsaltungen

Praktisch alle Schaltungen in der Gebäudetechnik beruhen auf folgenden hydraulischen Grundsaltungen:

- Beimischschaltung
- Umlenkschaltung
- Einspritzschaltung
- Drosselschaltung

In den folgenden Ausführungen wird nur auf die Beimischschaltung, die Einspritzschaltung mit Durchgangsventil und die Drosselschaltung eingegangen (Tabelle 8.10). Diese sind heute die am häufigsten eingesetzten Schaltungen in der Gebäudetechnik. Die Einspritzschaltung mit Durchgangsventil und die Drosselschaltung werden als Grundsaltungen für den primärseitigen Fernwärmeanschluss eingesetzt.

8.4.2.1 Beimischschaltung

Heizgruppen auf der Sekundärseite (druckarmer Verteiler) werden bevorzugt als Beimischschaltung ausgeführt. Dabei wird das Rücklaufwasser mit dem Vorlaufwasser auf die gewünschte Vorlauftemperatur der Heizgruppe gemischt. Die gewünschte Vorlauftemperatur der Heizgruppe ist mit der Heizkurve definiert und abhängig von der Aussentemperatur. Beim Einsatz von Thermostatventilen wird der Massenstrom im Wärmeabgabekreislauf variabel, deshalb sind zwingend geregelte Umwälzpumpe einzusetzen. Ist die vom Fernwärmelieferanten gelieferte primäre Vorlauftemperatur bei Auslegebedingungen höher als die geforderte sekundäre Vorlauftemperatur in der Heizgruppe (z.B. Fussbodenheizung), muss bei der Beimischschaltung auf der Sekundärseite ein **interner Bypass** eingebaut werden. Als Faustregel ist ein interner Bypass notwendig, wenn das folgende Temperaturverhältnis (Vorlauf Verteilung – Rücklauf Heizkreis)/(Vorlauf Heizkreis – Rücklauf Heizkreis) größer 2.5 ist. Durch das stetige Beimischen des abgekühlten Rücklaufwassers via Bypass sinkt die Vorlauftemperatur und damit steht dem Stellorgan der komplette Hub für die Regulierung zur Verfügung. Dadurch wird die Regulierfähigkeit des Stellorgans optimal ausgenutzt.

8.4.2.2 Einspritzschaltung mit Durchgangsventil

Bei differenzdruckbehafteten Verteilern wird durch die Pumpe im Erzeugerkreis (z.B. Fernwärmepumpe im Primärkreislauf) dem Verbraucherkreis eine Druckdifferenz zur Verfügung gestellt. Und je nach Stellung des Durchgangsventils wird mehr oder weniger Vorlaufwasser des Wärmelieferanten (Wärmeerzeuger, Primärkreis) dem Wärmeabnehmer eingespritzt. Somit entsteht im Verbraucherkreis eine Temperaturregelung mit konstantem Durchfluss und im Verbraucherkreis eine Mengenregelung mit variablem Durchfluss. Aus diesem Grund sollte zwingend eine drehzahleregelte Netzpumpe eingesetzt werden.

Bei direkten Anschlüssen an ein Fernwärmenetz wird daher vorzugsweise eine Einspritzschaltung mit Durchgangsventil eingesetzt. Dadurch kann im Teillastbetrieb

eine hohe Rücklauftemperatur vermeiden werden. Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Warmwassererwärmung, damit kann bei hartem Wasser ein Verkalken der Sekundärseite des Wärmeübertragers durch eine zu hohe primärseitige Vorlauftemperatur vermieden werden.

8.4.2.3 Drosselschaltung

Die Drosselschaltung ist wie die Einspritzschaltung eine differenzdruckbehaftete hydraulische Schaltung und wird z.B. bei indirekten Fernwärmeanschlüssen auf der Primärseite eingesetzt.

Im Gegensatz zur Einspritzschaltung mit Durchgangsventil ergibt sich im Verbraucherkreis eine Mengenregelung mit variablem Durchfluss. Aus diesem Grund sollte ebenfalls eine drehzahleregelte Netzpumpe eingesetzt werden.

8.4.3 Regelventil

In allen Grundsaltungen werden Regelventile in unterschiedlichen Bauformen eingesetzt:

- Durchgangsventile mit einem Eingang und einem Ausgang
- Dreibegeventile mit zwei Eingängen und einem Ausgang (Mischventile) oder einem Eingang und zwei Ausgängen (Verteilventile, eher selten eingesetzt).

Zur Bestimmung des Druckverlustes von Regelventilen und zur Auslegung der Hydraulik muss zuerst der Durchflusskennwert k_{VS} - und k_V -Wert bestimmt werden.

Bei Regelventilen und allgemein bei regelbaren Armaturen wird der Druckverlust nicht mit Einzelwiderständen, wie bei normalen Armaturen oder Rohreinbauten, sondern mit dem sogenannten **k_{VS} -Wert** berechnet. Die Hersteller der Regelventile geben daher zu jedem Regelventil einen k_{VS} -Wert an. Der entspricht einem Volumenstrom in m^3/h zwischen Ein- und Ausgang des vollständig offenen Regelventils bei 1 bar Druckverlust ($\Delta p_{V100} = 1 \text{ bar}$). Dieser Zusammenhang gilt für kaltes Wasser bei einer Temperatur zwischen 5°C bis 30°C . Mit steigender Temperatur nimmt die Dichte von Wasser ab, Wasser bei 100°C hat eine um rund 4 % geringere Dichte als bei 20°C , dies muss bei hohen Wassertemperaturen berücksichtigt werden.

Über den k_{VS} -Wert kann für den Auslegefall bei vollständig geöffnetem Regelventil der Druckverlust bestimmt werden und im Umkehrschluss kann daraus das Regelventil korrekt ausgelegt werden.

$$k_{VS} = \frac{\dot{V}_{\max}}{\sqrt{\Delta p_{V100}}}$$

$$\Delta p_{V100} = \left(\frac{\dot{V}_{\max}}{k_{VS}} \right)^2$$

max entspricht dem maximalen Volumenstrom im Auslegefall

Wenn das Ventil bei einem bestimmten Hub steht (Hub zwischen 0 % – 100 %), bezeichnet der **k_V -Wert** eines Ventils den Volumenstrom in m^3/h , der sich bei einem Druckunterschied zwischen Ein- und Ausgang eines Ventils von 1 bar einstellt (Teillastfall).

$$k_v = \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta p}}$$

Das hydraulische Verhalten der Regelventile wird durch die sogenannte Grundkennlinie (Hub in Funktion des Durchflusses) beschrieben. Sowohl Durchgangs- als auch Dreiwegeventile werden üblicherweise mit zwei unterschiedlichen Grundkennlinien angeboten:

- Lineare Grundkennlinie: gleiche Hubänderungen haben gleiche Durchflussänderungen zur Folge
- Gleichprozentige Grundkennlinie: gleiche Hubänderungen ergeben eine prozentual gleich grosse Änderung des aktuellen Durchflusses.

In Bild 8.2 ist eine lineare und eine gleichprozentige Grundkennlinie für ein Regelventil dargestellt. Bei offenem Ventil (d.h. maximalen Hub H_{100}) wird der grösste k_v -Wert erreicht, der als k_{vS} -Wert bezeichnet wird. Beim Öffnen des Ventils (kein Hub) ergibt sich ein Mengensprung von ungefähr 1 % bis 5 % von k_{vS} . Ventile sollten daher knapp ausgelegt sein, damit nicht in diesem Bereich reguliert werden muss.

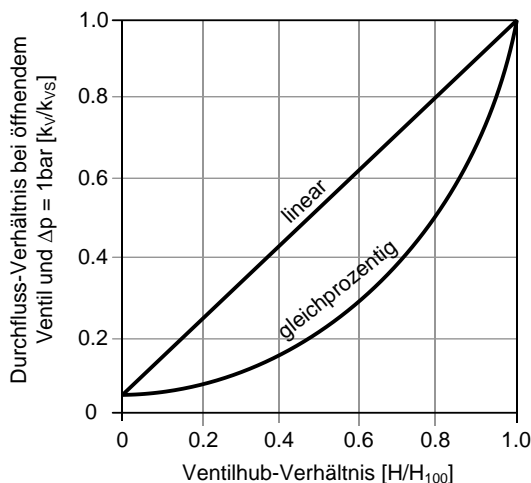


Bild 8.2 Grundkennlinie von Regelventilen (lineare und gleichprozentige Kennlinie)

Bei einer **linearen** Grundkennlinie ergeben sich bei gleichen Änderungen des Ventilhubes ΔH gleiche Änderungen des k_v -Wertes. Bei einer **gleichprozentigen** Grundkennlinie ergeben sich bei gleichen Änderungen des Ventilhubes ΔH gleiche prozentuale Änderungen des jeweiligen k_v -Wertes.

Bei der Auslegung der Ventile spielt neben der Ventilautorität auch das Übertragungsverhalten allfälliger Wärmeübertrager im Regelkreis eine Rolle, welches durch den Wärmeübertrager-Kennwert a (a -Wert) ausgedrückt wird. Da die Berechnung des a -Wertes relativ aufwändig ist, wird diesem üblicherweise durch die geeignete Wahl der Grundkennlinie des Regelventils Rechnung getragen. Diese Vereinfachung ist in der Regel zulässig, solange gleichzeitig eine Ventilautorität von $\geq 0,5$ eingehalten wird. Damit gilt folgende vereinfachte Regel zur Wahl der Grundkennlinie:

- Regelkreis ohne Wärmeübertrager = Regelventil mit linearer Grundkennlinie (siehe Bild 8.2)
- Regelkreis mit Wärmeübertrager = Regelventil mit gleichprozentiger Grundkennlinie (siehe Bild 8.2).

8.4.4 Ventilautorität

Wenn ein Ventil in eine hydraulische Schaltung eingebaut wird, verhält es sich nicht mehr entsprechend der Grundkennlinie, weil die Druckdifferenz über dem Ventil zu einem variablen Teil des Gesamtdruckgefälles der Anlage wird. Dies hat zur Folge, dass die Grundkennlinie mehr oder weniger deformiert wird. Mit zunehmender Deformation werden die Genauigkeit und die Geschwindigkeit der Regelung immer mehr beeinträchtigt. Im Extremfall wird der Regelkreis instabil und beginnt zu schwingen. Als Mass für die Deformation der Grundkennlinie wird die Ventilautorität herangezogen, die wie folgt definiert ist:

Die **Ventilautorität** ist das Verhältnis zwischen der Druckdifferenz über dem Regelquerschnitt des geöffneten Ventils bei Nenndurchfluss Δp_{V100} und der maximal auftretenden Druckdifferenz über dem Regelquerschnitt des geschlossenen Ventils, wenn dieses gerade zu öffnen beginnt Δp_{V0} .

Dabei spielt der Druckabfall über demjenigen Teil der Schaltung eine wichtige Rolle, dessen variabler Durchfluss durch das Ventil beeinflusst wird (in Tabelle 8.10 fett hervorgehoben).

Bei den Schaltungen mit **Dreiwegeventilen** treten keine Probleme auf, solange gilt:

$$P_v = \frac{\Delta p_{V100}}{\Delta p_{V100} + \Delta p_{var100}} \geq 0.5$$

Bei 100 % Durchfluss muss der Druckabfall über dem offenen Dreiwegeventil (Δp_{V100}) gleich gross oder grösser sein als der Druckabfall über der Strecke mit variablem Durchfluss (Δp_{var100}): **$\Delta p_{V100} \geq \Delta p_{var100}$** .

Bei Schaltungen mit **Durchgangsventilen** treten keine Probleme auf, solange gilt:

$$P_v = \frac{\Delta p_{V100}}{\Delta p_{V0}} \geq 0.3$$

Eine Ventilautorität $P_v \geq 0,5$ gilt streng genommen auch hier als Zielwert, bei Durchgangsventilen muss jedoch oft der Grenzwert $P_v \geq 0,3$ gewählt werden. Der Druckabfall über dem offenen Durchgangsventil bei 100 % Durchfluss (Δp_{V100}) muss mindestens 30 % der maximal auftretenden Druckdifferenz (oder mindestens 3000 Pa betragen) über dem geschlossenen Ventil sein, wenn dieses gerade zu öffnen beginnt (Δp_{V0}):

$$\Delta p_{V100} \geq 0,3 \Delta p_{V0}$$

Da sich der notwendige Druckabfall Δp_{V100} somit aus Δp_{V0} ergibt, reduziert sich das Problem auf die Frage, was als maximal auftretende Druckdifferenz über dem geschlossenen Ventil Δp_{V0} eingesetzt werden soll. Im ungünstigsten Fall (ungeregelte Pumpe) ist dies die

maximale Förderhöhe der Pumpe bei Nulldurchfluss, also ein sehr hoher Wert, speziell bei Pumpen mit steilen Kennlinien. Wesentlich tiefere Werte ergeben sich, wenn folgendes beachtet wird:

- Denjenigen Betriebspunkt exakt definieren, der als ungünstigster Fall für die maximal auftretende Druckdifferenz angenommen wird. (Auch kumulativ zu den übrigen Möglichkeiten).
- Fernleitungspumpe mit Konstantdruckregelung einsetzen. Dies ergibt eine vollständig flache Pumpenkennlinie (siehe Kapitel 3.3.3).
- Messort für die Differenzdruckregelung der Fernleitungspumpe im Wärmenetz anstatt über der Pumpe vorsehen (siehe Kapitel 3.5).
- Fernleitungspumpe mit Proportionaldruckregelung einsetzen (siehe Kapitel 3.3.3).
- Automatische Druckdifferenzregler beim Wärmeabnehmer einbauen. Der Sollwert solcher Regler lässt sich in der Regel zwischen 10 und 100 kPa einstellen. Damit können zwar problemlos vernünftige Regelventilauslegungen realisiert werden, aber es sind auch grössere Anschlussdruckdifferenzen notwendig (siehe Kapitel 8.4.5.2).
- Sogenannte Kombiventile (druckunabhängige Regelventile) einbauen. Bei dieser Bauart sind Druckdifferenzregler ohne Hilfsenergie und Regelventil in einem Gehäuse realisiert. Die Druckdifferenzmessung für die hydraulische Regulierung des Ventils erfolgt hier direkt über dem Regelventil (siehe Kapitel 8.4.5.3).

Hinweis:

Oft werden mehrere Gruppen als Beimischschaltung druckdifferenzarm angeschlossen. Das heisst, jede Gruppenpumpe holt sich das Wasser über das Ventil und die Strecke mit variablem Durchfluss selbst. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage: «Wie gross darf die Druckdifferenz über der Strecke mit variablem Durchfluss maximal sein?» Wenn nämlich diese Druckdifferenz allzu gross wird, beeinflussen sich die einzelnen Gruppen (Pumpen) gegenseitig. Um dies zu verhindern gilt es – zusätzlich zur Regel über die Ventilautorität – die nachfolgende Regel einzuhalten:

Wenn mehrere Gruppen druckdifferenzarm als Beimischschaltung angeschlossen werden, dann darf die maximale Druckdifferenz über der Strecke mit variablem Durchfluss nicht grösser als 20 % der Förderhöhe der kleinsten Gruppenpumpe im Auslegepunkt sein.

8.4.4.1 Automatischer Druckdifferenzregler

Heutzutage werden in Wärmenetzen oft automatische Druckdifferenzregler beim Wärmeabnehmer eingebaut. Der Sollwert solcher Regler lässt sich in der Regel zwischen 10 und 100 kPa einstellen. Damit können zwar problemlos vernünftige Regelventilauslegungen realisiert werden, aber es sind auch grössere Anschlussdruckdifferenzen notwendig. Für die Auslegung der Druckdifferenzregler und Regelventile ist entscheidend, wie gross die Druckdifferenzschwankungen im Wärmenetz sind. Entscheidend für die Rohrnetzberechnung ist der Weg zum massgebenden, in der Regel der entfernteste Wärmeabnehmer. Daraus ergeben sich folgende Empfehlungen:

- Der Einsatz von Druckdifferenzreglern ohne Hilfsenergie ist sinnvoll, wenn bei jedem Wärmeabnehmer klar definierte Druckverhältnisse herrschen sollen.
- Wärmeübertrager am ungünstigsten gelegenen Wärmeabnehmer auf einen möglichst kleinen Druckabfall auslegen. Druckabfall über dem Regelventil entsprechend einer Ventilautorität 0,3...0,5 auslegen.
- Maximal mögliche Druckdifferenz über dem fast geschlossenen Druckdifferenzregler, der gerade zu öffnen beginnt, realistisch berechnen:
 - Bei kleinen Wärmenetzen den theoretisch möglichen Höchstwert zur Berechnung der Ventilautorität verwenden und eine genügend hohe Ventilautorität $\geq 0,2$ bis $0,3$ realisieren
 - Bei grossen Wärmenetzen, bei denen die vielen angeschlossenen Wärmeabnehmer zusammen eine mehr oder weniger gleichmässige witterungsabhängige Last ergeben, kann mit einem tieferen Wert für die maximal auftretende Druckdifferenz gerechnet werden (z.B. 50 %) oder eine entsprechend schlechtere Ventilautorität (z.B. $\geq 0,1$ bis $0,15$) akzeptiert werden.
- Bei näher gelegenen Wärmeabnehmern genügend Druckabfall über dem geöffneten Druckdifferenzregler vorsehen (Auslegefall), weil dort immer eine genügend grosse Anschlussdruckdifferenz zur Verfügung steht.
- Bei Anlagen mit Druckdifferenzmessung im Netz oder Pumpen mit Proportionaldruckregelung kann es bei kleiner Last der Gesamtanlage vorkommen, dass Wärmeabnehmer am Anfang des Netzes plötzlich zu wenig Druckdifferenz für den Vollastfall haben. Hier ist es sinnvoll, die Ventilautorität nicht unnötig hoch zu wählen.

8.4.4.2 Differenzdruckunabhängiges Regelventil (Kombiventil)

Beim Kombiventil sind Druckdifferenzregler ohne Hilfsenergie und Regelventil in einem Gehäuse realisiert (Bild 8.4). Die Druckdifferenzmessung erfolgt hier direkt über dem Regelventil. Damit ist die Ventilautorität des Regelventils nur vom P-Band des Druckdifferenzreglers

abhängig. Der gesamte Druckabfall über dem Kombiventil setzt sich somit wie folgt zusammen:

$$\Delta p \text{ Kombiventil} = \Delta p \text{ Regelventil} + \Delta p \text{ Druckdifferenzregler}$$

Die Druckdifferenz über dem Regelventil ist durch den Hersteller fest vorgegeben (z.B. 20 kPa), und der Druckabfall über dem Druckdifferenzregler ist durch dessen k_{vs} -Wert gegeben. Auch hier gilt, dass bezüglich des Druckdifferenzreglers eine minimale Ventilautorität eingehalten werden muss.

Kombiventile haben den Vorteil, dass Druckdifferenzregler und Regelventil preisgünstig in einem einzigen Gehäuse untergebracht sind. Ansonsten gelten die obigen Ausführungen zum automatischen Druckdifferenzregler mit dem Unterschied, dass die Druckdifferenzmessung direkt über dem Regelventil erfolgt.

8.4.5 Systeme bei variablen Netzen

Energieeffiziente hydraulische Systeme sind so geplant und gebaut, dass viele Teilstrecken mit einem variablen Massenstrom durchströmt werden. Dies bedeutet, dass der geförderte Massenstrom auf die Betriebsverhältnisse reagiert und in der Folge auch die Umwälzpumpe die Drehzahl anpasst. In diesem Kapitel wird das Verhalten des hydraulischen Systems erläutert, wenn bei Verbrauchern die Regelventile öffnen und schliessen. Details sind in [70] ausgeführt und daraus nachfolgend zusammengefasst.

8.4.5.1 Statischer hydraulischer Abgleich

Beim statischen hydraulischen Abgleich besteht eine Aufgabenteilung zwischen:

- dem **Reguliertventil** mit einer klar regeltechnisch ausgerichteten Aufgabe und
- dem **Abgleichventil** mit einer klar hydraulischen Aufgabe des statischen Abgleichs.

Das statische Abgleichventil (Strangreguliertventil) dient zur manuellen Einregulierung von hydraulischen Systemen. Die Ventile verfügen über eine integrierte Voreinstellfunktion zur präzisen Bestimmung der Durchflussmenge. Strangreguliertventile haben dabei feste Voreinstellungen. Die Merkmale des statischen Abgleichs sind:

- Der statische hydraulische Abgleich verursacht in Kälte- und Wärmeversorgungen Unter- und Überversorgung der Verbraucher.
- Im Teillastbereich beeinflussen die unterschiedlichen Massenströme die Rücklauftemperaturen auf den Wärmeerzeuger.
- Es kann durch hohe Überversorgung ein Ansteigen (grosser Massenstrom, kleines ΔT) und durch Unter-versorgung (kleiner Massenstrom, grosses ΔT) ein Abfallen der Rücklauftemperatur zur Folge haben.
- Je nach hydraulischer Einbindung des Wärmeerzeugers kann dies einen Einfluss auf den Wirkungsgrad oder die Vorlauftemperatur haben.
- Die Netze können im Teillastfall ausgeglichener gestaltet werden, wenn die Pumpen auf Druck = konstant reguliert werden. Diese Massnahme geht je-

doch zu Lasten der Energieeffizienz und des Strombedarfs für die Umwälzpumpe.

Wegen den grundlegenden Nachteilen ist die Art von Hydraulik mit statischem Abgleich und Regulierung nicht mehr zeitgemäss, weder für Fernwärmenetze noch für die interne Wärmeverteilung.

8.4.5.2 Hydraulischer Abgleich mit automatischen Differenzdruckregler

Beim hydraulischen Abgleich mit einem automatischen Differenzdruckregler besteht folgende Aufgabenteilung:

- dem **Reguliertventil** mit einer klar regeltechnisch ausgerichteten Aufgabe und
- einem dynamischen **Abgleichventil** mit einer klar hydraulischen Aufgabe des hydraulischen Abgleichs in jedem Betriebsfall.
- mit jedem automatischen Differenzdruckventil wird der Druck über dem Verbraucher und dem Regelventil in jedem Betriebsfall (Teillastbetrieb) konstant gehalten.

In hydraulischen Systemen können die Druckverhältnisse zwischen einzelnen Verbrauchern und Strängen stark schwanken, je nachdem, welchen Leistungsbedarf die einzelnen Verbraucher benötigen. Es ist daher notwendig, in den einzelnen Anlagenabschnitten gleichmässige Druckverhältnisse herzustellen, unabhängig vom Bedarf der einzelnen Verbraucher. Im Primärkreislauf eines Fernwärmenetzes ist die Unterstation ein Beispiel für einen derartigen Verbraucher. Beispiele im Sekundärkreislauf sind Steigstränge, Heizkörper, Deckenkühlflächen, Fussbodenheizungsverteiler, Fan-coils, Induktionsgeräte oder Lufterhitzer.

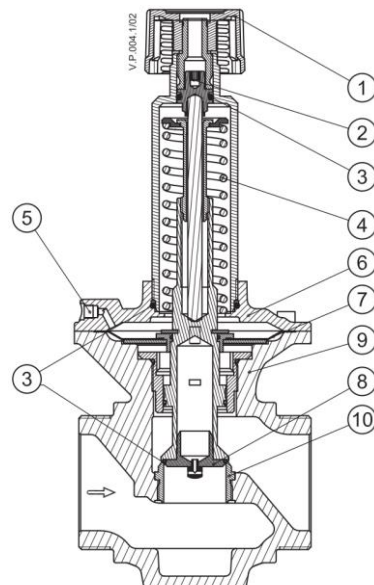


Bild 8.3 Schnitt automatischer Differenzdruckregler ASV (Danfoss).

Automatische Differenzdruckregler sichern einen konstant einstellbaren Differenzdruck über einen Anlagenabschnitt. Über eine interne Verbindung und gemeinsam

mit der Sollwertfeder wirkt der Druck im Rücklauf auf die Unterseite der Regelmembran (Bild 8.3; 7), während über eine Impulsleitung (Bild 8.3; 5) der Vorlaufdruck von oben auf die Membran wirkt. Mit der eingestellten Federkraft wird vom Differenzdruckventil der eingestellte Differenzdruck im nachfolgenden Anlagenabschnitt konstant gehalten. Im Rücklauf sind automatische Differenzdruckregler einzubauen, die mit einem Partnerventil (Strangreguliertventil) im Vorlauf kombiniert werden. Automatische Differenzdruckregler begrenzen den Differenzdruck nicht nur unter Auslegebedingungen, sondern auch bei Teillast.

Durch die Regelung des Drucks im Teillastfall lassen sich Durchflussgeräusche in Armaturen vermeiden. Die Regelung des Differenzdrucks erlaubt den nachfolgenden Regelarmaturen, zum Beispiel Thermostatventile, eine höhere Ventilautorität und somit eine präzisere und stabilere Temperaturregulierung sowie Energie zu sparen.

Die wichtigsten Merkmale des hydraulischen Abgleichs mit automatischen Differenzdruckregler sind:

- Der Abgleich verursacht praktisch keine Unter- und Überversorgung.
- Der automatische Differenzdruckregler übernimmt den hydraulischen Abgleich im Teillastbetrieb und reagiert auf die Massenstromveränderungen.
- Die Regulierung der Wärmeübertrager oder Gruppen bei Wärmeabgabesystemen muss weniger auf die hydraulische Veränderung reagieren und regulieren stabiler und energieeffizienter.
- Die unterschiedlichen Massenströme haben einen geringen Einfluss auf die Rücklauftemperaturen und somit auf den Wärmeerzeuger.
- Der Wirkungsgrad oder die Vorlauftemperatur der Wärmeerzeuger wird nicht durch unkorrekten hydraulischen Abgleich im Teillastbetrieb beeinflusst.
- Der Pumpenregelkennlinie ist grosse Bedeutung zu schenken, damit im Teillastverhalten die Verbraucher mit grossem Kälte- und Wärmebedarf nicht einem zu geringen Druck ausgesetzt und damit unterversorgt werden.

8.4.5.3 Hydraulischer Abgleich mit differenzdruckunabhängigem Regelventil (Kombiventil)

Mit dem hydraulischen Abgleich mit differenzdruckunabhängigen Regelventilen (Kombiventil) wird nicht mehr die Aufgabenteilung zwischen dem Regelventil und einem statischen oder automatischen Abgleichventil betrachtet. In diesem System sind die regeltechnischen und hydraulischen Funktionen in einem dynamischen Ventil integriert. Mit dem Kombiventil wird der Druck über dem Verbraucher und dem Regelventil in jedem Betriebsfall (Teillastbetrieb) mit einem Ventil konstant gehalten.

Das Kombiventil (Bild 8.4) besteht aus einem Differenzdruckregler und einem Regelventil.

Der **Differenzdruckregler** hält einen konstanten Differenzdruck über dem Regelventil. Dem Differenzdruck Δp_{cv} ($p_2 - p_3$) an der Membran wirkt die Kraft der Feder entgegen. Verändert sich der Differenzdruck über dem Regelventil (weil sich der verfügbare Druck verändert oder aufgrund einer Aktion des Regelventils), schiebt sich der Hohlkonus in eine neue Position, die zu einem erneuten Gleichgewicht führt und damit den Differenzdruck auf einem konstanten Niveau hält.

Das **Regelventil** weist eine lineare Charakteristik auf. Es verfügt über eine Voreinstellung des k_v -Wertes in Form einer maximalen Begrenzung des Ventilhubes. Der auf der Skala gezeigte Prozentwert entspricht dem prozentualen Anteil der Durchflussmenge. Mit dem in diesem Beispiel gezeigte Ventil von Danfoss (AB-QM) lässt sich die Einstellung verändern, indem die Vor-einstellung angehoben wird und den oberen Teil des Ventils in die gewünschte Position (den auf der Skala angezeigte Prozentwert) dreht. Ein Sperrmechanismus verhindert das unbeabsichtigte Verstellen des Ventils.

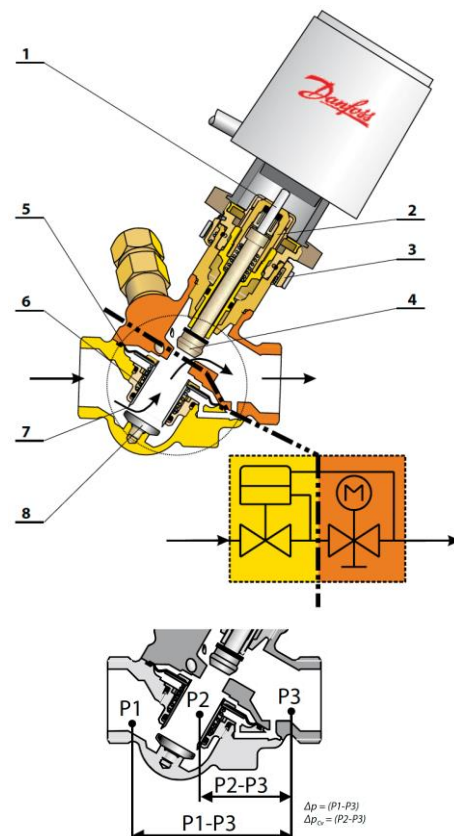


Bild 8.4 Schnitt durch ein differenzdruckunabhängiges Regelventil AB-QM (Danfoss). Das Ventil besteht aus einem Differenzdruckregler (gelb) und einem Regelventil (orange).

Wie oben beschrieben wird die Druckdifferenz über das Regelventil konstant gehalten. Der Druckverlust über dem Regelventil ist demnach im Auslegefall und in allen Teillastfällen konstant. In der Folge kann von einer **konstanten Ventilautorität** $P_v = 1.0$ ausgegangen werden. Der Druckabfall über den variablen Teil der Teilstrecke

ist nicht relevant, weil der Druckabfall über das Regelventil konstant gehalten wird.

Die wichtigsten Merkmale des hydraulischen Abgleichs mit Kombiventilen sind:

- Der Abgleich verursacht praktisch keine Unter- und Überversorgung der Verbraucher.
- Das differenzdruckunabhängige Regelventil übernimmt den hydraulischen Abgleich im Teillastbetrieb und reagiert auf die Massenstromänderungen.
- Die Regulierung der Wärmeübertrager oder Gruppen bei Wärmeabgabesystemen muss nicht auf die hydraulische Veränderung reagieren und regulieren stabiler und energieeffizienter.
- Die unterschiedlichen Massenströme haben keinen negativen Einfluss auf die Rücklauftemperaturen und somit auf den Wärmeerzeuger.
- Der Wirkungsgrad oder die Vorlauftemperatur der Wärmeerzeuger wird nicht durch unkorrekten hydraulischen Abgleich im Teillastbetrieb beeinflusst.
- Der Pumpenregelkennlinie ist grosse Bedeutung zu schenken, damit im Teillastverhalten die Verbraucher mit grossem Kälte- und Wärmebedarf nicht einem zu geringen Druck ausgesetzt und damit unterversorgt werden.
- Die technischen Daten von Geräten aller Hersteller sollten von einem neutralen Messinstitut verifiziert und veröffentlicht sein.

8.4.5.4 Vergleich der Systeme zum hydraulischen Abgleich

Über- oder Unterversorgung

Die Systeme mit automatischem Differenzdruckregler bzw. Kombiventil ergeben praktisch keine Unter- oder Überversorgung durch den Massenstrom. Somit unterscheidet sich die Temperaturdifferenz und als Folge auch die Rücklauftemperatur im Teillastbetrieb nicht vom Sollwert. Die Wärmeerzeuger können ohne Energieeffizienzverlust betrieben werden.

Pumpendruck

Die Systeme mit automatischem Differenzdruckregler bzw. Kombiventil benötigen in etwa die gleichen Förderdrücke und elektrische Leistungsaufnahme der Pumpen. Somit können beide Systeme mit etwa den gleichen energieeffizienten Pumpen ausgerüstet werden. Systeme mit statischem Abgleich brauchen viel höhere Pumpenleistungen und damit Strom. Unsachgemässe hydraulische Auslegung führt deshalb zu hohem Stromverbrauch über Jahre oder Jahrzehnte.

Pumpenregelkennlinie

Systeme mit **statischem Abgleich** können in der Regel mit konstant geregelten Pumpenregelkennlinien betrieben werden. Dadurch kann die Unterversorgung der Verbraucher vermieden werden. Dieses hydraulische System sollte in modernen variablen Massenstromsystemen nicht mehr eingesetzt werden.

Systeme mit **automatischen Differenzdruckreglern** können in der Regel mit proportional geregelten Pumpenregelkennlinien betrieben werden, wobei dem Minimalförderdruck im Teillastbereich bei allen Verbrauchern genügend Beachtung geschenkt werden muss.

Systeme mit **Kombiventil** können in der Regel mit proportional geregelten Pumpenregelkennlinien betrieben werden, wobei dem Minimalförderdruck im Teillastbereich bei allen Verbrauchern genügend Beachtung geschenkt werden muss.

Tabelle 8.11 Pumpenregelkennlinien bei den verschiedenen Regel- und hydraulischen Abgleichsystemen. *Minimalförderdruck im Teillastfall beachten

Hydraulischer Abgleich	Pumpenregelkennlinie
statischer Abgleich	konstant
automatischer Differenzdruckregler	proportional*
differenzdruckunabhängiges Regelventil	proportional*

Volumenstrombedarf bei Teillast

Das System mit Kombiventil benötigt im Teillastbetrieb einen kleineren Volumenstrom, weil die Ventilautorität höher ist. Somit kann aufgrund des reduziert notwendigen Volumenstroms elektrische Pumpenenergie eingespart werden.

Systeme mit statischem Abgleich sind hydraulisch ineffizient und in modernen variablen Massenstromsystemen nicht weiter einzusetzen.

Für hydraulische Systeme, in denen Armaturen mit einer minimal notwendigen Druckdifferenz eingebaut sind, ist zu klären, ob diese Druckdifferenzen auch im Teillastbetrieb einzuhalten sind. Dies hat einen entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der Pumpenregelkennlinie.

Teilsysteme einer Gesamtanlage können auch im Teillastbetrieb der Gesamtanlage nahe dem Auslegepunkt arbeiten und somit fast den Auslegevolumenstrom benötigen. Somit kann bei zu tiefer Pumpenregelkennlinie bei allen hydraulischen Systemen eine Unterversorgung eintreten.

Der Wahl der Pumpenregelkennlinie muss in variablen hydraulischen Systemen erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

8.5 Standard-Schaltungen

Eine Übersicht der Anschlussmöglichkeiten für Fernwärmeanschlüsse ist in Bild 8.5 zu sehen. Es wird folgendermassen unterteilt:

- Anschluss direkt oder indirekt
- mit oder ohne Warmwassererwärmung
- Art der Warmwassererwärmung (Durchflusswassererwärmer und Warmwasserwärmer mit internem oder externem Wärmeübertrager)
- Anschluss der Warmwassererwärmung am primären oder sekundären Kreislauf.

Im Kapitel 5.2 wird grundsätzlich auf direkte und indirekte Anschlüsse eingegangen. Auf den folgenden Seiten werden die wichtigsten Standard-Schaltungen für den direkten und indirekten Fernwärmeanschluss schematisch dargestellt und kurz beschrieben. Bei der schematischen Darstellung wird durchwegs ein differenzdruckunabhängiges Regelventil (Kombiventil) zur Volumenstrom- und Differenzdruckregelung eingesetzt. Alternativ kann die Volumenstrom- und Differenzdruckregelung auch über ein separates Durchgangsventil zur

Volumenstromregelung und einen Differenzdruckregler erfolgen.

Die Schemas werden nicht bis ins letzte Detail dargestellt, auf eine detaillierte Darstellung der Mess- und Regeltechnik (z.B. Regler und Wirklinien) wurde einfachheitshalber verzichtet.

Zusätzlich werden unterschiedliche Standard-Schaltungen für die Warmwassererwärmung gezeigt. In den Schemas werden hauptsächlich die beiden Warmwasserspeicher mit internem oder externem Wärmeübertrager näher betrachtet. Die Warmwasserspeicher sind grundsätzlich über eine Warmwasser-Vorrangschaltung (veraltet: Boilervorrangschaltung) zu laden. Alternativ kann die Ladung auch parallel erfolgen. Die parallele Ladung der Warmwasserspeicher ist regelungstechnisch aufwändiger und kostenintensiver. Zudem muss die Anschlussleistung dementsprechend ausgelegt sein, hat aber Vorteile bei einem erhöhten Warmwasserbedarf (z.B. Spital oder Altersheim).

Weiter sind auch zwei Schaltungen mit Strahlpumpen aufgeführt.

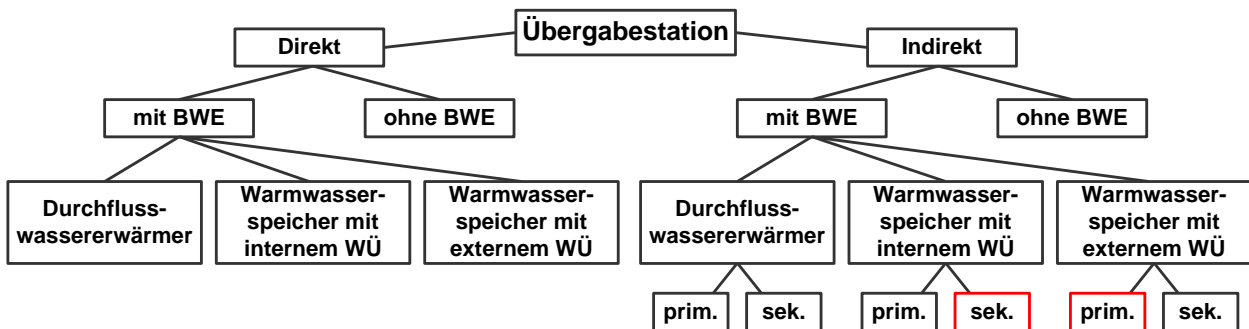


Bild 8.5 Anschlussmöglichkeiten für die Wärmeversorgung mit oder ohne Warmwassererwärmung. Mit einem roten Rahmen ist die übliche Anschlussart der Warmwassererwärmung bei einem indirekten Anschluss gekennzeichnet, wobei mit prim. der Anschluss der Warmwassererwärmung an der Primär- und mit sek. der Anschluss an der Sekundärseite gemeint ist.

8.5.1 Direkter Anschluss

Die Heizkreise verfügen über eine witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung und die primäre Rücklauftemperatur wird bei Gefahr einer Überschreitung der maximal zulässigen Rücklauftemperatur über eine Rücklauftemperaturbegrenzung begrenzt.

Direktanschluss einer Heizgruppe mittels **Drosselschaltung** gemäss Bild 8.6 (variabler Durchfluss in der Heizgruppe, z.B. Anschluss eines Lufterhitzers).

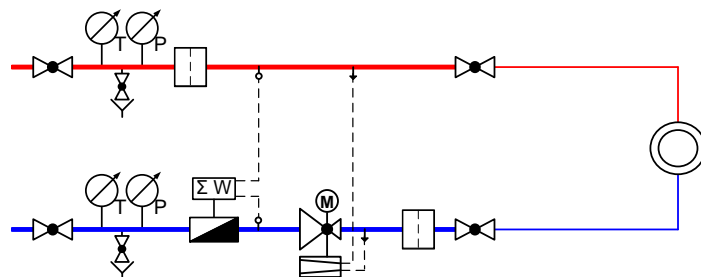


Bild 8.6 Direkter Anschluss mit Drosselschaltung.

Direktanschluss einer Heizgruppe mittels **Einspritzschaltung** zur Temperaturregelung gemäss Bild 8.7 (z.B. Anschluss einer Heizkörper- oder Fussbodenheizung).

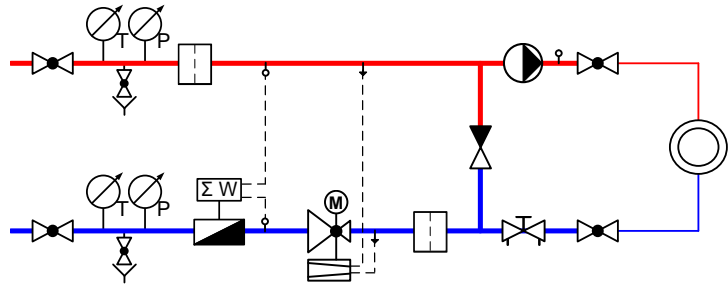


Bild 8.7 Direkter Anschluss mit Einspritzschaltung.

8.5.2 Indirekter Anschluss

Der Anschluss an ein Fernwärmenetz muss bei hohen geodätischen Höhenunterschieden und/oder bei ausgedehnten Anlagen indirekt erfolgen, da der Netzdruck den maximal zulässigen Druck in der Hausanlage (z.B. Gebäudeheizung) übersteigt. Das bedeutet, dass der Erzeugerkreis vom Verbraucherkreis mit einem Wärmeübertrager hydraulisch getrennt wird (Primär- und Sekundärkreis). Die Heizkreise verfügen über eine witterungsgeführte Regelung der sekundärseitigen Vorlauftemperatur über das primärseitige Durchgangsventil (Kombiventil).

Der **indirekte Anschluss** an ein Fernwärmenetz erfolgt üblicherweise gemäss Bild 8.8 mit einer Drosselschaltung. Die primäre Rücklauftemperatur wird bei Gefahr einer Überschreitung der maximal zulässigen Rücklauftemperatur mit einer Rücklauftemperaturbegrenzung begrenzt.

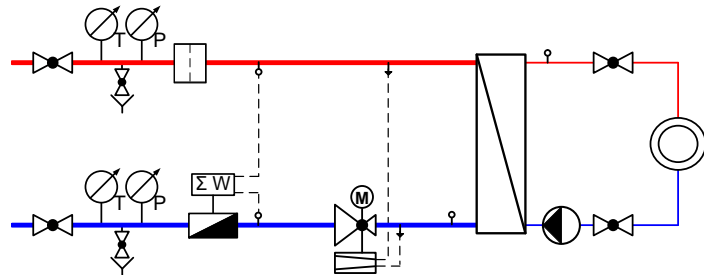


Bild 8.8 Indirekter Anschluss mit Drosselschaltung.

Indirekter Anschluss mit **einem** primärseitigen **Wärmeübertrager** für z.B. mehrere **Heizgruppen** und **Warmwassererwärmer**. Die sekundärseitige Regelung erfolgt entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 8.4. Die Warmwassererwärmung ist vereinfachend dargestellt – die Ausführung sollte gemäss den Erläuterungen im nächsten Kapitel erfolgen.

Die in Bild 8.9 dargestellte Schaltung ist nur möglich, wenn der sekundärseitige Anschluss des Wärmeübertragers druckdifferenzarm erfolgt und dass folgende Rahmenbedingungen erfüllt sind:

- Ventilautorität $\geq 0,5$, d.h. der Druckabfall über dem Dreiwegeventil ist grösser als der Druckabfall über der Strecke mit variablem Durchfluss (entspricht Wärmeübertrager und Anschlussleitungen).
- Maximaler Druckabfall über den sekundärseitigen Teilstrecken mit variablem Durchfluss $\leq 20\%$ der Förderhöhe der kleinsten Gruppenpumpe. Das soll den gegenseitigen Einfluss durch Fehlzirkulation bei mehreren Heizgruppen mit Dreiwegeventil verhindern.

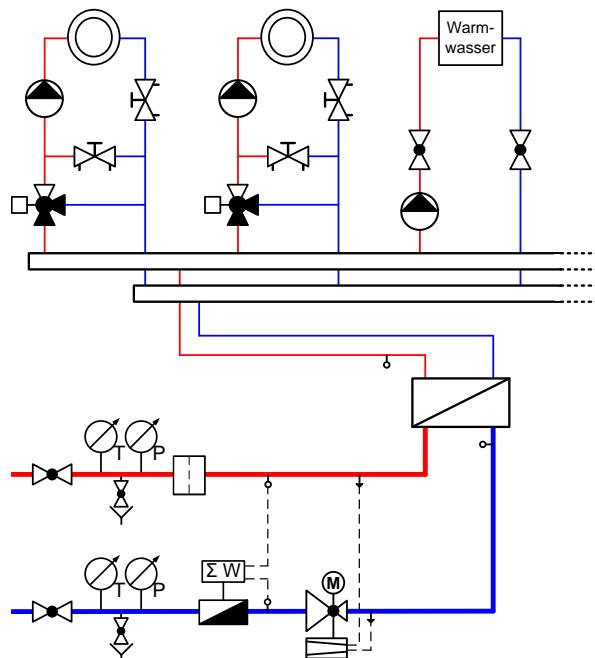


Bild 8.9 Indirekter Anschluss mit Drosselschaltung für den sekundärseitigen Anschluss mehrerer Heizgruppen und Warmwassererwärmer.

Indirekter Anschluss über einen **dezentralen Wärmespeicher** (Bild 8.10) z.B. für mehrere **Heizgruppen** und **Warmwassererwärmer** oder zur weiteren **Unterverteilung**. Die Erfassung der Ein- und Ausschaltkriterien für die Ladung des Wärmespeichers erfolgt über Temperaturfühler oben und unten im Wärmespeicher. Die Warmwassererwärmung ist vereinfachend dargestellt – die Ausführung sollte gemäss den Erläuterungen im nächsten Kapitel erfolgen.

Auf der Sekundärseite sind Druckdifferenzarme Anschlüsse vorzusehen. Die sekundärseitige Regelung erfolgt entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 8.4. Dieser Anschluss ist z.B. geeignet für Wärmeabnehmer mit grossen Spitzenlasten .

Achtung: Beim direkten Anschluss des Wärmespeichers ist auf den Nenndruck des Speichers zu achten.

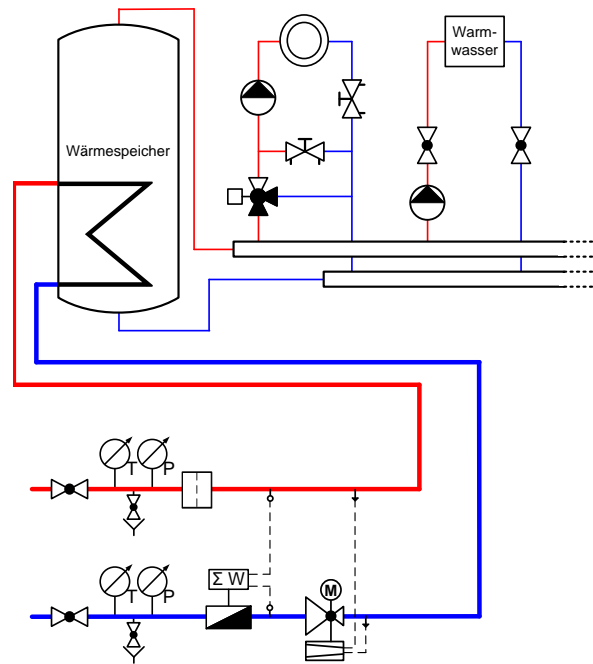


Bild 8.10 Anschluss eines dezentralen Wärmespeichers für den indirekten Anschluss mehrerer Heizgruppen und Warmwassererwärmer.

8.5.3 Warmwassererwärmung

Die folgenden Standard-Schaltungen gehen auf die Warmwassererwärmung ein. Die Warmwasserwärmer sind grundsätzlich über eine Warmwasser-Vorrangschaltung (veraltet: Boilervorrangschaltung) zu laden. Alternativ kann die Ladung auch parallel erfolgen. Die parallele Ladung der Warmwasserspeicher ist regelungstechnisch schwieriger und kostenintensiver. Im Weiteren muss die Anschlussleistung dementsprechend ausgelegt sein, hat aber Vorteile bei einem erhöhten Warmwasserbedarf (z.B. Spital oder Altersheim).

Direkter Anschluss eines **Warmwasserspeichers** mit **internem Wärmeübertrager**. Die maximal zulässige Rücklauftemperatur muss durch geeignete hydraulische und regelungstechnische Massnahmen garantiert werden. Die Erfassung der Ein- und Ausschaltkriterien erfolgt über Temperaturfühler im Speicher.

Mit der in Bild 8.11 dargestellten Schaltung erfolgt die Ladung des Warmwasserspeichers mit internem Wärmeübertrager direkt und mit konstantem Durchfluss.

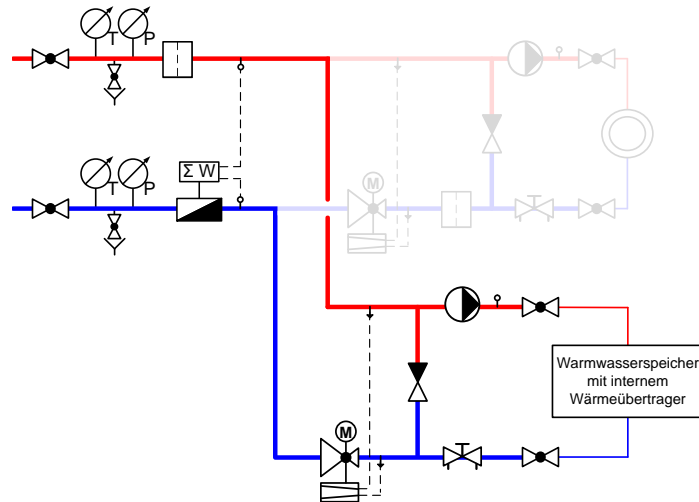


Bild 8.11 Direkter Anschluss eines Warmwasserspeichers mit internem Wärmeübertrager.

Anschluss eines **Warmwasserspeichers** mit **externem Wärmeübertrager**. Ergibt eine konstant hohe Heizleistung bei konstant hoher Warmwassertemperatur und definiert tiefer Rücklauftemperatur.

Dieselbe Schaltung gilt auch für einen **indirekten Anschluss** eines **Warmwasserspeichers** mit **internem Wärmeübertrager**. Die maximal zulässige Rücklauftemperatur muss durch geeignete hydraulische und regelungstechnische Massnahmen garantiert werden.

Die Laderegelung des Warmwasserspeichers erfolgt primärseitig mit einer Einspritzschaltung zur Temperaturregelung mit konstantem Durchfluss. Damit kann das Verkalken im Wärmeübertrager bei erhöhter Wasserhärte im Trinkwasser verhindert werden, indem die primäre Ladetemperatur des Wärmeübertragers auf 65°C bis 70°C begrenzt wird.

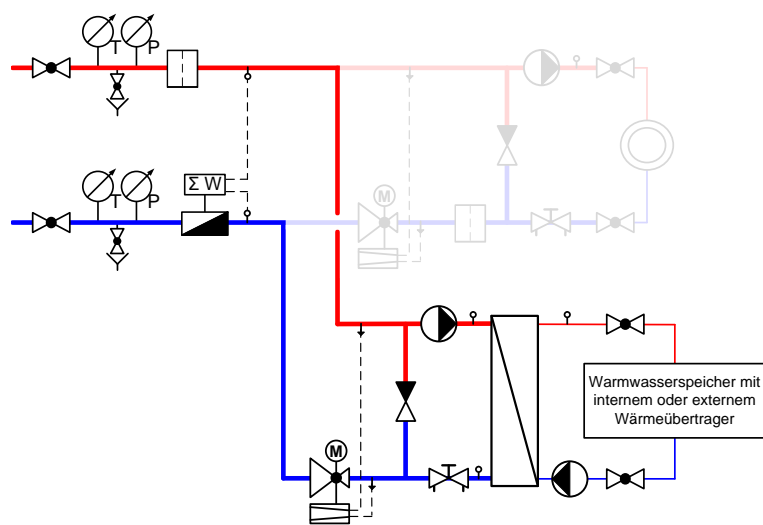


Bild 8.12 Anschluss eines Warmwasserspeichers mit externem Wärmeübertrager oder ein indirekter Anschluss eines Warmwasserspeichers mit internem Wärmeübertrager.

Die Erfassung der Ein- und Ausschaltkriterien erfolgt über Temperaturfühler im Warmwassererwärmer. Mit der in Bild 8.12 dargestellten Schaltung erfolgt die sekundärseitige Laderegelung mit konstantem oder variablem Durchfluss. Bei variablem Durchfluss wird die drehzahlgeregelte Pumpe mit einer definierten Anfahrrampe hochgefahren und auf die Austrittstemperatur geregelt.

Die Pumpe muss Temperatur- und Druckbeständig sein.

Anschluss eines Warmwasserspeichers mit externem Wärmeübertrager.

Ergibt eine konstant hohe Heizleistung bei konstant hoher Warmwassertemperatur. Mit der in Bild 8.13 dargestellten Beimischschaltung auf der Sekundärseite erfolgt die Ladung des Warmwasserspeichers mit konstantem Durchfluss. Damit kann auf der Sekundärseite die Vorlauftemperatur auf den Warmwassererwärmer geregelt werden, womit beim Start der Speicherladung eine zu tiefe Vorlauftemperatur vermieden wird. Bei erhöhter Wasserhärte im Trinkwasser, kann beim Ausschalten der Speicherladung ein Überhitzen im Wärmeübertrager verhindert werden, indem über eine gewisse Nachlaufzeit (z.B. 5 min.) der Wärmeübertrager abgekühlt wird. Die Pumpe muss Temperatur- und Druckbeständig sein.

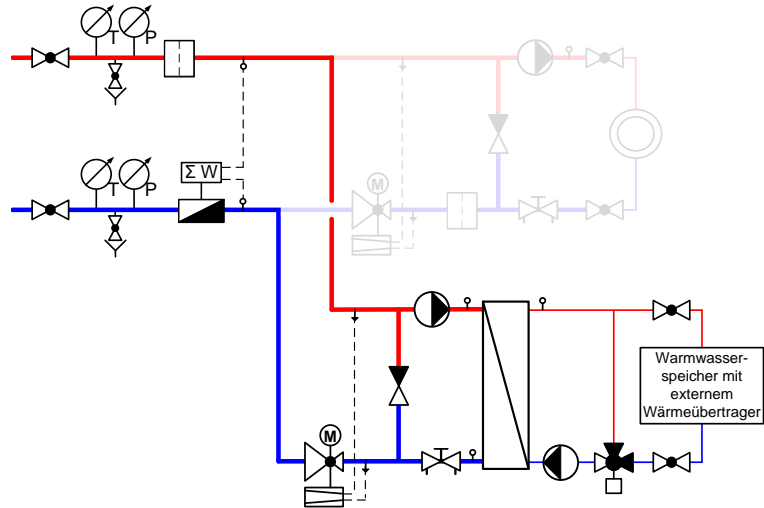


Bild 8.13 Anschluss eines Warmwasserspeichers mit externem Wärmeübertrager und sekundärseitiger Beimischschaltung.

Wesentlich für einen wirtschaftlichen Betrieb von Fernwärmenetzen sind niedrige Rücklauftemperaturen. Der Fokus liegt dabei bei der hydraulischen Einbindung der Wärmeabnehmer und insbesondere bei der Warmwassererwärmung ist Optimierungspotenzial vorhanden. Zum Beispiel kann durch die **Vorwärmung des Kaltwassers** über einen zusätzlichen Wärmeübertrager (Vorwärmer) oder über einen zusätzlichen sanitärseitigen Speicher die Rücklauftemperatur zusätzlich gesenkt werden.

Mit dem Prinzip der Kaltwasser-Vorwärmung mit einem zusätzlichen Wärmeübertrager kann bei allen Varianten der Warmwassererzeugung angewendet werden (siehe Kapitel 8.2). Beispielhaft zeigt das Bild 8.14 eine Variante der Kaltwasser-Vorwärmung bei einem Warmwasserspeicher mit externem Wärmeübertrager. Die Pumpe muss Temperatur- und Druckbeständig sein.

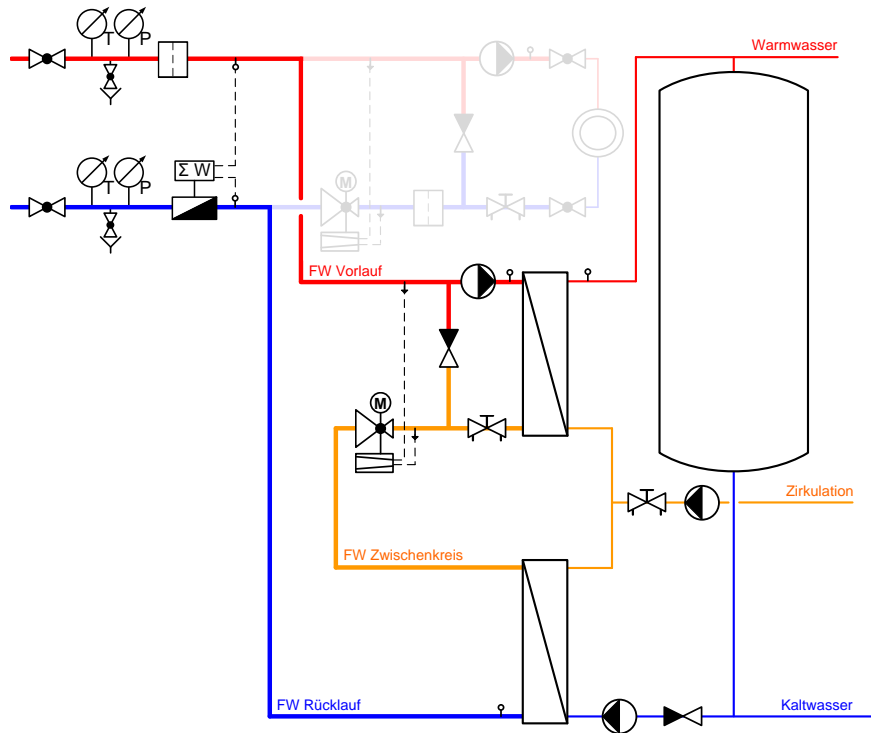


Bild 8.14 Anschluss eines Warmwasserspeichers mit externem Wärmeübertrager und Vorwärmung des Kaltwassers über einen separaten Wärmeübertrager.

Eine andere Variante der Vorwärmung bieten in Serie geschaltete Warmwasserspeicher mit internem Wärmeübertrager, wobei der erste Warmwasserspeicher (rechts) zur Vorwärmung dient und im nachgeschalteten Warmwasserspeicher (links) auf die zur Vermeidung von Legionellen notwendigen Temperatur nachgewärmt wird (Bild 8.15).

Die Wassertemperatur in einem Speicher zur Vorwärmung erreicht in der Regel nicht mehr als 45°C und ist somit im Idealbereich der Legionellenvermehrung. Deshalb sollte das Warmwasser im Nacherwärmer mindestens eine Stunde pro Tag auf über 60 °C erwärmt werden.

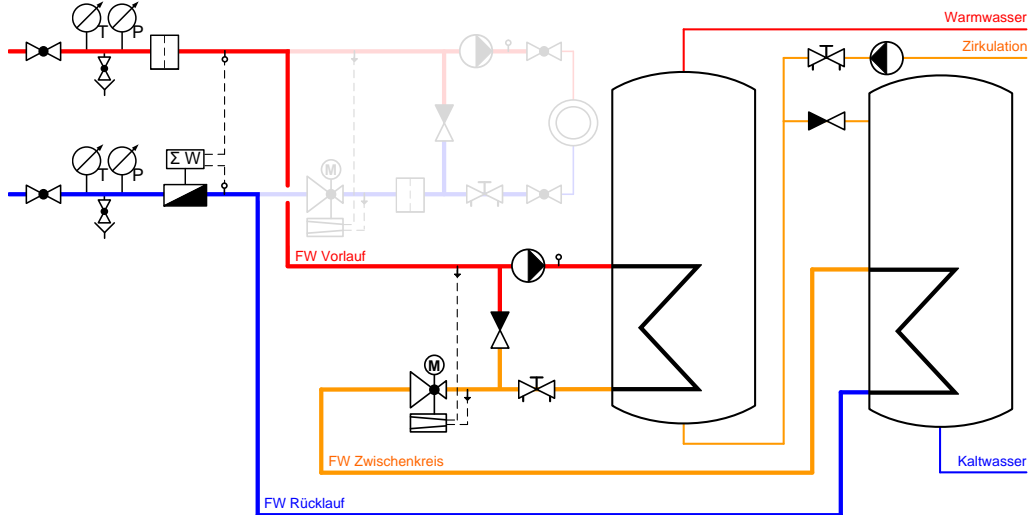


Bild 8.15 Anschluss von zwei in Serie geschalteten Warmwasserspeichern mit internem Wärmeübertrager.

8.5.4 Strahlpumpe

Eine weitere Anschlussmöglichkeit bietet der Anschluss mit **Strahlpumpe**. Diese Schaltung lässt sich analog den oben aufgeführten Schaltungen als direkter Anschluss (Bild 8.16) oder indirekter Anschluss (Bild 8.17) anwenden.

Die Strahlpumpe ergibt eine Temperaturregelung mit variablem Durchfluss. Die Strahlpumpe übernimmt die Funktion der Volumenstrom- und Differenzdruckregelung womit in der Regel auf das Kombiventil verzichtet werden kann.

Zum Vergleich:

Die Drosselschaltung in Bild 8.6 ergibt eine Mengenregelung mit variablem Durchfluss. Die Einspritzschaltung in Bild 8.7 eine Temperaturregelung mit konstantem Durchfluss.

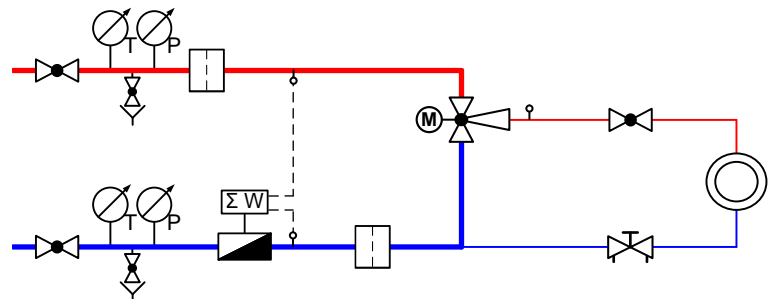


Bild 8.16 Direkter Anschluss mit Strahlpumpe.

Vorsicht ist wegen des variablen Durchflusses in schlecht abgeglichenen Wärmenetzen geboten (Gefahr des «Absterbens» von schlecht durchflossenen Anlageteilen bei kleiner Last).

Um eine Verkalkung im Wärmeübertrager bei erhöhter Wasserhärte im Trinkwasser zu minimieren, kann die primäre Ladetemperatur des Wärmeübertragers begrenzt werden ohne dass eine Umwälzpumpe und ein Rückschlagventil eingesetzt werden muss (vgl. Einspritzschaltung).

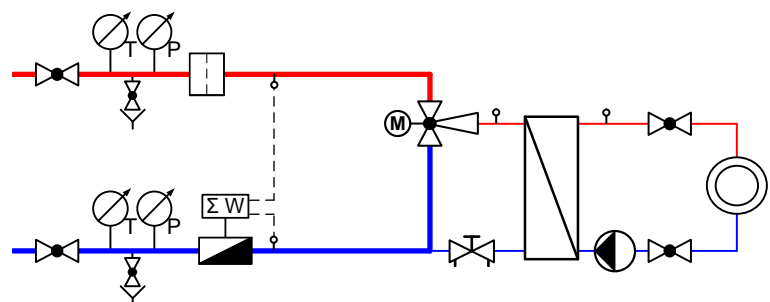


Bild 8.17 Indirekter Anschluss mit Strahlpumpe

8.6 Anforderung an die Wärmeübergabe

Die folgenden Anforderungen betreffen die Gebäudetechnik, das Heizsystem, die Lüftungsanlage, die Warmwassererwärmung und Regelungstechnik, also hauptsächlich die Sekundärseite im Eigentum des Wärmeabnehmers (Hausanlage). Aus der Sicht des Wärmelieferanten besteht jedoch ein grosses Interesse über die technische Situation auf der Sekundärseite des Wärmeabnehmers. Die gelieferte Wärme soll möglichst Effizient genutzt werden bzw. ergeben sich im optimalen Fall tiefe primäre Rücklauftemperaturen. Aus rechtlicher Sicht besteht aber nicht zwingend ein Handlungsanspruch des Wärmelieferanten auf die Gebäudetechnik des Wärmeabnehmers, ausser es wurde vertraglich vereinbart (z.B. im Wärmeliefervertrag).

Die folgenden Empfehlungen richten sich somit hauptsächlich an Wärmelieferanten und zwar auf was bei potenziellen Wärmeabnehmer zu achten ist, welche Empfehlungen an Wärmekunden abgegeben werden können und evtl. auch vertraglich zu vereinbaren sind.

Die hier aufgeführten Empfehlungen befassen sich nicht mit Prozesswärme. Die Empfehlungen bei Prozesswärme weichen jedoch nicht grundsätzlich von den hier gemachten ab.

8.6.1 Gebäudetechnik

- Für eine möglichst tiefe (primäre) Rücklauftemperatur, dürfen sich auf der Primär- und der Sekundärseite keine hydraulischen Kurzschlüsse zwischen Vor- und Rücklauf befinden, weshalb folgende Einrichtungen unzulässig sind:
 - Offene Expansionsgefässe
 - Doppelverteiler (Rohr in Rohr, Vierkant)
 - Bypässe (auf Verteiler, bei Verbrauchern etc.)
 - Überströmregler und -ventile zwischen Vor- und Rücklauf
 - Einspritzschaltungen mit Dreiwegventilen
 - Umlenkschaltungen mit Dreiwegventilen
 - Vierwegmischer.
- Neue oder umzubauende Anschlüsse so konzipieren, dass sie möglichst durchgehend isoliert werden können (Kugelhähne mit Spindelverlängerungen, Temperatur- und Druckanzeige sowie Füll- und Entleerungshähne weit genug herausziehen).
- Entfernung bzw. Vermeidung unregelmässiger Bypässe und hydraulischer Weichen zwischen Vor- und Rücklaufleitungen (z.B. Warmhaltung der Versorgerleitung für Lüftungsanlagen).
- Auf der Primärseite sind Bypässe oder Überströmventile zur Sicherstellung eines Minimaldurchflusses am Ende der Stränge (z.B. Verhinderung von «kalten Zapfen») nur zulässig, wenn keine andere Lösung möglich ist und garantiert werden kann, dass der Durchfluss minimal ist.

- Zur Verhinderung des Rücklauftemperaturenanstiegs bei Fehlzirkulation bzw. wenn der Durchfluss primärseitig grösser als der Durchfluss sekundärseitig ist (z.B. Fehler im Durchgangsventil), werden bei Einspritzschaltungen auf der Primärseite Rückschlagventile in den Bypässen eingesetzt. Die folgenden Nachteile eines Rückschlagventils sind bei der Auslegung der Schaltung jedoch zu beachten und eine Fehlzirkulation möglichst zu vermeiden:
 - Einseitige hydraulische Entkoppelung
 - Drücke werden bei Fehlzirkulation addiert
 - Gruppe wird trotz abgestellter Pumpe warm, wenn das Durchgangsventil ungewollt geöffnet wird.
- Hydraulischer Abgleich der Heizflächen- und Brauchwarmwasserzirkulationssysteme zur Sicherstellung korrekter Volumenströme.
- Einbau von Rücklauftemperaturenbegrenzern (auf der Primärseite) bei indirekten wie auch bei direkten Hausanschlüssen.
- Bei verzweigten Netzen mit mehreren Verteilern (sekundärseitig) ist es sinnvoll vor den einzelnen Verteilern ein differenzdruckunabhängiges Regelventil zur Volumenstrom- und Differenzdruckregelung (Kombiventil) einzusetzen. Alternativ kann die Volumenstrom- und Differenzdruckregelung auch über ein separates Durchgangsventil zur Volumenstromregelung und einen Differenzdruckregler erfolgen. In Verbindung mit einer drehzahlgeregelten Hauptpumpe wird so sichergestellt, dass auch jeder Verteiler ausreichend versorgt wird.
- Bestehende Pumpen sind beim Bedarf (z.B. Defekt) durch drehzahlgeregelte Pumpen zu ersetzen. Zudem ist die Dimensionierung zu überprüfen, da bestehende Pumpen oftmals überdimensioniert sind.

8.6.2 Heizsystem

- Anwendung von Flächenheizsystemen mit entsprechend grossen Wärmeübertragungsflächen (z.B. Fussboden- oder Wandheizungen).
- Ausnutzung der Temperaturspreizung zwischen der Vorlauf- und Rücklauf-temperatur und Reduzierung der Volumenströme.
- Alle Heizflächen sind mit selbsttätig wirkenden Thermostatventilen bestehend aus Stellantrieb und Stellgerät zur raumweisen Temperaturregelung auszurüsten. Die Thermostatventile sind mit einer Voreinstellmöglichkeit vorzusehen.
- Werden keine Thermostatventile eingesetzt (z.B. Altbau), sind geeignete Alternativen mit dem Wärmeabnehmer abzusprechen bzw. sollte im Bedarfsfall über eine Optimierungsstrategie verhandelt werden.
- Nutzung von hohen Rücklauftemperaturen aus einzelnen Heizkreisen (z.B. Lüftung, statische Heizflächen etc.) zur Versorgung anderer Verbraucher (z.B. Fussboden- oder Wandheizung).
- Verwendung von Heizkreisverteilern mit thermischer Trennung zwischen Vorlauf und Rücklauf zur Vermeidung von unregelmässigem Wärmeaustausch.

- Um eine einwandfreie Funktion der Temperaturregel-einrichtung zu gewährleisten, ist zwingend ein **hydraulischer Abgleich** vorzunehmen.

8.6.3 Lüftungsanlage

- Lüftungsanlagen (einzeln oder im Ausnahmefall gruppenweise) sind mit Regelungseinrichtungen zu versehen. Als Regelgrösse können Raum-, Zu- und Ablufttemperatur dienen. Als Regelventil sind für den direkten Anschluss Durchgangsventile zu verwenden. Für den indirekten Anschluss können sowohl Durchgangs- wie auch Dreiwegventile verwendet werden.
- Mit Aussenluft beanspruchte Lüftungsanlagen sind mit einer Frostschutzschaltung und gegebenenfalls einer Anfahrtschaltung vorzusehen.

8.6.4 Warmwassererwärmung und Zirkulation

- Vermeidung von reinen Warmwasserspeichern mit internem Wärmeübertrager. Ansonsten muss eine Rücklauf Temperaturbegrenzung bzw. Regelung zur Vermeidung einer Durchwärmung mit eingeplant werden.
- Eine Warmwassererwärmung mit hartem Wasser (≥ 15 °fH; mittelhart) ist möglich. Zur Verhinderung der Verkalkung der Wärmeübertrager sind diese mit einer Rücklaufbeimischung anzuschliessen (analog Bild 8.11 oder Bild 8.12). Bei weichem Wasser oder wenn die Fernwärmeverlauftemperatur immer unter 70°C ist, kann auch analog Bild 8.8 (Drosselschaltung) angeschlossen werden (d.h. Pumpe und Rückschlagventil entfallen).
- Keine Überhöhung der vorgeschriebenen Warmwassertemperaturen zur Vermeidung von Kalk- und Salzausfall in Leitungen, Armaturen und Wärmeübertragern.
- Bei hartem Wasser (≥ 15 °fH; Mittelhart) sind bei grossen Wärmeübertrager (> 200 kW) zusätzlich Absperrorgane und Spülanschlüsse zur Reinigung des Wärmeübertragers vorzusehen. Bei Wärmeübertrager insb. Plattenwärmeübertrager < 200 kW ist für kurzfristigen Ersatz zu sorgen bzw. Vorrätig zu halten (Lagerhaltung beim Betreiber).
- Beim Wärmeübertrager sind zur schnelleren Abkühlung die Anschlüsse für Kaltwasser und Rücklauf-temperatur oben anzubringen.
- Reduzierung unnötiger Wärmeverluste bei Warmwasserzirkulationssystemen durch Wärmedämmung der Rohrleitungen.
- Bei ausreichender Dimensionierung des Warmwasserspeichers die Position des Temperaturfühlers optimieren – nach oben versetzen. Bei grösseren Warmwasserspeichern (≥ 500 Liter) um einen zweiten Temperaturfühler erweitern.
- Temperaturfühler sind bei Warmwasserspeicher mit internem Wärmeübertrager oberhalb des Registers einzubauen.
- Die Zirkulation nicht in den heissen Bereich bzw. in die Nähe des Temperaturfühlers einbinden.

- Werden mehrere Warmwasserspeicher eingebunden sind, ist eine Serienschaltung der Parallelschaltung vorzuziehen. Bei Schwachlastbetrieb (z.B. Zwischen-saison) sollte der Betrieb eines einzelnen Speichers möglich sein. Damit werden Bereitschaftsverluste reduziert und die Hygienesituation verbessert.

8.6.5 Regelungstechnik

- Verwendung von dicht schliessenden Regelorganen und regelungstechnisch korrekter Ansteuerung zur Vermeidung unkontrollierter Konvektion.
- Vermeidung von Schwingungen in hintereinander geschalteten Regelkreisen (z.B. Regelung /Regelung Kundenanlage) durch schnellere Reaktionszeit und Arbeitsweise des nachfolgenden Regelkreises.
- Die hydraulische und regelungstechnische Auslegung hat entsprechend den Regeln der Technik zu erfolgen. Insbesondere sind die Forderungen gemäss Kapitel 8.4 zu erfüllen:
 - Ventilautorität Dreiwegeventile $\geq 0,5$
 - Ventilautorität Durchgangsventile $\geq 0,3$
 - Die Schaltungen sind so auszulegen, dass die maximal zulässige Rücklauf-temperatur gemäss TAV in jedem Betriebsfall eingehalten werden kann.

9 Wirtschaftlichkeit

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Fernwärme-Projekten sind die spezifischen Wärmegestehungskosten in Rp./kWh zu bestimmen, die sich aus den Wärmekosten ab Wärmezentrale und den Wärmeverteilungskosten zusammensetzen. Als Vergleichsbasis interessieren zudem die Wärmegestehungskosten infrage kommender dezentraler Wärmeerzeuger im Versorgungsgebiet.

Weil es sich beim Bau von Heizanlagen und Fernwärmenetzen um langfristige Investitionen handelt, muss als Basis für eine Investitionsentscheid die zeitliche Entwicklung betrachtet werden. Dazu erfolgt in der Regel eine Betrachtung von Jahr zu Jahr über einen Zeitraum von zum Beispiel 20 Jahren. Für diesen Zeitraum interessiert auch eine Abschätzung der Risiken im Falle von Abweichungen gegenüber der geplanten Entwicklung. Wichtige Risiken sind etwa ein Nichterreichen des geplanten Endausbaus, ein wegen Gebäudesanierungen oder veränderten wirtschaftlichen Bedingungen reduzierter Wärmebedarf sowie Veränderungen der Energiepreise, der Investitionssumme und des Kapitalzinssatzes.

Obwohl für einen Investitionsentscheid eine zeitliche Betrachtung unabdingbar ist, erfolgt eine erste Beurteilung oft anhand der Wirtschaftlichkeit im stationären Zustand. Sofern diese Bewertung unattraktiv ist, ist eine Weiterverfolgung des Projekts in der geplanten Form meist unnötig. Unter Umständen kann auf Basis der stationären Situation vorab ein Variantenvergleich erfolgen, indem zum Beispiel uninteressante Wärmeabnehmer oder Teilnetze ausgeschieden werden. Je nach Fragestellung und Zeitpunkt im Projekt kommen deshalb unterschiedliche Methode für die Wirtschaftlichkeitsbeurteilung zur Anwendung, die im vorliegenden Kapitel beschrieben werden. Vor Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind allerdings die Verantwortlichkeiten festzulegen, wie einleitend ausgeführt wird.

9.1 Verantwortlichkeiten

Die Verantwortung zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit liegt grundsätzlich bei der Trägerschaft des Projekts. Die Durchführung der Wirtschaftlichkeitsberechnung kann durch den Bauherrn erfolgen oder vom Bauherrn an den Planer oder eine dritte Stelle in Auftrag gegeben werden.

Aufgabe des Planers ist es in jedem Fall, die erforderlichen technischen Daten dazu zur Verfügung zu stellen und den Bauherrn bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung zu beraten. Folgende ökonomischen Grundannahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung müssen jedoch vom Bauherrn getroffen werden:

- Kalkulatorischer Kapitalzinssatz (auch Kalkulationsszinssatz).
- Kalkulatorische Betrachtungsdauer oder Betrachtungsdauern, sofern zum Beispiel für Gebäude und Fernwärmenetz längere Betrachtungsdauern als für den Heizkessel angenommen werden.
- Inflationsrate (Preissteigerung).

- Betriebskostensteigerung.
- Energiepreise bei Projektstart, also der Strompreis und je nach Wärmeerzeugung Preise für den oder die Hauptenergieträger und Zusatzenergieträger.
- Energiepreisteigerungen.
- Personalkosten (oder vereinfachend zum Beispiel ein Prozentsatz der Investition).

Es empfiehlt sich, diese Grundannahmen schriftlich zu vereinbaren. Die Planungsfirma stellt folgende technischen Daten zur Verfügung:

- Leistungs- und Wärmebedarf der vorgesehenen Wärmeabnehmer.
- Investitionskosten unterteilt nach Hauptkomponenten.
- Verbrauchsgebundene Kosten, im Fall eines Brennstoffs insbesondere Energieinhalt des Brennstoffs und Brennstoffkosten.
- Hilfsenergieverbrauch und daraus resultierende Kosten.
- Wartungs- und Instandsetzungskosten.

Die detaillierten Kostenfaktoren werden im folgenden Kapitel 9.2 ausgeführt. Die Verantwortlichkeiten zwischen Bauherr und Planer werden in der Regel wie folgt aufgeteilt:

Aufgaben des Bauherrn:

- Entscheidung, welche potenziellen Wärmeabnehmer zu berücksichtigen sind.
- Entscheidung über den anzunehmenden Anschlusszeitpunkt (beeinflusst den Zeitpunkt der anfallenden Investitionskosten und der zu erwartenden Einnahmen aus dem Wärmeverkauf).

Aufgaben des Planers:

- Ermittlung des Wärmeleistungsbedarfs inklusive des Lastgangs und des zu erwartenden Jahreswärmebedarfs der potenziellen Wärmeabnehmer.
- Ermittlung der Investitionskosten für den Anschluss der potenziellen Wärmeabnehmer.

9.2 Kostenstruktur

Bei der Ermittlung der Kosten von gebäudetechnischen Anlagen werden nach VDI Richtlinie 2067 [117] folgende vier Kostengruppen unterschieden:

- Kapitalgebundene Kosten inklusive Instandsetzung und Erneuerung,
- verbrauchsgebundene Kosten,
- betriebsgebundene Kosten,
- sonstige Kosten.

In der Tabelle 9.1 werden die Kosten den vier Kostengruppen zugeteilt. Einzelne Kostenarten werden für die Wirtschaftlichkeitsrechnung aufgrund von Richtwerten zum Beispiel als Prozentsatz der Investitionssumme oder der produzierten Wärme geschätzt. Dabei ist zu definieren, welche Kostenarten den einzelnen Kostengruppen zugeordnet werden. Nach VDI 2067 umfasst die „Instandhaltung“ sämtliche Massnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes mit den

drei Kostenarten „Instandsetzung“, „Wartung“ und „Inspektion“, die wie folgt definiert sind:

1. Instandsetzung (in der Schweiz meist Unterhalt genannt) umfasst Massnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustandes.
2. Wartung umfasst Massnahmen zur Bewahrung des Sollzustandes.
3. Inspektion umfasst Massnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes.

Die Tabelle 9.2 beschreibt die Kostenarten und zeigt, welche Basisdaten zu deren Berechnung verwendet werden. Teilweise sind auch Richtwerte angegeben, die als Orientierungshilfe für Wärmeerzeuger mit automati-

schen Holzheizungen dienen. Dabei ist zu beachten, dass die spezifischen Kosten vom Brennstoff und der gewählten Technik abhängig sind und zusätzlich von der Anlagengrösse und der Vollbetriebsstundzahl beeinflusst werden.

Die Tabelle 9.3 beschreibt Richtwerte für die Nutzungsdauer und die Instandsetzungskosten nach VDI 2067. Die für die Wirtschaftlichkeitsrechnung anzunehmende Betrachtungsdauer ist mit dem Bauherrn und allenfalls mit Geldgebern festzulegen.

Tabelle 9.1 Kostengruppen und Kostenarten nach VDI 2067 [117].

Kapitalgebundene Kosten	Verbrauchsgebundene Kosten	Betriebsgebundene Kosten	Sonstige Kosten
Kapitalkosten der Anlagekomponenten und baulichen Anlagen	Brennstoffkosten	Kosten für Bedienung, Reinigung, Wartung und Inspektion	Versicherungen
Instandsetzungskosten	Kosten für Hilfsenergie	Miete oder Pacht	Steuern
	Kosten für Betriebsstoffe	Kaminfeger	Verwaltungskosten
	Entsorgungskosten	Emissionsmessung	Allgemeine Abgaben
	Konzessionsgebühren		

Tabelle 9.2 Kostenarten und Basis zur Ermittlung der jährlichen Kosten sowie Richtwerte. Die Richtwerte gelten beispielhaft für Wärmeerzeuger mit automatischen Holzheizungen. Die Kosten für Wartung sind in Abweichung zu VDI 2067 in den Personalkosten enthalten [21].

Kostenart	Basis zur Ermittlung der jährlichen Kosten	Richtwerte für automatische Holzheizungen
Kapitalkosten der Anlagenkomponenten und baulichen Anlagen (Investitionen)	Investitionssummen der Gewerke, kalkulatorischer Kapitalzinssatz, kalkulatorische Betrachtungsdauer	Nutzungsdauer: Tabelle 9.3 Kapitalzinssatz gemäss länderspezifischer Situation und Vorgaben des Bauherren oder der Geldgeber
Instandsetzungskosten (Reparaturen gemäss VDI 2067)	Investitionssummen der Gewerke, Prozentsatz der Investitionssumme	
Brennstoffkosten	Brennstoffverbrauch, Heizwert und Brennstoffpreis	effektive, auf Angeboten basierende Preise
Hilfsenergie (Strom) für Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung	Prozentsatz der Wärmemenge (erzeugt bzw. verteilt) und Strompreis	für Wärmeerzeugung: 1 % bis 1.5% p.a. der erzeugten Wärme, für Wärmenetz: 0.5 % bis 1 % p.a. der verteilten Wärme
Betriebsstoffe Wärmeerzeugung	Preis, Verbrauchsmenge	effektive Kosten sind abzuschätzen
Personalkosten ohne Verwaltung (Bedienung, Reinigung, Wartung und Inspektion)	Effektive Personalkosten oder vereinfachend Prozentsatz der Investitionskosten für die Wärmeerzeugung	1.5 % p.a. der Investitionskosten der Wärmeerzeugung, jedoch abhängig vom Brennstoff (z.B. höher für Altholz)
Ascheentsorgung	Brennstoffeinsatz, Aschegehalt, Entsorgungsart	effektive Kosten sind abzuschätzen
Konzessionsgebühren, Miete, Pacht, Kaminfeger, Emissionsmessung	Abhängig vom Einzelfall	effektive Kosten sind abzuschätzen
Sonstige Kosten	Prozentsatz der Investitionssumme	0.5 % bis 1.5 % p.a. der Gesamtinvestition

Tabelle 9.3 Richtwerte für die Nutzungsdauer und die Instandsetzungskosten nach VDI 2067. Die für die Wirtschaftlichkeitsrechnung anzunehmende Betrachtungsdauer ist mit dem Bauherrn und evtl. mit Geldgebern festzulegen. *Die gemittelte Nutzungsdauer für die Planung muss mit den Planungskosten für die einzelnen Gewerke gewichtet werden.

Gewerk	Nutzungsdauer Jahre	Spezifische Instandsetzungskosten % der Investitionskosten pro Jahr
Anlagenteile zur Wärmeerzeugung (inkl. Regelung und Steuerung)	20	2 – 3
Hydraulik	20	2
Elektro- und Haustechnikinstallation	20	2
Bauliche Anlagen und Erschliessung	50	1
Wärmeverteilnetz (inkl. Rohrleitungen und Erdarbeiten)	40	1
Wärmeübergabestationen	30	2
Fahrzeuge	15	3
Planung	gemittelt*	0

9.3 Berechnung der Wärmegestehungskosten

Für die Analyse von Energiesystemen, die in der Regel eine lange Nutzungsdauer aufweisen und bei denen künftige Veränderungen wie die Preissteigerung wichtig sind, sind dynamische Berechnungsmethoden zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sinnvoll. Dabei werden die im Betrachtungszeitraum erwarteten Veränderungen abgeschätzt oder anhand der statistischen Mittelwerte vorgegeben, um die Jahreskosten für die gesamte Nutzungsdauer der Anlage zu prognostizieren.

Statische Verfahren betrachten demgegenüber nur die Verhältnisse zum Zeitpunkt der Realisierung der Anlage. Bei Zeiträumen von mehr als 15 Jahren können sich deutliche Abweichungen zu dynamischen Verfahren ergeben. Vielfach kann bei dynamischen Verfahren von vereinfachenden Annahmen ausgegangen werden, so dass für die Wirtschaftlichkeitsrechnung einfache Summenformeln verwendet werden können und der Rechenaufwand nicht wesentlich grösser wird als für statische Verfahren.

Die wichtigsten dynamischen Rechenmethoden sind

- die Kapitalwertmethode
- die Annuitätenmethode
- die Methode des internen Zinssatzes.

Für Wärmegestehungskosten ist die **Annuitätenmethode** das übliche Berechnungsverfahren und es ist in der VDI-Richtlinie 2067 [117] detailliert beschrieben. Mit der Annuitätenmethode werden die im Betrachtungszeitraum anfallenden, mittleren jährlichen Kosten bestimmt. Für die Beurteilung, ob eine Anlage wirtschaftlich betrieben werden kann, ist dieses Verfahren allein in der Regel nicht ausreichend. Weitere nützliche Grundlagen und Hinweise zur Anwendung der Annuitätenmethode liefern die Unterlagen des Impulsprogramms RAVEL [60] und [61].

In der VDI 2067 ist ein Rechenverfahren beschrieben, das verwendet werden kann, wenn für die Brennstoffkosten und die Wartungs- und Instandsetzungskosten unterschiedliche Preissteigerungsraten angenommen

werden sollen. Im Folgenden wird vereinfachend eine einheitliche jährliche Preissteigerung e angenommen. In vielen Fällen sind gegenüber der in VDI 2067 detailliert beschriebenen Methode die nachfolgenden Vereinfachungen möglich:

- Die Investitionen fallen nur zu Beginn des Betrachtungszeitraumes an.
- Der Betrachtungszeitraum entspricht der Lebensdauer der Investitionen. Das heisst, dass innerhalb des Betrachtungszeitraumes keine Ersatzbeschaffungen getätigt werden müssen und keine Restwerte am Ende des Betrachtungszeitraumes mehr bestehen.

Unter Berücksichtigung dieser Vereinfachungen werden die **Jahreskosten K** wie folgt berechnet:

$$K = I a + A d a$$

- I Investitionskosten des untersuchten Vorhabens
- A jährliche Betriebskosten der Investitionen (Brennstoffkosten, Wartungs- und Instandsetzungskosten zu Preisen von heute)
- a Annuitätsfaktor: Der Annuitätsfaktor berechnet sich aus dem Kalkulationszinssatz i und der kalkulatorischen Betrachtungsdauer n .

$$\text{für } i = 0: a = \frac{1}{n} \quad \text{für } i > 0: a = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$
- d Barwertfaktor (VDI 2067 [117]) oder Diskontierungssummenfaktor (RAVEL [61]). Dieser berechnet sich aus dem Kalkulationszinssatz i , der Preissteigerung e und der kalkulatorischen Betrachtungsdauer n . Berechnung nach VDI 2067 oder entsprechenden Tabellen.
- d · a preisdynamischer Annuitätsfaktor (VDI 2067) oder Mittelwertfaktor (RAVEL).

In der Tabelle 9.3 sind Richtwerte für die Nutzungsdauer und die Instandsetzungskosten zu finden. Die kalkulatorische Betrachtungsdauer n kann auf Basis der Nutzungsdauer festgelegt oder vom Bauherren, einem Kreditgeber oder einer möglichen Förderstelle vorgegeben werden. Sofern die Betrachtungsdauer von der Nutzungsdauer abweicht, sind folgende Punkte zu beachten, wie in der VDI 2067 weiter ausgeführt wird:

- Für allfällige Ersatzinvestitionen während der Betrachtungsdauer muss deren Barwert zu der Erstinvestition I dazugerechnet werden.
- Ist am Ende des Betrachtungszeitraums das Ende der Nutzungsdauer noch nicht erreicht, so reduziert sich die Investition I um den Barwert des Restwertes.

Die Annuitätenmethode liefert die zu erwartenden Jahreskosten. Die **Wärmegestehungskosten** k ergeben sich durch den Bezug auf die an die Wärmeabnehmer gelieferte Nutzwärme Q_{Nutz} :

$$k = \frac{K}{Q_{\text{Nutz}}} = \frac{I a + A d a}{Q_{\text{Nutz}}}$$

In der Praxis wird die Annuitätenmethode oft auch vereinfachend ohne Berücksichtigung der Preissteigerung (Inflation) verwendet und als Kalkulationszinssatz zum Beispiel der aktuelle Zinssatz für Bankkredite eingesetzt. Die Annuitätenmethode wird mit dieser Vereinfachung zu einer relativ ungenauen statischen Betrachtung, welche die zukünftige Entwicklung nicht berücksichtigt. Beim Vergleich von zwei Heizsysteme kann dies zu erheblichen Fehlern führen, wenn die zu vergleichenden Systeme unterschiedliche Kostenstrukturen aufweisen. Im Rahmen einer Voruntersuchung ist ein Systemvergleich mit aktuellem Zinssatz und ohne Preissteigerung jedoch in der Regel hinreichend aussagekräftig, sofern die zu vergleichenden Varianten ähnlich hohe Anteile der kapitalgebundenen Kostenarten und eine vergleichbare Preissteigerung für die verbrauchs- und betriebsgebundenen Kostenarten aufweisen.

Sollen alleine die **Wärmegestehungskosten für das Wärmeverteilstnetz** (ohne Wärmeerzeugung) betrachtet werden, zum Beispiel als Variantenvergleich unterschiedlicher Netzstrukturen, können die folgenden Zusammenhänge dazu benutzt werden. Die Kosten werden mit der Annuitätenmethode bestimmt und setzen sich aus folgenden Komponenten zusammen:

1. Kapitalkosten
2. Betriebskosten:
 - Kosten für Hilfsenergie, insbesondere die Stromkosten unter anderem für die Netzpumpen
 - Brennstoffkosten zur Deckung der Wärmeverluste des Netzes
 - Kosten für Wartung und Unterhalt.

Da die hier aufgezeigten Kosten ausschliesslich die Wärmeverteilung abdecken, sind die Kosten für Wartung und Unterhalt im Vergleich zu den anderen Kostenanteilen klein und werden bei der Berechnung vernachlässigt. Die **spezifischen Wärmeverteilungskosten** ergeben sich damit aus den spezifischen Kapital- und Betriebskosten:

$$k_{\text{WV}} = k_{\text{K}} + k_{\text{Be}}$$

Die **spezifischen Kapitalkosten** k_{K} ergeben sich aus den jährlichen Kapitalkosten K_{K} bezogen auf die gelieferte Wärme an die Wärmeabnehmer (Nutzwärme):

$$k_{\text{K}} = \frac{K_{\text{K}}}{Q_{\text{Nutz}}} = \frac{\sum k_{\text{Ti}} L_{\text{Ti}} a}{Q_{\text{Nutz}}}$$

Die jährlichen Kapitalkosten K_{K} für das Wärmeverteilstnetz ergeben sich aus der Summe der spezifischen Investitionskosten für die einzelnen Teilstränge multipliziert mit deren Trassenlänge und dem Annuitätsfaktor. Die Investitionskosten setzen sich zusammen aus den Kosten für Material, Verlegung, Grabungsarbeiten und Wiederherstellen der Oberfläche. Für die spezifischen Investitionskosten pro Trassenmeter können zum Beispiel die Richtpreise in Tabelle 13.8 für unterschiedliche Rohrtypen benutzt werden. Ein Teilstrang ist definiert als ein Trassenabschnitt mit gleichbleibendem Nenndurchmesser der Vor- und Rücklaufleitung von Knoten bis Knoten und ein Knoten ist definiert als eine Abzweigung des Stranges (Hausanschluss, Netzverzweigung, etc.) oder eine Änderung des Nenndurchmessers (Erweiterung, Verengung).

$$K_{\text{K}} = \sum k_{\text{Ti}} L_{\text{Ti}} a$$

Die **spezifischen Betriebskosten** k_{Be} setzen sich zusammen aus den spezifischen Pumpkosten, Wärmeverlustkosten und Unterhalts- und Servicekosten:

$$k_{\text{Be}} = k_{\text{P}} + k_{\text{V}} + k_{\text{U}}$$

Die spezifischen Pumpkosten k_{P} ergeben sich aus den jährlichen Pumpkosten K_{P} bezogen auf die gelieferte Wärme an die Wärmeabnehmer (Nutzwärme):

$$k_{\text{P}} = \frac{K_{\text{P}}}{Q_{\text{Nutz}}} = \frac{E_{\text{P}} P_{\text{S}}}{Q_{\text{Nutz}}}$$

Die jährlichen Pumpkosten K_{P} berechnen sich aus dem Energiebedarf der Netzpumpen (Kapitel 7.4.5) und dem Strompreis:

$$K_{\text{P}} = E_{\text{P}} P_{\text{S}} = P_{\text{P}} \tau_{\text{WA}} P_{\text{S}}$$

Die spezifischen Wärmeverlustkosten k_{V} ergeben sich aus den jährlichen Wärmeverlustkosten K_{V} bezogen auf die gelieferte Wärme an die Wärmeabnehmer (Nutzwärme):

$$k_{\text{V}} = \frac{K_{\text{V}}}{Q_{\text{Nutz}}} = \frac{Q_{\text{V-a}} k_{\text{Br}}}{Q_{\text{Nutz}}}$$

Die jährlichen Wärmeverlustkosten K_{V} decken den Mehraufwand an Brennstoff zur Deckung der Wärmeverluste im Netz. Die Wärmeverlustkosten berechnen sich aus dem jährlichen Wärmeverlust (Kapitel 7.1.4) und den spezifischen Brennstoffkosten:

$$K_V = Q_{V_a} k_{Br}$$

Die spezifischen Brennstoffkosten in Rp./kWh berechnen sich aus dem Brennstoffpreis und dem Jahresnutzungsgrad des Wärmeerzeugers:

$$k_{Br} = \frac{P_{Br}}{\eta_a}$$

9.4 Variantenvergleich

Für einen Variantenvergleich können die oben beschriebenen Wärmegestehungskosten bestimmt werden, um unterschiedliche Heizsysteme über einen längeren Zeitraum miteinander zu vergleichen. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Inflationsrate und der Kapitalzinssatz näherungsweise parallel verhalten und somit bei konstanter Teuerung auch die Zinssätze konstant bleiben. Mit dieser Annahme kann vereinfachend mit dem sogenannten realen Zinssatz gerechnet werden. Der Realzins entspricht der die allgemeine Teuerung übersteigenden Verzinsung und ergibt sich näherungsweise als Differenz zwischen dem Kapital- oder Nominal-Zinssatz und der Teuerungsrate. Beispiel: Bei einem Nominalzins (Kapitalzinssatz) von 5 % p.a. und einer allgemeinen Teuerung von 3 % p.a. beträgt der Realzins 2 % p.a.. In der Wirtschaftlichkeitsrechnung dürfen Zinssatz und Inflationsrate nicht unabhängig voneinander festgelegt werden, da sie eng mit einander verknüpft sind. Es ist daher zwischen **nominaler** und **realer Betrachtungsweise** zu unterscheiden.

Bei der **nominalen Betrachtungsweise** (VDI 2067) wird die Teuerung der späteren Jahre für die Ermittlung der Kosten und Erträge berücksichtigt. In diesem Fall ist als Kalkulationszinssatz der effektiv zu zahlende Zins für Bankkredite einzusetzen.

Bei der vereinfachenden **realen Betrachtungsweise** wird über den ganzen Betrachtungszeitraum mit heutigen Preisen gerechnet. In diesem Fall ist als Kalkulationszinssatz der Realzins (Differenz zwischen Zinssatz und Teuerungsrate) einzusetzen. Dabei ist zu beachten, dass zwar die Relation der Kosten korrekt wiedergegeben wird, die ermittelten Wärmegestehungskosten aber nicht den tatsächlichen entsprechen. Für eine einfache Berechnung wird für die reale Betrachtungsweise zudem angenommen, dass der Ersatz der Anlagen nach Ablauf der Nutzungsdauer zu real gleichen Preisen wie ursprünglich erfolgt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Nutzungsdauern der Varianten erheblich voneinander abweichen können. Der Betrachtungszeitraum muss dann der längsten durchschnittlichen Nutzungsdauer der verschiedenen Varianten entsprechen. Weitere Hinweise sind in der Dokumentation RAVEL [61] aufgeführt.

Werden die obigen Regeln berücksichtigt, führt die reale und die nominale Betrachtungsweise zu den gleichen qualitativen Ergebnissen. Wird beim Vergleich der Wärmegestehungskosten unterschiedlicher Heizsysteme die Teuerung nicht berücksichtigt, so muss als Kalkulationszinssatz der reale Zinssatz eingesetzt werden.

Um bei einem Vergleich von Energiesystemen die ökologischen Aspekte zu berücksichtigen, können die externen Kosten für Umweltschäden als kalkulatorische Energiepreiszuschläge berücksichtigt werden. Tabelle 9.4 zeigt die in der Schweiz vom Bund vorgeschlagenen Energiepreiszuschläge im Bezugsjahr 1997. Ein Teil der externen Kosten ist in der Zwischenzeit durch die CO₂-Abgabe auf fossile Brennstoffe abgedeckt. So beträgt die CO₂-Abgabe ab 1.1.2016 in der Schweiz Fr. 84.– pro Tonne fossilem CO₂. Für Heizöl mit einem Heizwert von rund 10 kWh pro Liter und einer CO₂-Emission von rund 2.65 kg pro Liter entspricht dies ungefähr 2.24 Rp./kWh oder der Hälfte des für Heizöl im 1997 vorgeschlagenen kalkulatorischen Zuschlags.

Tabelle 9.4 Energiepreiszuschläge zur Berücksichtigung der externen Kosten in der Schweiz (nach BFE und BAFU Stand 1997) [21].

Energie-träger	Beispiel	Energiepreis-zuschlag	Beispiel
	Energiepreis		Energiepreis-zuschlag mit externen Kosten
	Rp./kWh	Rp./kWh	Rp./kWh
Heizöl	5.5	4.5	10.0
Erdgas	6.0	3.0	9.0
Holz	4.0	1.5	5.5
Elektrizität	15.0	5.0	20.0

9.5 Businessplan, Planbilanz und Planerfolgsrechnung

Der aus den USA stammende Begriff „Businessplan“ beschreibt ein Unternehmenskonzept oder einen Unternehmensplan und somit eine Geschäftsidee, die in einem Unternehmen umgesetzt werden soll. Ein Businessplan ist damit auch ein Instrument, das über die Qualität eines Unternehmens Auskunft gibt. Für die nachfolgenden Ausführungen umfasst der **Businessplan** ein Dokument in folgenden zwei Teilen:

1. Textteil: Dies ist der Businessplan als schriftliche Formulierung der **Geschäftsidee** in Bezug auf Produkt, Dienstleistung, Kunden und Marketing. Der Businessplan gibt Auskunft über die Entwicklung des Unternehmens und ermöglicht eine Beurteilung der Risiken. Für ein Fernwärmenetz ist dabei wichtig, die Auswirkungen verschiedener Varianten des Netzausbaus aufzuzeigen.

2. Finanzteil: Die **Planbilanz und Planerfolgsrechnung** über geplante Einnahmen und Ausgaben, Förderungen, Finanzierung und Liquiditätsplanung. Die Planbilanz und Planerfolgsrechnung erfolgt in der Regel über einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren.

Der **Businessplan** soll in diesen zwei Teilen folgende Elemente abdecken:

- Executive Summary (maximal zwei Seiten)
- Unternehmen (Gründerteam, Unternehmensprofil, Unternehmensziele)
- Produkt oder Dienstleistung: Kundenvorteile/Kundennutzen, Stand der Entwicklung, Erstellung
- Branche und Markt: Branchenanalyse, Marktanalyse und Marktsegmentierung, Zielkunden, Wettbewerb, Standortanalyse
- Marketing: Markteintritt, Marketing- und Absatzkonzept, Absatzförderung
- Management und Schlüsselpersonen
- Umsetzungsplanung
- Chancen und Risiken
- Finanzteil: Planung für die kommenden 20 bis 25 Jahre: Personalplanung, Investitions- und Abschreibungsplanung, Plan-Gewinn- und Plan-Verlustrechnung, Liquiditätsplanung, Aufzeigen des Finanzbedarfs
- Sensitivitätsanalyse als Ergänzung zur Investitionsrechnung, in der durch Variation der wichtigsten Inputgrößen folgende Fragen beantwortet werden:
 - Welche Inputgrößen beeinflussen die Höhe der Ergebnisgrösse besonders stark.
 - Innerhalb welcher Grenzen können die Werte der Inputgrößen schwanken, ohne dass der Erfolg des Unternehmens gefährdet ist.
- Wichtige Inputgrößen sind unter anderem folgende:
 - Hoher Fremdmittelanteil an der Finanzierung und die Fremdkapitalzinsen
 - Brennstoffpreis (und sichere Versorgung)
 - Überschreitung von Bau- und Anlagenkosten
 - Strompreis
 - Personalkosten
 - ungesicherte Fördergelder.

Ein Businessplan sollte grundsätzlich vom Bauherr verfasst werden. Einerseits ist der Bauherr für die Geschäftsidee verantwortlich und andererseits ist dies die beste Basis, um den Businessplan nach aussen zu vertreten. Aufgabe des Planers ist, den Bauherrn bei der Erstellung des Businessplans zu unterstützen.

In den folgenden Abschnitten wird auf die **Planbilanz und Planerfolgsrechnung** eingegangen.

Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens kann sich nicht allein auf die Berechnung der mittleren Wärmegestehungskosten abstützen. Auch wenn über einen längeren Betrachtungszeitraum die Wärmegestehungskosten niedriger sind als die Erlöse, ist eine Kompensation von allfälligen Verlusten in den ersten Betriebsjahren durch Gewinne in späteren Jahren nicht möglich, wenn die Liquidität dazu nicht gesichert ist. Die Liquiditätssituation ist daher besonders zu beachten,

wozu die Planbilanz und Planerfolgsrechnung mit Nachweis der wirtschaftlichen Situation über jedes Jahr dient. Die Aufgabenteilung dazu ist bei Projektstart zu definieren. Da Rahmenbedingungen wie die Struktur und Anschlussdichte des Wärmenetzes die Wirtschaftlichkeit beeinflussen und diese Daten vom Planer zu erfassen sind, ist eine Mitwirkung des Planers beim wirtschaftlichen Optimierungsprozess sinnvoll.

Die Prüfung der Wirtschaftlichkeit und die dazugehörigen Planungsrechnungen sollten allerdings nicht nur in der Planungsphase durchgeführt, sondern während der Projektlaufzeit regelmässig überprüft und durch die Prüfung möglicher Kostenoptimierungen ergänzt werden.

Auch bei der Berechnung der Planbilanz und der Planerfolgsrechnung der einzelnen Jahre muss geklärt werden, ob und wie die **Teuerung** berücksichtigt werden soll. Die vereinfachte reale Betrachtungsweise (siehe Kapitel 9.4) ist dazu jedoch nicht zulässig, weil die Differenz zwischen Realzins und Bankzins bei hoher Inflationsrate gross wird. Dies führt zu einer entsprechend höheren Zinsbelastung in den ersten Jahren. Die Verwendung des Realzinses kann deshalb vor allem in den ersten Jahren zu einer Unterschätzung der Kapitalkosten mit entsprechendem Risiko führen.

Wird die Teuerung gar nicht berücksichtigt (Nominalzins und keine Preissteigerungen), wird in der Planerfolgsrechnung die Zinsbelastung im Vergleich zu den Einnahmen etwas höher ausfallen als später in der Realität. Bei niedriger Teuerung kann diese Abweichung im Vergleich zu anderen Unsicherheiten vernachlässigt werden. Wird die Planerfolgsrechnung als Werkzeug zur Optimierung des Wärmenetzes verwendet, so kann die Teuerung in der Regel ebenfalls vernachlässigt werden. Die Teuerung wirkt sich sowohl auf Ausgaben als auch auf Einnahmen aus und ist gegenüber anderen Unsicherheiten in der Regel vernachlässigbar.

Die Planbilanz und Erfolgsrechnung ist meist ein Teil der Unterlagen (in der Regel dem Businessplan), die einem potenziellen Kreditgeber unterbreitet werden. Die Annahmen bezüglich Zinsen und Teuerung sollten mit dem Kreditgeber besprochen und vereinbart werden.

Optimierung

10 Analyse und Optimierung der Wärmeabnehmer

10.1 Methode

Die Analyse der Wärmeabnehmer basiert auf der Grundlage, dass die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf die übertragbare Wärmeleistung des Fernwärmenetzes bestimmt und gleichzeitig durch die Wärmeabnehmer stark beeinflusst wird. Wenn einzelne Wärmeabnehmer (Übergabestationen) das Fernwärmewasser nicht genügend abkühlen, wird dadurch die Rücklauftemperatur erhöht und die Kapazität des Netzes reduziert. Gleichzeitig steigen der Energieaufwand für die Pumpleistung und die Wärmeverluste des Netzes, da der Massenstrom und die Netztemperatur erhöht sind.

Als methodischer Ansatz wird die Güte der Wärmeabnehmer und das Optimierungspotenzial für das Netz bestimmt, indem die übertragene Wärme- und Wassermenge der Wärmeabnehmer untersucht wird. Dieses Vorgehen wurde von einem schwedischen Planungsbüro an zahlreichen Fernwärmenetzen eingesetzt [12] und unter anderem auch in der Schweiz angewendet [13]. Bei einer Praxiserhebung an zwei Fernwärmenetzen [17] wurde je ein Wärmeabnehmer identifiziert, der die Effizienz und Kapazität des Netzes deutlich reduzierte. Mit umgesetzten Optimierungsmassnahmen bei nur diesem einen Verbraucher konnte die gesamte primäre Rücklauftemperatur um 1.5 K bzw. 1.2 K gesenkt werden. Bei 30 K Temperaturspreizung im Netz entspricht dies einer Erhöhung der Kapazität oder einer Reduktion des Volumenstroms um 5 % bzw. um 4 %. Eine Wirtschaftlichkeitsberechnung hat gezeigt, dass die Kosten in 2.3 bzw. 3.9 Jahren amortisiert werden und gleichzeitig die Rendite der Fernwärmenetze deutlich verbessert wird.

Um zu bestimmen, welche Übergabestationen den grössten Einfluss auf die gesamte primäre Rücklauftemperatur im Netz haben, wird bei bestehenden Fernwärmenetzen die als Mehrverbrauch bezeichnete Wassermenge bestimmt, die im Vergleich zu einem Betrieb bei Referenz-Temperaturspreizung zusätzlich durch die Übergabestation fliesst. Der dadurch zu berechnende Einfluss eines Wärmeabnehmers auf die Rücklauftemperatur beschreibt die Temperaturdifferenz, um welche der gesamte primäre Rücklauf des Netzes sinkt, wenn ein Wärmeabnehmer anstatt bei der effektiven Temperaturspreizung bei Referenz-Temperaturspreizung betrieben wird.

Obwohl grosse Wärmeabnehmer für die Wirtschaftlichkeit eines Fernwärmenetzes grundsätzlich wichtiger sind als kleine, sind bei der Analyse der Netzqualität immer sämtliche Wärmeabnehmer zu berücksichtigen. Da bei einer deutlichen Unterschreitung der Referenz-Temperaturspreizung bereits ein einzelner Wärmeabnehmer das gesamte Netz relevant verschlechtern kann, auch wenn dieser nur eine kleine Leistung aufweist.

10.1.1 Grundlagen

Die folgende Gleichung für den Wärmestrom (Wärmebedarf pro Leistung) bildet die Basis für die Berechnung des Mehrverbrauches und den Einfluss auf die Rücklauftemperatur. Wenn die Dichte und die spezifische Wärmekapazität des Wassers im betrachteten Temperaturbereich als konstant angenommen werden, ist die übertragbare Wärmeleistung proportional zur Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf und es gilt:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T = \dot{V} \rho c_p \Delta T$$

Zur Bewertung der Wärmeverbraucher werden aus den Wärmezählerdaten nach Bild 10.1 die Wärmemengen und die Wassermengen über einen Betrachtungszeitraum erfasst und daraus die mittlere Temperaturspreizung berechnet. Ideal ist eine kontinuierliche Erfassung der Daten mit einer Auswertung über eine Betrachtungsdauer von zum Beispiel einem Monat und einem Jahr sowie optional auch einer täglichen Auswertung für Überwachungszwecke. Wenn die Daten manuell erhoben werden, wird eine Auswertung über mindestens ein Quartal in der Heizperiode empfohlen.

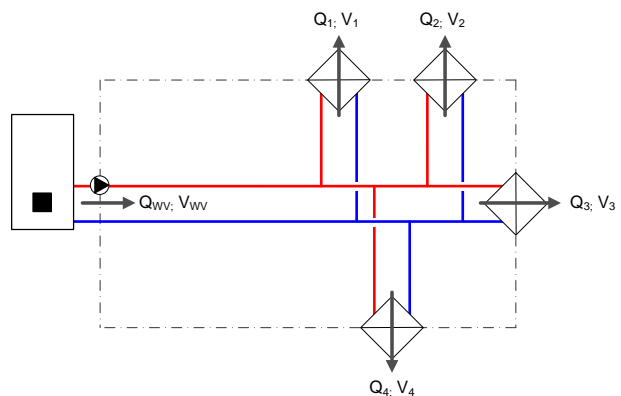


Bild 10.1 Schematische Darstellung der Kennwerte für die Aufzeichnung der Wärmezählerdaten für ein Fernwärmenetz mit einem Wärmeerzeuger mit Hauptgruppe für die Wärmeverteilung WV und vier Wärmeabnehmer V1 bis V4.

10.1.2 Mehrverbrauch

Der Mehrverbrauch ist das Wasservolumen, das im betrachteten Zeitraum im Vergleich zu einer Referenz-Temperaturspreizung zusätzlich über die Übergabestation geflossen ist. Der Mehrverbrauch für den Wärmeabnehmer i berechnet sich somit aus der Differenz des gemessenen Volumens und dem idealen Volumen (bezogen auf eine Referenz-Temperaturspreizung) wie folgt:

$$\begin{aligned} V_{i,MV} &= \Delta V_{i,WZ} - V_{i,REF} \\ \text{Mehrverbrauch} &= \text{WZ-Daten} - \text{Referenz Wert} \end{aligned}$$

Die gemessene Volumendifferenz für den Wärmeabnehmer i im betrachteten Zeitraum berechnet sich aus der Differenz des Standes des Wärmezählers zum End-Zeitpunkt (t_1) minus dem Stand des Wärmezählers zum Start-Zeitpunkt (t_0) wie folgt:

$$\Delta V_{i,WZ} = V_{i,WZ}(t_1) - V_{i,WZ}(t_0)$$

Das ideale Volumen für den Wärmeabnehmer i im betrachteten Zeitraum bei der Referenz-Temperaturspreizung berechnet sich aus dem Verhältnis der gemessenen Wärmemengen-Differenz für den Wärmeabnehmer i im betrachteten Zeitraum zu der Dichte des Wassers, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der Referenz-Temperaturspreizung wie folgt:

$$V_{i,REF} = \frac{\Delta Q_{i,WZ}}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T_{REF}}$$

Die gemessene Wärmemengen-Differenz für den Wärmeabnehmer i im betrachteten Zeitraum berechnet sich aus der Differenz des Standes des Wärmezählers zum End-Zeitpunkt (t_1) minus dem Stand des Wärmezählers zum Start-Zeitpunkt (t_0) wie folgt:

$$\Delta Q_{i,WZ} = Q_{i,WZ}(t_1) - Q_{i,WZ}(t_0)$$

Die Referenz-Temperaturspreizung sollte auf der maximalen Temperaturspreizung der Temperaturangaben von Vor- und Rücklauf der Technischen Anschlussvorschriften beruhen. Sind keine TAV vorhanden sollte als Referenz-Temperaturspreizung ein hoher, wenn möglich technisch machbarer Wert als Referenz gewählt werden.

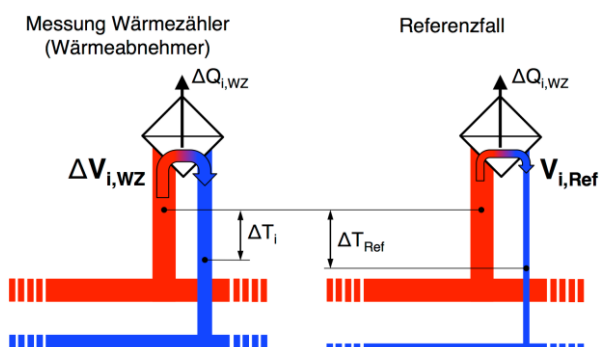


Bild 10.2 Darstellung des Mehrverbrauchs für einen Wärmeabnehmer durch den Vergleich der Wasservolumen aus den Wärmezählerdaten und bei einer Referenz-Temperaturspreizung.

10.1.3 Einfluss auf die Rücklauftemperatur

Eine alleinige Bewertung des Mehrverbrauchs genügt nicht zur Beurteilung der Notwendigkeit einer Optimierung. Von besonderem Interesse ist deshalb der Einfluss, den die Optimierung einer Übergabestation (auf die Referenz-Temperaturspreizung) auf die Temperatur des gesamten primären Rücklaufs hat. Der Einfluss auf die Rücklauftemperatur wird für jeden Wärmeabnehmer durch eine Temperaturdifferenz dargestellt, welche beschreibt um wie viel die Temperatur des gesamten primären Rücklaufes sinkt, wenn dieser Wärmeabnehmer auf die Referenz-Temperaturspreizung optimiert wird.

Der Wert berechnet sich aus der Differenz der mittleren Temperaturspreizung aus den Wärmezählerdaten des Hauptzählers und der mittleren Temperaturspreizung mit optimierter Übergabestation des Wärmeabnehmers wie folgt:

$$\Delta T_{i,FL} = \Delta T_{IST} - \Delta T^*_{IST}$$

Die mittlere Temperaturspreizung aus den Wärmezählerdaten des Hauptzählers berechnet sich aus dem Verhältnis der Wärmemengen-Differenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum zu der Dichte des Wassers, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der Volumendifferenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum wie folgt:

$$\Delta T_{IST} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta V_{WV,WZ}}$$

Die mittlere Temperaturspreizung mit optimierter Übergabestation berechnet sich aus dem Verhältnis der Wärmemengen-Differenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum zu der Dichte des Wassers, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der Differenz der Volumendifferenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum abzüglich dem Mehrverbrauch für den Wärmeabnehmer i wie folgt:

$$\Delta T^*_{IST} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho \cdot c_p \cdot (\Delta V_{WV,WZ} - V_{i,MV})}$$

Die Wärmemengen-Differenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum berechnet sich aus der Differenz des Standes des Wärmezählers zum End-Zeitpunkt (t_1) minus dem Stand des Wärmezählers zum Start-Zeitpunkt (t_0) wie folgt:

$$\Delta Q_{WV,WZ} = Q_{WV,WZ}(t_1) - Q_{WV,WZ}(t_0)$$

Die Volumendifferenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum berechnet sich aus der Differenz des Standes des Wärmezählers zum End-Zeitpunkt (t_1) abzüglich dem Stand des Wärmezählers zum Start-Zeitpunkt (t_0) wie folgt:

$$\Delta V_{WV,WZ} = V_{WV,WZ}(t_1) - V_{WV,WZ}(t_0)$$

Zusammengefasst ergibt sich für den Einfluss auf die Rücklauftemperatur folgende Gleichung:

$$\Delta T_{i,RL} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{1}{\Delta V_{WV,WZ}} - \frac{1}{(\Delta V_{WV,WZ} - V_{i,MV})} \right)$$

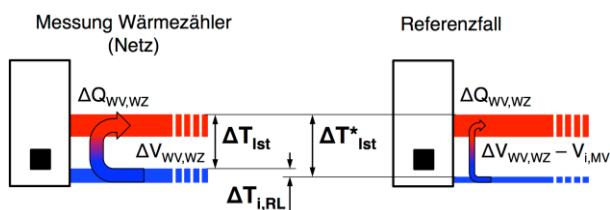


Bild 10.3 Darstellung der Temperaturspreizung und der Volumenströme vor Optimierung (links) und nach Optimierung (rechts) eines Wärmeabnehmers.

10.2 Vorgehen

10.2.1 Datenerfassung und Auswertung

Datenerfassung. Die Ablesung der Wärmehändler für die Abrechnung der gelieferten Wärme geschieht in der Regel ein- bis viermal jährlich, wobei meist nur die Wärmemengen erfasst werden.

Am einfachsten geschieht die Datenerfassung, wenn die Wärmehändlerdaten an einem zentralen Ort erfasst werden. Dies kann z.B. über einen Datenserver geschehen, der mindestens die Wärmehändlerdaten der Verbraucher erfasst. Noch komfortabler ist ein übergeordnetes Leitsystem, das alle relevanten Daten erfasst. Dies erleichtert die Auswertung und die Fakturierung. Für die Auswertung der Wärmehändlerdaten muss neben der Wärmemenge in kWh auch zwingend das Volumen in m³ erfasst werden. Ist kein Leitsystem oder ähnliches vorhanden, bieten sich folgende Möglichkeiten an: monatliches Ablesen der Wärmehändlerdaten vor Ort (aufwändig), quartalsweise oder saisonales Ablesen der Wärmehändler-

daten (Heizsaison, Übergangszeit, Sommer) oder Ablesen Anfang und Ende Abrechnungsperiode.

Auswertung. Die Berechnung des Mehrverbrauchs und die Bestimmung des Einflusses auf die Rücklauftemperatur erfolgen am einfachsten in einer Tabellenkalkulation. Die folgenden Ausführungen basieren auf einer beispielhaften Datenauswertung in einer Excel-Tabelle anhand eines fiktiven Fernwärmenetzes.

Die Tabelle umfasst im ersten Teil einen Eingabebereich (Bild 10.4), in dem **Eingabegrößen (rot)** festzulegen sind. Im gezeigten Beispiel sind folgende Werte eingegeben:

- Referenz-Temperaturspreizung ΔT_{REF} 35 K
- Spez. Wärmekapazität Wasser c_p 4.185 J/(kg K)
- Dichte Wasser ρ_w 980 kg/m³
- Ableszeitraum Wärmehändler Start 31. Jan. 2016
- Ableszeitraum Wärmehändler Ende 30. Mai 2016

Der zweite Teil umfasst einen Ausgabebereich (Bild 10.4) für **berechnete Größen (blau)** im Ableszeitraum, die aus den Eingabegrößen und den Wärmehändlerdaten bestimmt werden. Im Beispiel gilt:

- Ableszeitraum t in Tagen 120 Tage
- Ableszeitraum t Stunden 2880 h
- Mittlere Temperaturspreizung 25.4 K
- Gesamte Wärmemenge 1'848'043 kWh
- Gesamte Wassermenge 63'853 m³
- Spezifische Wassermenge 22.2 m³/h
- Mittlere Leistung 641.7 kW
- Mittlere freie Leistung pro K 25.3 kW/K

Annahmen		
Referenz Temperaturspreizung	K	35
spez. Wärmekapazität	kJ/(kg K)	4.185
Dichte Wasser	kg/m ³	980
Ableszeitraum	31.01.16	
	30.05.16	
	d	120
	h	2880
Ergebnisse		
mittlere Temperaturspreizung	K	25.4
Gesamte Wärmemenge	kWh/t	1'848'043
Gesamte Wassermenge	m ³ /t	63'853
Spezifische Wassermenge	m ³ /h	22.2
Leistungs- und Optimierungspotenzial		
Mittlere Leistung (Hauptzähler)	kW	641.7
Mittlere Kapazität (Hauptzähler), wenn Spreizung +1K	kW/K	25.3

Bild 10.4 Excel-Datei zur Auswertung von Mehrverbrauch und Einfluss der Rücklauftemperatur für ein fiktives Fernwärmenetz. Ausschnitt mit Eingabegrößen und berechneten Größen.

In einem dritten Eingabebereich werden aufbereitete **Wärmezählerdaten** der Wärmeabnehmer eingefügt (Bild 10.5). Aus diesen und den Eingabegrößen werden der Mehrverbrauch und der Einfluss auf die Rücklauf-temperatur bestimmt. Die fünf Spalten mit rotem Hintergrund sind für die Dateneingabe der aufbereiteten Wärmezählerdaten der Wärmeabnehmer reserviert. Die Wärmezählerdaten müssen in einem separaten Dokument aufbereitet und danach in das Dokument kopiert werden. Die Aufbereitung erfolgt nach folgenden Kriterien:

- Kunden-Nummer: z.B. Zähler-Nummer des Wärmezählers (nicht zwingend notwendig)
- Kunde: Name des Wärmeabnehmers
- Abonnierte Leistung: Angabe in kW (nicht zwingend notwendig, hier zur Prognose der jährlichen Vollbetriebsstundenzahl der Wärmeabnehmer)
- Wärmemenge: übertragene Wärmemenge in kWh im Ablesezeitraum
- Wassermenge: durchströmte Wassermenge in m³ im Ablesezeitraum.

In den nachfolgenden Spalten werden folgende Werte für jeden Wärmeabnehmer berechnet:

- **Vollbetriebsstundenzahl:** Berechnet die jährliche Vollbetriebsstundenzahl der Wärmeabnehmer. Der

Wert wird auf ein Jahr hochgerechnet, falls der Ablesezeitraum kürzer als ein Jahr (8760 Stunden) ist. Dieser Berechnungsschritt ist für die Bewertung nicht notwendig und dient zur Plausibilisierung der Wärmezählerdaten.

- **Mehrverbrauch:** Zeigt die Ergebnisse für den Mehrverbrauch nach Kapitel 10.1.2.
- **Einfluss auf Rücklauf:** Zeigt die Ergebnisse für den Einfluss auf die Rücklauf-temperatur nach Kapitel 10.1.3. Zu beachten ist, dass die berechneten Werte des Einflusses auf die Rücklauf-temperatur bei einer Optimierung in der Regel nicht erreicht werden, sie zeigen jedoch das Optimierungspotenzial auf.
- **Mittlere Spreizung:** Für den erfassten Ablesezeitraum wird die mittlere Temperaturspreizung berechnet und ausgewiesen. Diese Angabe ist hilfreich, um die Ergebnisse des Mehrverbrauchs und des Einflusses auf die Rücklauf-temperatur zusätzlich zu beurteilen.

Mit der Excel-Funktion *Filter* und *Daten aufsteigend Sortieren* können in der vordersten Spalte ‚Rang‘ die Wärmeabnehmer mit absteigendem Mehrverbrauch geordnet werden. Der Wärmeabnehmer mit dem höchsten Mehrverbrauch weist den Rang 1 aus.

Rang	Kunden Nummer	Kunde	abonnierte Leistung	Wärmemenge	Wassermenge	Vollbetriebsstundenzahl	Mehrverbrauch	Einfluss auf Rücklauf	Mittlere Spreizung
-	-	-	kW	kWh/t	m ³ /t	h/t	m ³ /t	°C	K
1	WZ_20	Wärmeabnehmer 20	375	299'890	12'563	2'432	5'042.01	-2.2	21.0
2	WZ_19	Wärmeabnehmer 19	275	157'535	7'863	1'742	3'912.16	-1.7	17.6
3	WZ_30	Wärmeabnehmer 30	18	15'412	2'547	2'604	2'160.48	-0.9	5.3
4	WZ_43	Wärmeabnehmer 43	65	60'787	2'398	2'845	873.01	-0.4	22.3
5	WZ_38	Wärmeabnehmer 38	141	127'429	4'015	2'749	819.49	-0.3	27.9
6	WZ_29	Wärmeabnehmer 29	75	81'245	2'774	3'295	736.74	-0.3	25.7
7	WZ_44	Wärmeabnehmer 44	108	83'441	2'612	2'350	519.37	-0.2	28.0
8	WZ_39	Wärmeabnehmer 39	61	63'688	2'074	3'176	476.76	-0.2	27.0
9	WZ_42	Wärmeabnehmer 42	106	92'863	2'781	2'665	451.87	-0.2	29.3
10	WZ_33	Wärmeabnehmer 33	31	27'976	1'144	2'745	442.29	-0.2	21.5

Bild 10.5 Excel-Datei zur Auswertung von Mehrverbrauch und Einfluss der Rücklauf-temperatur. Abgebildet sind die zehn schlechtesten Wärmeabnehmer eines fiktiven Fernwärmenetzes.

10.2.2 Beurteilung

Auf Basis der Datenauswertung können die schlechtesten Wärmeabnehmer mit dem höchsten Mehrverbrauch ermittelt werden. Aus dem Beispiel geht hervor, dass der Wärmeabnehmer 20 den höchsten Mehrverbrauch aufweist und mit einer mittleren Temperaturspreizung von lediglich 21.0 K zu der hohen Rücklauf-temperatur beiträgt. Die Optimierung dieses Wärmeabnehmers könnte den gesamten Rücklauf um 2.2 K abkühlen.

Die nächsten drei Wärmabnehmer weisen zusammen ein Optimierungspotenzial zur Senkung der Rücklauf-temperatur von gut 3 K auf. Im Vergleich dazu weisen die weiteren Wärmeabnehmer nur noch einen geringen Einfluss auf die Rücklauf-temperatur auf.

Wenn in der Spalte ‚Mittlere Spreizung‘ ein untypisch kleiner Wert, wie z.B. bei Wärmeabnehmer 30 (Rang 3) von 5.3 K erscheint, deutet dies auf eine mögliche Fehlfunktion in der Übergabestation hin. Dies sollte möglichst schnell behoben werden.

Das weitere Vorgehen besteht darin, die Gründe für den hohen Mehrverbrauch der schlechtesten Wärmeabnehmer zu eruieren und Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten und umzusetzen. Dazu wird eine Begehung der Anlage mit dem Wärmeabnehmer, dem Betreiber des Fernwärmenetzes und einer Fachperson empfohlen. Daraus können Optimierungsmassnahmen abgeleitet werden, welche in der Regel von einer Fachperson der Fernwärmetechnik auszuführen sind. Vor einem Entscheid kann bei Bedarf vorab der ökonomische Effekt

der einzelnen Optimierungsmassnahmen bewertet werden.

Typische Gründe für zu geringe Temperaturspreizung und dadurch verursachten Mehrverbrauch sind falsch ausgelegte oder nicht sachgerecht installierte Komponenten, Verschleiss und Defekte aufgrund von Alterung sowie ungeeignete Einstellungen der Mess- und Steuerungstechnik. Nach einer Untersuchung der Internationalen Energieagentur (IEA) sind dabei drei Kategorien der Anlagentechnik wie folgt verantwortlich für die Mängel [12]:

- Die sekundärseitige Wärmeverteilung ist für rund 60 % der Störungen verantwortlich.
- Auf die Brauchwarmwassererwärmung entfallen rund 30 % der Mängel.
- Für die restlichen Mängel sind die Übergabestationen mit primär- und sekundärseitigen Komponenten verantwortlich.

Konkrete Ursachen für Fehlfunktionen sind defekte Ventilsteuerungen, undichte Ventile, ungeeignete Reglereinstellungen sowie eine unpassende hydraulische Einbindung auf der Primär- und Sekundärseite des Wärmeabnehmers. Beispiele sind offene Expansionsgefässe, Doppelverteiler, Bypässe, Überströmeinrichtungen zwischen Vor- und Rücklauf, Einspritzschaltungen mit Dreiwegventilen, Umlenkschaltungen mit Dreiwegventilen und Vierwegmischer. Entsprechend der zahlreichen möglichen Fehlerquellen zeigt eine Erhebung an 52 Fernwärmenetzen, dass viele Netze im Praxisbetrieb die vorgesehene Temperaturspreizung nicht erreichen [16].

10.2.3 Umsetzung und Erfolgskontrolle

Bei Optimierungsmassnahmen auf der Primärseite liegen sowohl die Verantwortung als auch die Vorteile beim Betreiber des Fernwärmenetzes. Die Umsetzung von Optimierungsmassnahmen kann deshalb in der Regel durch den Netzbetreiber in alleiniger Verantwortung erfolgen.

Demgegenüber besteht für Massnahmen auf der Sekundärseite ein möglicher Zielkonflikt, da die erhöhte Temperaturspreizung in erster Linie dem Wärmelieferanten zugute kommt, die Verantwortung für die Umsetzung der Massnahmen dagegen beim Wärmeabnehmer liegt. Dieser profitiert zwar von einer reduzierten Pumpleistung und reduzierten Verteilverlusten auf der Sekundärseite, die daraus resultierenden Kosteneinsparungen sind aber meist nur gering. Aus diesem Grund ist zu prüfen, ob aus den TAV Mindestanforderungen an die Temperaturspreizung und an Massnahmen abzuleiten sind und/oder ob eine Beteiligung an den Kosten für den Wärmelieferanten infrage kommt.

Nach Umsetzung der Massnahmen sollte mit einer Erfolgskontrolle die Optimierung überprüft werden.

10.3 Empfehlungen zur Analyse der Wärmeabnehmer

Die Analyse der Wärmeabnehmer anhand des Mehrverbrauches ist einfach umsetzbar und die Basis dazu bilden hauptsächlich Wärmezählerdaten der Wärmeabnehmer und Wärmeerzeuger. Grundlagenwissen in Thermodynamik und Praxiswissen bzw. Erfahrung in der Gebäude- und Fernwärmetechnik wird vorausgesetzt. Je nach Stand der Technik und Know-how kann das in der Tabelle 10.1 vorgestellte Vorgehen von Betreibern von Fernwärmenetzen selbst durchgeführt oder durch eine erfahrene Fachperson (Planer) ausgeführt werden.

Hinweise zur Analyse der Wärmeabnehmer und der Umsetzung von Massnahmen:

- Es wird empfohlen, alle **Wärmezählerdaten** (Wärmeabnehmer und Wärmeerzeuger) an einem zentralen Ort zu erfassen. Dies kann z.B. über einen Datenserver geschehen, der mindestens die Wärmezählerdaten der Wärmeabnehmer erfasst. Noch komfortabler ist ein übergeordnetes Leitsystem, das alle relevanten Daten erfasst. Dies erleichtert die Auswertung und auch die Fakturierung. Für die Auswertung der Wärmezählerdaten muss neben der üblichen Wärmemenge in kWh auch das Volumen in m³ während der Betrachtungsdauer erfasst werden.
- Die **Auswertung der Wärmezählerdaten** anhand des Mehrverbrauches erfolgt in der Regel mit einer Tabellenkalkulation (z.B. Excel). Für die Analyse wird ein gewisser Initialaufwand vorausgesetzt, der je nach Know-How mehr oder weniger gross ist. Wenn die Wärmezählerdaten einfach verfügbar sind ist der Zeitaufwand relativ gering.
- Es wird empfohlen, alle Wärmeabnehmer **periodisch** auf Mehrverbrauch zu **analysieren**. Somit können Veränderungen z.B. durch Defekt von Ventilantrieben rasch identifiziert werden. Je nach Aufwand und Automatisierungsgrad der Auswertung sollte dies mindestens pro Quartal, besser monatlich, erfolgen. Mit einem Leitsystem wäre es möglich, diese Auswertung zu automatisieren und den Mehrverbrauch z.B. monatlich auszuweisen, sofern eine Kontrolle der Wärmeabnehmer mit dem vorhandenen Leitsystem nicht ohnehin erfolgt.
- Zur Klärung des Optimierungsbedarfs ist notwendig, dass **erfahrenes Personal** oder **externe Fachpersonen** die Situation vor Ort klärt. Zusammen mit dem Wärmekunden muss die Ist-Situation erfasst werden, um daraus Optimierungsmassnahmen abzuleiten. Eine Rangierung der möglichen Optimierungsmassnahmen nach Nutzen und Aufwand wird empfohlen. Dies erleichtert den Entscheidungsträgern, die bestmögliche Lösung zu finden.
- Bei der Umsetzung von Optimierungsmassnahmen gilt es zwischen zwei **Verantwortlichkeits-** bzw. **Zuständigkeitsbereichen** zu unterscheiden. Einerseits betrifft die Optimierungsmassnahme die Primärseite,

in diesem Fall liegt die Zuständigkeit beim Wärmelieferanten. Andererseits kann die Optimierung auch die Sekundärseite betreffen, in diesem Fall liegt die Zuständigkeit beim jeweiligen Wärmeabnehmer. In beiden Fällen kommt die Optimierungsmassnahme hauptsächlich dem Wärmelieferanten zugute wie erhöhte Anschlusskapazität und tiefere Rücklauftemperaturen und als Folge davon tiefere Wärmegestehungskosten. Betrifft nun die Optimierungsmassnahme die Sekundärseite, ist durch den Wärmelieferanten anhand einer Güterabwägung abzuschätzen, inwiefern eine Kostenbeteiligung oder -übernahme infrage kommt. Zumindest sollte zwischen Wärmeabnehmer und Wärmelieferanten vertraglich vereinbart werden, dass im Falle einer sekundärseitigen Sanierung der hydraulischen Einbindung sämtliche Massnahmen mit dem Wärmelieferanten abzusprechen und von diesem zu genehmigen sind.

- Nach Umsetzung der Massnahmen sollte mit einer **Erfolgskontrolle** die Optimierung kontrolliert und anhand der Ergebnisse bestätigt werden.

Tabelle 10.1 Vorgehen zur Analyse und Optimierung der Wärmeabnehmer.

Was	Beschreibung	Wer
Datenerfassung und Auswertung	Wärmezählerdaten erfassen	Betreiber / Planer
	Mehrverbrauch und Einfluss auf die Rücklaufemperatur ausweisen	Betreiber / Planer
	Rangierung der Wärmeabnehmer nach Mehrverbrauch	Betreiber / Planer
Beurteilung	Auf der Basis der Datenerfassung und Auswertung werden die schlechtesten Wärmeabnehmer für eine vertiefte Beurteilung bestimmt.	Betreiber / Planer
	Beurteilung der Ist-Situation der schlechtesten Wärmeabnehmer vor Ort	Betreiber / Planer / Wärmeabnehmer
	Ableitung von Optimierungsmassnahmen	Betreiber / Planer
	Gewichtung der Optimierungsmassnahmen anhand von Nutzen und Aufwand	Betreiber / Planer
Umsetzung und Erfolgskontrolle	Zuständigkeiten klären	Betreiber / Wärmeabnehmer
	Güterabwägung der Kostenübernahme oder Kostenbeteiligung falls Optimierungsmassname die Sekundärseite betrifft (Zuständigkeit Wärmeabnehmer)	Betreiber
	Optimierungsmassnahmen umsetzen	Betreiber / Wärmeabnehmer
	Kontrolle der Optimierung	Betreiber / Planer

Anhang

11 Stoffwerte von Wasser

Tabelle 11.1 Stoffwerte von Wasser im Sättigungszustand [48].

Temperatur °C	Dampfdruck bar	Dichte kg/m ³	Spezifische Wärmekapazität J/(kg K)	Wärmeleitfähigkeit W/(m K)	Kinematische Viskosität 10 ⁻⁶ m ² /s
0	0.0061	999.79	4'220	0.562	1.792
0.01	0.0061	999.79	4'220	0.562	1.792
5	0.0087	999.92	4'205	0.572	1.518
10	0.0123	999.65	4'196	0.582	1.306
15	0.0171	999.05	4'189	0.591	1.139
20	0.0234	998.16	4'185	0.600	1.003
25	0.0317	997.00	4'182	0.608	0.893
30	0.0425	995.61	4'180	0.615	0.801
35	0.0563	994.00	4'179	0.622	0.724
40	0.0738	992.18	4'179	0.629	0.658
45	0.0959	990.18	4'179	0.635	0.602
50	0.1235	988.01	4'180	0.641	0.554
55	0.1576	985.67	4'181	0.646	0.511
60	0.1995	983.18	4'183	0.651	0.474
65	0.2504	980.53	4'185	0.655	0.442
70	0.3120	977.75	4'188	0.660	0.413
75	0.3860	974.83	4'192	0.663	0.388
80	0.4742	971.78	4'196	0.667	0.365
85	0.5787	968.60	4'200	0.670	0.344
90	0.7018	965.30	4'205	0.673	0.326
95	0.8461	961.89	4'211	0.676	0.309
100	1.0142	958.35	4'217	0.678	0.294
110	1.4338	950.95	4'230	0.681	0.268
120	1.9867	943.11	4'246	0.684	0.246
130	2.7026	934.83	4'265	0.685	0.228
140	3.6150	926.13	4'286	0.685	0.212
150	4.7610	917.01	4'310	0.684	0.199
160	6.1814	907.45	4'338	0.682	0.188
170	7.9205	897.45	4'369	0.679	0.178
180	10.0260	887.01	4'406	0.675	0.169
190	12.5500	876.08	4'447	0.670	0.162
200	15.5470	864.67	4'494	0.663	0.155

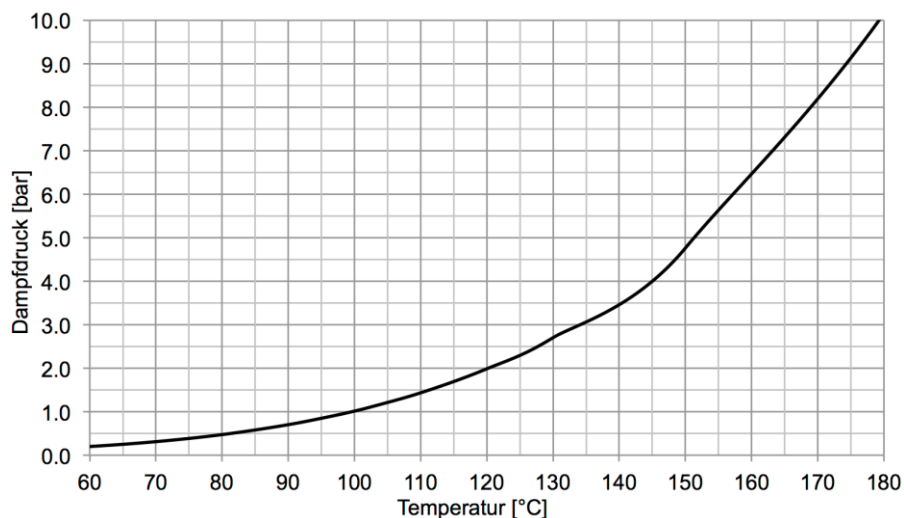


Bild 11.1 Dampfdruck von Wasser im Sättigungszustand [48] gemäss Tabelle 11.1.

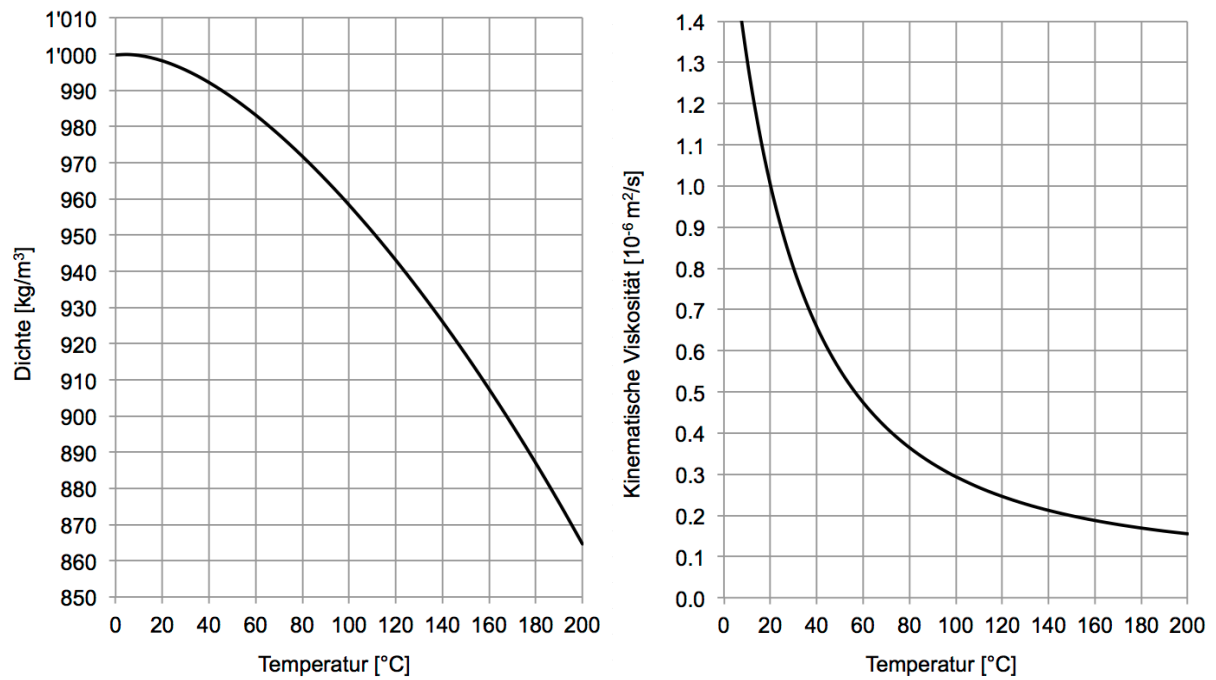


Bild 11.2 Stoffwerte von Wasser im Sättigungszustand [48] gemäss Tabelle 11.1.
Links Dichte, Rechts Kinematische Viskosität

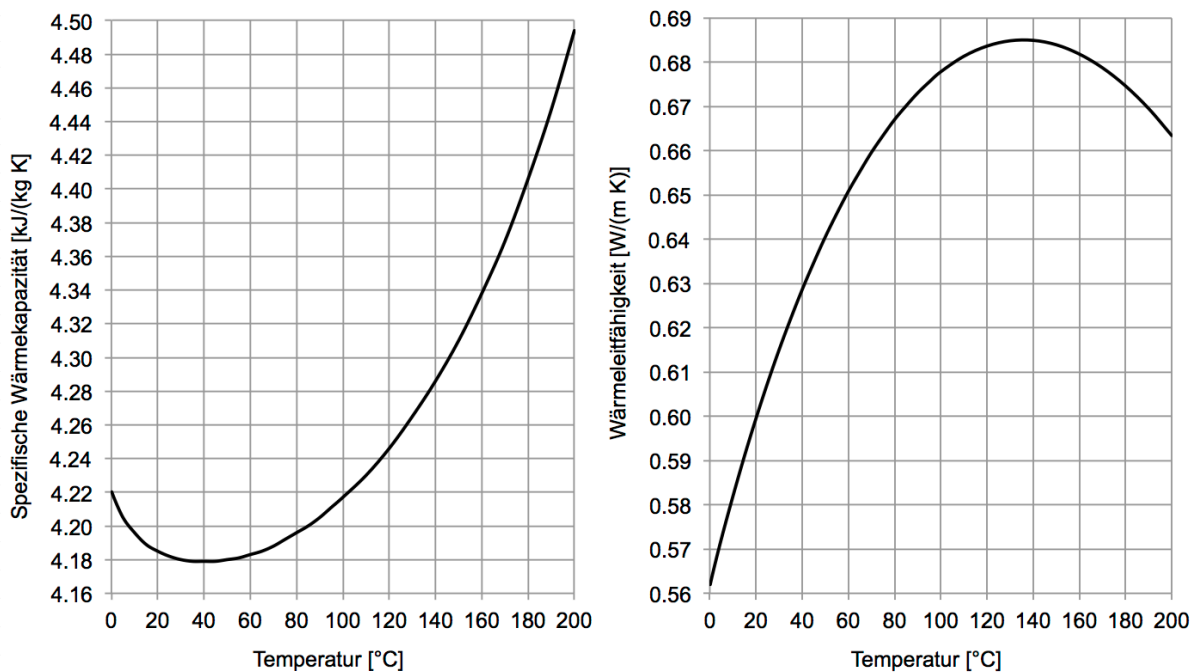


Bild 11.3 Stoffwerte von Wasser im Sättigungszustand [48] gemäss Tabelle 11.1.
Links Spezifische Wärmekapazität, Rechts Wärmeleitfähigkeit

12 Ergänzungen zur Wasserqualität

Die folgenden Erläuterungen sind als Ergänzung zum Kapitel 4.8 Wasserqualität gedacht.

12.1 Messgrößen

Die Qualitätsüberwachung des Kreislaufwassers in Fernwärmenetzen kann durch die Messung und Überwachung der folgenden Werte gewährleistet werden:

pH-Wert:

Der pH-Wert ist eine Masszahl für die saure, neutrale oder alkalische Reaktion des Wassers. Säuren spalten im Wasser Wasserstoffionen (H+) ab. Laugen (Basen) spalten im Wasser Hydroxidionen (OH-) ab. Der pH-Wert ist daher das Mass für die Wasserstoffionenkonzentration (H+).

$$pH = -\log_{10}(H^+)$$

Beispiel: 0.00001 mol H+/l: $pH = -\log_{10} 0.00001 = 5$

Bezogen auf die Temperatur von 25°C gilt die pH-Skala von 0 bis 14. Wasser ist sauer bei $pH < 7$, neutral bei $pH = 7$ und alkalisch bei $pH > 7$. Eine Veränderung des pH-Wertes um eine Stelle (zum Beispiel von pH 8 auf pH 9) bedeutet, dass sich der Säuregehalt des Wassers um das Zehnfache verändert hat.

Die Messung erfolgt mit Indikatoren (Indikatorpapier oder flüssige Indikatoren) oder elektrochemisch mittels pH-Elektroden.

Elektrische Leitfähigkeit:

Die Bestimmung des Salzgehaltes erfolgt in der Regel durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit, in die alle dissoziierten Bestandteile des zu untersuchenden Mediums eingehen, d.h. Basen, Säuren und Salze. Eine steigende Leitfähigkeit begünstigt die elektrochemischen Korrosionsvorgänge.

Die elektrische Leitfähigkeit stellt den reziproken Wert des elektrischen Widerstands ($S = 1/\text{Ohm}$) bezogen auf einen Wasserwürfel von 1 cm bei 25°C dar (Einheit: $\mu\text{S}/\text{cm}$; Mikrosiemens/cm).

Wasserhärte:

Nach dem SI-Masssystem wird der Gehalt der Erdalkalitionen, also die Gesamthärte in Mol pro Liter oder für die geringen Konzentrationen in Millimol pro Liter (mmol/l) angegeben.

Die Wasserhärte wurde früher in Grad deutscher Härte (°dH) angegeben. Ein Deutscher Härtegrad entspricht 10 mg Calciumoxid pro Liter oder 10 g Calciumoxid pro Kubikmeter. In der Schweiz sind die französischen Härtegrade °fH weit verbreitet. Später wurde die Angabe der Wasserhärte in der praxisgerechten Stoffmengen-Äquivalenzeinheit Millival pro Liter (mval/l) verwendet (siehe Tabelle 12.1). Heute sind gesetzlich die oben genannten molaren Angaben gefordert.

Tabelle 12.1 Umrechnung der Wasserhärte.

	°dH	°fH	mval/l	mmol/l	
Deutsche Grad	°dH	1	1.78	0.357	0.1783
Französische Grad	°fH	0.56	1	0.2	0.1
Äquivalenzeinheit	mval/l	2.8	5	1	0.5
SI-Masssystem	mmol/l	5.6	10	2	1

Die Wasserqualität kann regional stark unterschiedlich sein. Vereinfacht wird unter der Härte des Wassers der Gehalt an gelösten Kalzium- und Magnesiumsalzen verstanden (Gesamthärte GH). Zusätzlich wird zwischen Carbonathärte (CH) und Nichtcarbonathärte (NCH) unterschieden. Beide Härtebildner spielen eine besondere Rolle, da diese sich bereits bei einer Erwärmung ab 61°C als schwer lösliche Niederschläge (Kesselstein) an den Rohr- und Behälterwandungen ablagern.

- GH: Summe der Erdalkalien GH:
GH = Calcium Ca^{2+} + Magnesium Mg^{2+}
- CH: Derjenige Anteil an Calcium und Magnesium, welcher als Hydrogencarbonat (HCO_3^-) und Carbonat (CO_3^{2-}) vorliegt.
- NCH: Anteil an Calcium und Magnesium, welcher mit anderen Anionen verbunden ist, wie Chloride (Cl^-), Sulfate (SO_4^{2-}), Nitrate (NO_3^-)

Es gilt: **GH = CH + NCH**

In der Schweiz wird Wasser in sechs Härtestufen unterteilt (siehe Tabelle 12.2). Die Wasserqualität kann regional stark unterschiedlich sein. Allgemeine Angaben diverser Regionen sind deshalb unzureichend. Zudem können die Wasserwerte bei Verbundanlagen von Seewasser, Grundwasser und Quellwasser im Jahresverlauf unterschiedlich ausfallen.

Tabelle 12.2 Wassertypen in der Schweiz und deren Einteilung in französische Härtegrade

Wassertyp	Wasserhärte °fH
sehr weich	0-7
weich	7-15
mittelhart	15-25
ziemlich hart	25-32
hart	32-42
sehr hart	> 42

Es wird empfohlen, die Wasseranalyse des entsprechenden Wassers bei der zuständigen Wasserversorgung einzufordern. Trinkwasser ist ein Lebensmittel und untersteht der Deklarationspflicht. Die notwendigen Analysedaten müssen deshalb von der Wasserversorgung zur Verfügung gestellt werden. Bei der Verwendung von Oberflächenwasser und von Regenwasser muss die Wasseranalyse aufgrund einer repräsentativen Probe erstellt werden.

Sauerstoff

Normales Leitungswasser enthält, je nach Herkunft, in der Regel zwischen 5 und 12 mg/l Sauerstoff. In einem

geschlossenen Wassersystem stellt sich nach einigen Tagen bis Wochen und ohne weitere Nachspeisung ein tieferer Sauerstoffgehalt ein.

Ein erhöhter Sauerstoffgehalt in einem geschlossenen System (Heiz- oder Kühlkreislauf) ist unerwünscht und kann von einer früheren Nachspeisung oder aber auch von Sauerstoffdiffusion (zum Beispiel durch nicht diffusionsdichte Kunststoffrohre) herrühren.

Bei der Bestimmung des Sauerstoffgehaltes von Kreislaufwasser ist darauf zu achten, dass kein zusätzlicher Sauerstoff in das Probewasser gelangen kann.

Chlorid

Der Gehalt an Chlorid ist wichtig für die Korrosionswirkung. Chlorid begünstigt die örtliche Korrosion (Loch-, Muldenfrass). Chloride können in grösseren Konzentrationen auch Chromstahl und Chromnickelstahl beeinträchtigen, insbesondere bei höheren Wandtemperaturen. Der Chlorid-Gehalt wird in mg/l angegeben.

Sulfat

Sulfat ist ebenfalls wichtig für die Korrosionswirkung, da es die örtliche Korrosion (Loch-, Muldenfrass) beeinflusst. Der Sulfat-Gehalt wird in mg/l angegeben.

Nitrat

Nitrat begünstigt ebenfalls die örtliche Korrosion (Loch-, Muldenfrass). Erhöhte Nitratwerte im Trinkwasser, vor allem in Gebieten mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung, können das Korrosionsverhalten wesentlich beeinflussen. Der Nitratgehalt wird in mg/l angegeben.

12.2 Verfahren der Wasseraufbereitung

Die Verfahren der Wasseraufbereitung können sich auf das Ergänzungswasser und/oder auf einen Teilstrom des Kreislaufwassers beziehen. Die Qualität des Kreislaufwassers kann sich durch Fremdwassereinbruch, Gaseintrag oder Korrosionsvorgänge verschlechtern und durch den Einsatz von Konditionierungsmitteln verändern. Mit Hilfe einer Teilstromaufbereitungsanlage (Filtration, Entgasung und Ionenaustauscher) können im Bypass die suspendierten und gelösten Inhaltsstoffe entfernt werden. Folgende Verfahren kommen zum Einsatz:

Filtration:

Bei der Entfernung von wasserunlöslichen Stoffen werden zur Vermeidung von Ablagerungen oder Funktionsbeeinträchtigungen nachgeschalteter Bauteile verschiedene mechanische Verfahren eingesetzt. Für feindisperse Stoffe können z.B. Kerzenfilter, Beutelfilter oder Anschwemmkerzenfilter verwendet werden. Für grobe Schmutzpartikel werden Schmutzfänger eingesetzt.

Entsalzung:

Durch Ionenaustauscherverfahren können im Wasser gelöste Salze (Kationen und Anionen) zur Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit entfernt werden. Hierfür

werden üblicherweise stark saure Kationenaustauscher in Kombination mit stark basischen Anionenaustauschern eingesetzt. Eine weitgehende Entsalzung kann auch mittels Membrantechnik (Umkehrosmose) erreicht werden. Beim Einsatz der Verfahren sind im Teilstrombetrieb Temperaturgrenzen zu berücksichtigen.

Die Elektrodeionisation (EDI) ist eine elektrochemische Entsalzung. Das Verfahren ist eine Kombination aus Elektrodialyse und Ionenaustauscher. Eine EDI-Anlage wird als Verfahrensschritt zur Restentsalzung nach einer Umkehrosmose eingesetzt. Bei optimaler Vorbehandlung kann eine Leitfähigkeit bis 0,06 $\mu\text{S}/\text{cm}$ erreicht werden. Ein EDI-Modul besteht aus ionenselektiven Membranen und Ionenaustauscherharzen die sandwichartig zwischen zwei Elektroden (Anode (+) und Kathode (-)) angeordnet sind. Durch das Anlegen einer Gleichstromspannung an die Pole werden die Ionen entsprechend ihrer Ladung zur Wanderung gezwungen. Die anionenselektiven Membranen lassen nur Anionen, die kationenselektiven Membranen Kationen passieren. Beide Membrantypen sind wasserundurchlässig.

Enthärtung:

Durch Verwendung von mit technischem Steinsalz regenerierbaren Kationenaustauschern, werden die Härtebildner (Calcium- und Magnesium-Ionen) gegen Natrium-Ionen ausgetauscht. Das Wasser ist somit härtefrei und kann keine Steinbildung mehr verursachen. Diese Art der Wasseraufbereitung wird üblicherweise bei der salzhaltigen Betriebsfahrweise angewendet.

Entgasung:

Für die Entfernung des im Wasser natürlich vorhandenen Anteils gelöster Gase, wie O_2 , N_2 und CO_2 haben sich in der Praxis die Verfahren der thermischen Entgasung und der Vakuumentgasung (Druckstufenentgasung) bewährt.

Sauerstoff-Entfernung:

Die teilweise Entfernung von Sauerstoff kann ebenfalls bei der Entgasung geschehen.

In geschlossenen Kreisläufen ist zur Wasserbehandlung der Einsatz von Opferanoden zur Sauerstoffbindung geeignet. Die Magnesiumanoden bauen Magnesium ab, das mit Sauerstoff oxidiert, womit der Sauerstoff gebunden wird. Der dabei entstehende $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -Schlamm muss auf geeignete Weise abgeführt werden

12.3 Verfahren der Wasserbehandlung (Konditionierung)

Unter Konditionierung wird die Wasserbehandlung zur Stabilisierung von Härte, der Korrosionsschutz und die Bekämpfung von biologischem Befall mit geeigneten Zusatzstoffen verstanden. Die Zugabe von chemischen Mitteln kann zur Einstellung der Richtwerte notwendig sein oder auch eine Massnahme zur Begrenzung von

Schäden durch die in der Praxis meist unvermeidlichen Fremdwasser- und Luftenbrüche darstellen.

Dabei sollte beachtet werden, dass Konditionierungsmittel die elektrische Leitfähigkeit erhöhen kann. Es ist auf die Werkstoffverträglichkeit und auf die Reinheit der eingesetzten Chemikalien zu achten. Weiter ist bei der Kombination von Konditionierungsmittel auf die Verträglichkeit der Chemikalien untereinander zu achten. Beim Einsatz von Konditionierungsmitteln ist neben hygienisch-toxikologischen Aspekten auch auf deren Umweltverträglichkeit zu beachten.

Anhebung des pH-Wertes:

Eine Anhebung des pH-Wertes wird durchgeführt, um eine Eisenauflösung im Wasser, die unter der Bildung von Eisen(II)-hydroxid abläuft, zurückzudrängen und eine Schutzschichtbildung aus Eisenoxiden (Magnetit) zu bilden (bei Vorlauftemperatur $\gg 100^\circ\text{C}$). Um eine ausreichende Schutzalkalität zu erzielen, können grundsätzlich sowohl Natronlauge (NaOH) als auch die in den letzten Jahren bewährten Amine eingesetzt werden.

Als Optimum für den Schutz des Werkstoffes Eisen gilt ein pH-Wert von ca. 9.3. Praktische Erfahrungen zeigen, dass bei indirekt beheizten Anlagen pH-Werte bis herab zu 8.5 für einen störungsfreien Betrieb genügen. Bei Messingwerkstoffen besteht die Gefahr von Erosionskorrosion bei pH-Werten > 9 und örtlich erhöhter Strömungsgeschwindigkeit.

Härtestabilisierung:

Die vorher beschriebenen Wasseraufbereitungsverfahren garantieren grundsätzlich die Einstellung des richtigen Härtegrades. Unvermeidbaren geringen Aufhärtungen durch Fremdwassereinträge kann durch den Einsatz von Härtestabilisatoren und Kesselsteingegenmittel begegnet werden. In der Praxis haben sich Chemikalien auf Phosphatbasis, Polyphosphate sowie Polyacrylate bewährt, die neben der Eigenschaft, harte Kesselsteinablagerungen zu vermeiden, auch Ablagerungen von Korrosionsprodukten und suspendierten Feststoffen verhindern können.

Sauerstoffeliminierung:

Bei einem weitgehend geschlossenen Fernwärmenetz ohne erhöhten Ergänzungswasserbedarf ist im störungsfreien Betrieb der Sauerstoffeintrag so gering, dass keine Korrosionsschäden zu befürchten sind. Die

Sauerstoffeliminierung ist hier technisch nicht erforderlich. Eine Sauerstoffeliminierung ist hingegen sinnvoll, wenn wegen besonderer Betriebsbedingungen ein erhöhter Sauerstoffeintrag zu erwarten ist. Die Eliminierung kann durch den Einsatz von Teilstromentgasungsanlagen, durch katalytische und elektrochemische Sauerstoffeliminierung und durch Zugabe eines der folgenden Sauerstoffbindemittels erfolgen:

- Hydrazin: Wegen der Einstufung als kanzerogener Stoff nur noch in begründeten Ausnahmefällen zulässig. Bei direktem Anschluss der Warmwassererwärmung verboten.
- Natriumsulfit: Begrenzt auf die salzhaltige Betriebsfahrweise, da es den Salzgehalt stetig erhöht. Zur Verringerung des Korrosionsrisikos sollte ein Sulfatgehalt von 250 mg/l nicht überschritten werden. Nicht geeignet in Verbindung mit kupferhaltigen Werkstoffen.
- Organische Sauerstoffbindemittel wie Ascorbinsäure.

Korrosionsinhibitoren:

Korrosionsinhibitoren und ihre Reaktionsprodukte dürfen bei sachgemässer Anwendung weder den Wärmeübergang reduzieren noch Korrosion auslösen. Zu den üblichen Korrosionsinhibitoren gehören neben Phosphaten und Silikaten auch Chemikaliengemische auf der Basis von Aminen, Borat, Molybdat, Nitrit und Tannin. Alle diese Stoffe bilden als Zersetzungsprodukte anorganische und/oder organische Säuren oder sonstige organische Verbindungen, so dass mit geeigneten Puffersubstanzen (z.B. Phosphate) der pH-Wert stabil gehalten werden muss.

13 Kenngrößen Rohrsysteme

13.1 Übertragungsleistung bei verschiedenen Temperaturspreizungen

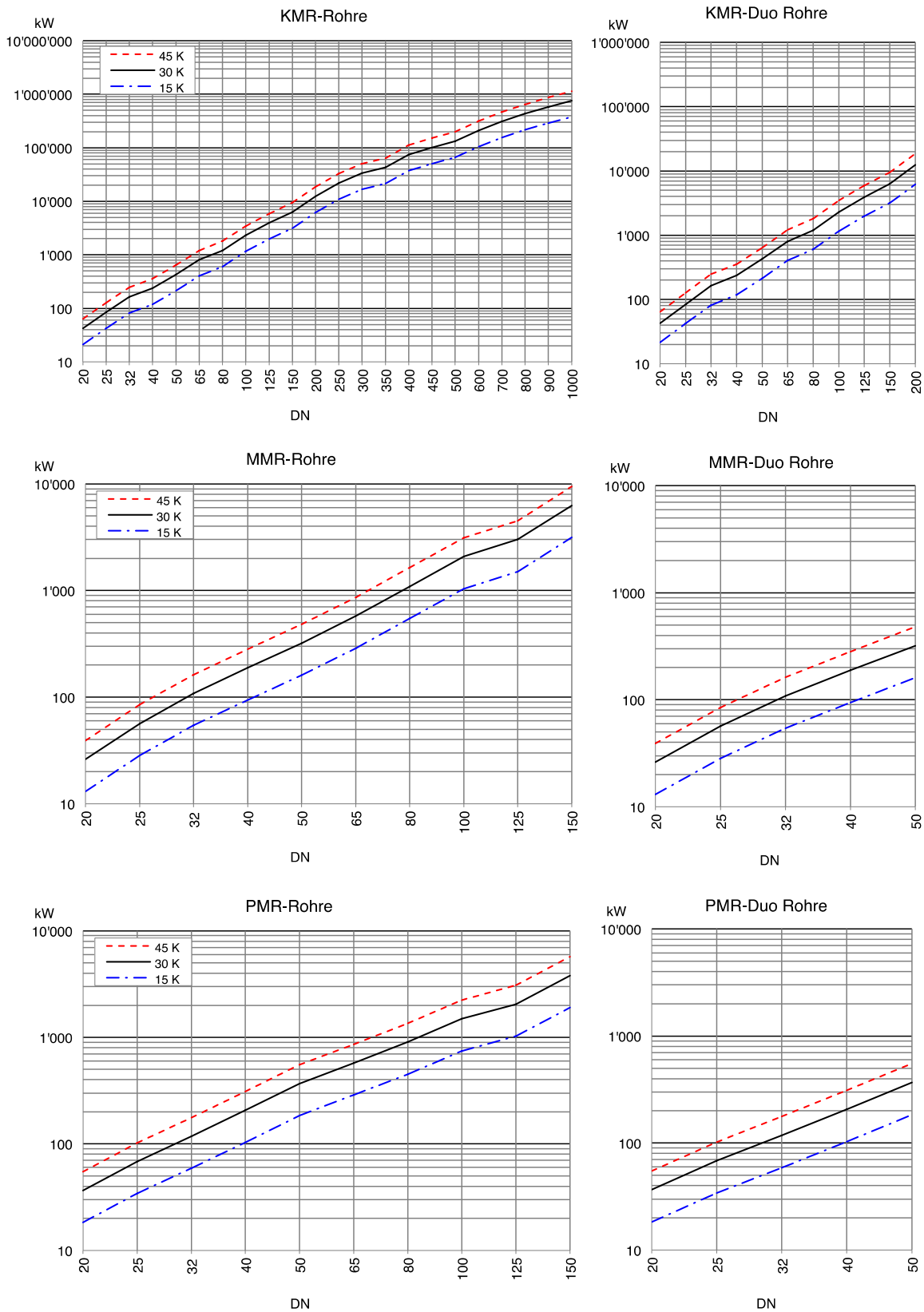


Bild 13.1 Richtwerte für mögliche Übertragungsleistung bei unterschiedlichen Temperaturspreizungen von 15, 30 und 45 K bei einem spezifischen Druckverlust von 300 Pa/m für die Rohrsysteme KMR, MMR (Wellrohr) und PMR.

13.2 Übertragungsleistung bei unterschiedlichen spezifischen Druckverlusten

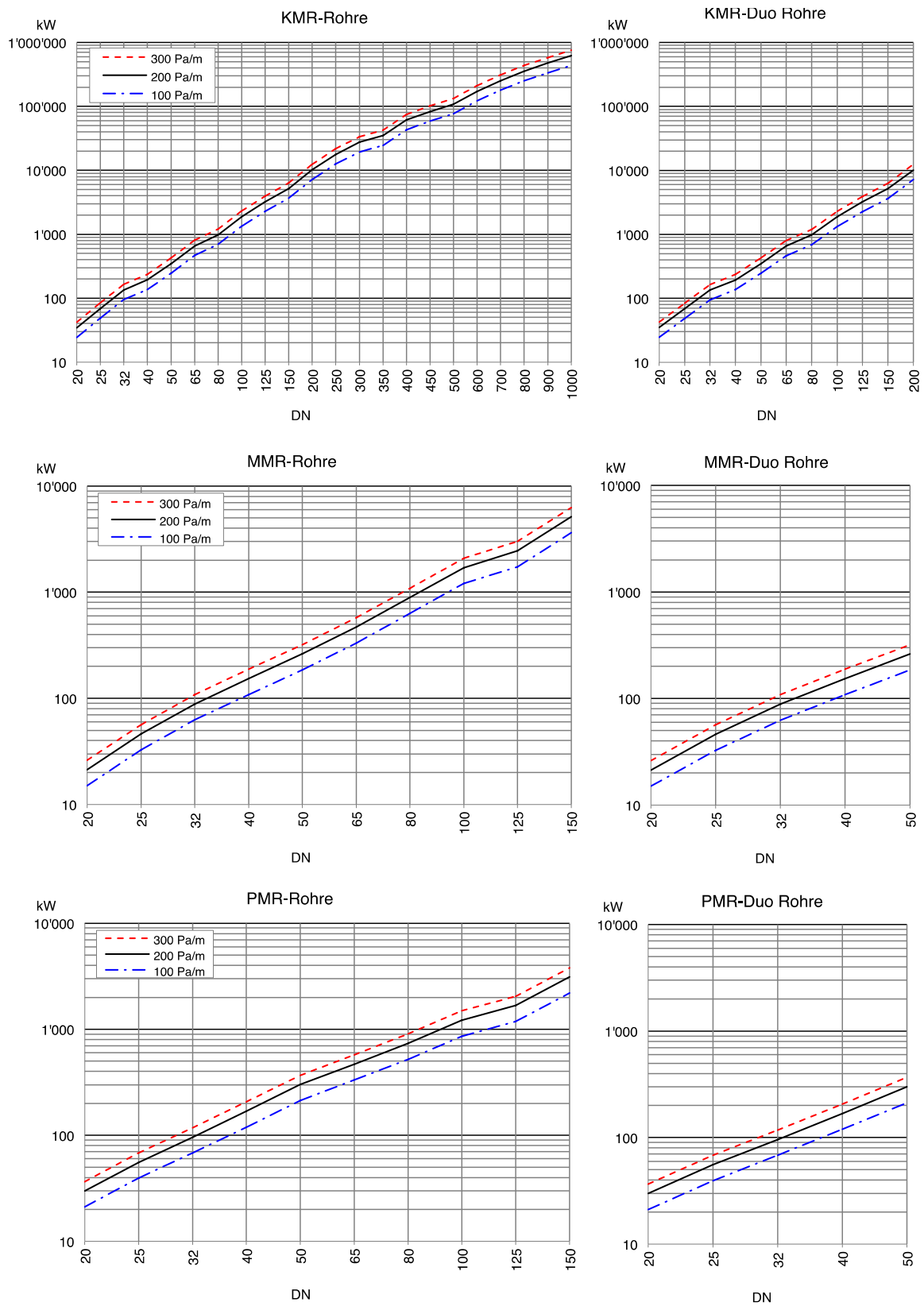


Bild 13.2 Richtwerte für mögliche Übertragungsleistung bei spezifischen Druckverlusten von 100, 200 und 300 Pa/m bei einer Temperaturspreizung von 30 K für die Rohrsysteme KMR, MMR (Wellrohr) und PMR.

13.3 R-Wert-Tafel für nahtlose Stahlrohre

Die folgenden Tabellen wurden aus dem Planungshandbuch QM-Holzheizwerke [21] entnommen und stellen den spezifischen Druckverlust pro Meter Rohrleitung (R-Wert) dar. Für jeden R-Wert wurden für die Nennweiten DN25, DN32, DN40, DN50, DN65, DN80, DN100, DN125, DN150, DN200 und DN250 zusätzlich die folgenden Werte berechnet:

- Massenstrom kg/h
- mittlere Strömungsgeschwindigkeit m/s (in der Tabelle mit Geschwindigkeit bezeichnet)
- dynamischer Druck Pa (in der Tabelle mit Staudruck bezeichnet)

Die Tabellen sind mit folgenden Konstanten berechnet worden:

- Wassertemperatur 70°C
- Dichte 977,7 kg/m³
- Kinematische Viskosität 4,14 E-7 m²/s
- Rohrrauheit 0,01 mm
- Rohrrinnendurchmesser DIN 2448 für nahtlose Stahlrohre

Aus dem spezifischen Druckverlust der Rohrleitung pro Meter Leitungslänge (R-Wert), der folgendermassen berechnet wird,

$$R = \frac{\lambda}{d_i} \frac{\rho_w}{2} w^2$$

kann die mittlere Strömungsgeschwindigkeit w bestimmt werden.

$$w = \sqrt{\frac{d_i}{\lambda} \frac{2}{\rho_w} R}$$

Die Berechnung des Rohrwiderstandsbeiwertes der Rohrströmung (Lambda-Wert) erfolgte dabei iterativ nach der Gleichung von Colebrook für eine turbulente Strömung im Rohr:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{d_i 3.71} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right)$$

Der Massenstrom und der dynamische Druck werden mit folgenden Gleichungen bestimmt:

$$\dot{m} = w \rho_w d_i^2 \frac{\pi}{4}$$

$$p_{\text{dyn}} = w^2 \frac{\rho_w}{2}$$

Nennweite DN [mm]		25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250
Rohr-Innendurchmesser [mm]		28.5	37.2	43.1	54.5	70.3	82.5	107.1	131.7	159.3	206.5	260.4
R [Pa/m]												
10	Massenstrom [kg/h]	303	626	933	1'759	3'490	5'363	10'786	18'731	31'092	61'957	114'561
	Geschwindigkeit [m/s]	0.135	0.164	0.182	0.214	0.255	0.285	0.34	0.391	0.443	0.526	0.611
	Staudruck [Pa]	8.9	13	16	22	32	40	57	75	96	135	183
12	Massenstrom [kg/h]	336	694	1'034	1'948	3'864	5'936	11'930	20'708	34'360	68'436	126'485
	Geschwindigkeit [m/s]	0.15	0.181	0.201	0.237	0.283	0.315	0.376	0.432	0.49	0.581	0.675
	Staudruck [Pa]	11	16	20	28	39	49	69	91	117	165	223
14	Massenstrom [kg/h]	367	757	1'128	2'124	4'211	6'466	12'989	22'539	37'385	74'428	137'511
	Geschwindigkeit [m/s]	0.164	0.198	0.22	0.259	0.308	0.344	0.41	0.47	0.533	0.631	0.734
	Staudruck [Pa]	13	19	24	33	46	58	82	108	139	195	263
16	Massenstrom [kg/h]	396	817	1'216	2'289	4'535	6'962	13'980	24'251	40'214	80'033	147'821
	Geschwindigkeit [m/s]	0.177	0.213	0.237	0.279	0.332	0.37	0.441	0.506	0.573	0.679	0.789
	Staudruck [Pa]	15	22	27	38	54	67	95	125	161	225	304
18	Massenstrom [kg/h]	424	873	1'299	2'445	4'842	7'431	14'916	25'868	42'884	85'319	157'540
	Geschwindigkeit [m/s]	0.189	0.228	0.253	0.298	0.354	0.395	0.47	0.539	0.611	0.724	0.84
	Staudruck [Pa]	17	25	31	43	61	76	108	142	183	256	345
20	Massenstrom [kg/h]	450	926	1'378	2'593	5'133	7'877	15'805	27'403	45'419	90'336	166'764
	Geschwindigkeit [m/s]	0.2	0.242	0.268	0.316	0.376	0.419	0.498	0.572	0.647	0.766	0.89
	Staudruck [Pa]	20	29	35	49	69	86	121	160	205	287	387
22	Massenstrom [kg/h]	475	977	1'454	2'734	5'412	8'302	16'654	28'868	47'839	95'124	175'563
	Geschwindigkeit [m/s]	0.212	0.255	0.283	0.333	0.396	0.441	0.525	0.602	0.682	0.807	0.937
	Staudruck [Pa]	22	32	39	54	77	95	135	177	227	318	429
24	Massenstrom [kg/h]	499	1'026	1'527	2'870	5'679	8'711	17'468	30'273	50'157	99'711	183'992
	Geschwindigkeit [m/s]	0.222	0.268	0.297	0.35	0.416	0.463	0.551	0.631	0.715	0.846	0.982
	Staudruck [Pa]	24	35	43	60	84	105	148	195	250	350	471
26	Massenstrom [kg/h]	522	1'074	1'597	3'001	5'936	9'103	18'251	31'624	52'387	104'121	192'095
	Geschwindigkeit [m/s]	0.233	0.281	0.311	0.365	0.434	0.484	0.576	0.66	0.747	0.883	1.02
	Staudruck [Pa]	26	39	47	65	92	114	162	213	273	381	513
28	Massenstrom [kg/h]	545	1'119	1'664	3'127	6'184	9'482	19'007	32'928	54'538	108'375	199'909
	Geschwindigkeit [m/s]	0.243	0.293	0.324	0.381	0.453	0.504	0.599	0.687	0.777	0.919	1.07
	Staudruck [Pa]	29	42	51	71	100	124	176	231	295	413	556
30	Massenstrom [kg/h]	566	1'163	1'730	3'249	6'424	9'849	19'738	34'188	56'618	112'488	207'462
	Geschwindigkeit [m/s]	0.252	0.304	0.337	0.396	0.47	0.523	0.622	0.713	0.807	0.954	1.11
	Staudruck [Pa]	31	45	55	77	108	134	189	249	318	445	599
35	Massenstrom [kg/h]	618	1'268	1'885	3'539	6'994	10'719	21'472	37'179	61'551	122'237	225'363
	Geschwindigkeit [m/s]	0.275	0.332	0.367	0.431	0.512	0.57	0.677	0.775	0.877	1.04	1.2
	Staudruck [Pa]	37	54	66	91	128	159	224	294	376	526	707
40	Massenstrom [kg/h]	666	1'367	2'031	3'811	7'527	11'534	23'094	39'975	66'162	131'346	242'084
	Geschwindigkeit [m/s]	0.297	0.357	0.395	0.464	0.551	0.613	0.728	0.834	0.943	1.11	1.29
	Staudruck [Pa]	43	62	76	105	148	184	259	340	435	607	815
45	Massenstrom [kg/h]	712	1'459	2'168	4'067	8'030	12'302	24'624	42'611	70'508	139'931	257'837
	Geschwindigkeit [m/s]	0.317	0.382	0.422	0.495	0.588	0.654	0.777	0.889	1.01	1.19	1.38
	Staudruck [Pa]	49	71	87	120	169	209	295	386	494	689	925
50	Massenstrom [kg/h]	755	1'548	2'299	4'311	8'509	13'032	26'076	45'113	74'632	148'074	272'775
	Geschwindigkeit [m/s]	0.336	0.405	0.448	0.525	0.623	0.693	0.822	0.941	1.06	1.26	1.46
	Staudruck [Pa]	55	80	98	135	190	235	331	433	553	771	1'035
55	Massenstrom [kg/h]	796	1'632	2'423	4'543	8'965	13'728	27'461	47'499	78'565	155'838	287'015
	Geschwindigkeit [m/s]	0.355	0.427	0.472	0.553	0.656	0.73	0.866	0.991	1.12	1.32	1.53
	Staudruck [Pa]	61	89	109	150	210	260	367	480	613	854	1'146
60	Massenstrom [kg/h]	836	1'713	2'543	4'766	9'402	14'396	28'789	49'786	82'332	163'272	300'649
	Geschwindigkeit [m/s]	0.372	0.448	0.495	0.581	0.688	0.765	0.908	1.04	1.17	1.39	1.6
	Staudruck [Pa]	68	98	120	165	232	286	403	527	673	938	1'258

Bild 13.3 R-Wert-Tabelle nach [21] für R-Werte von 10-60 Pa/m

Nennweite DN [mm]		25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250
Rohr-Innendurchmesser [mm]		28.5	37.2	43.1	54.5	70.3	82.5	107.1	131.7	159.3	206.5	260.4
R [Pa/m]												
65	Massenstrom [kg/h]	874	1'791	2'658	4'981	9'823	15'038	30'065	51'983	85'953	170'417	313'748
	Geschwindigkeit [m/s]	0.389	0.468	0.518	0.607	0.719	0.799	0.948	1.08	1.23	1.45	1.67
	Staudruck [Pa]	74	107	131	180	253	312	439	575	734	1'022	1'370
70	Massenstrom [kg/h]	911	1'866	2'769	5'188	10'229	15'657	31'296	54'103	89'443	177'303	326'373
	Geschwindigkeit [m/s]	0.406	0.488	0.539	0.632	0.749	0.832	0.987	1.13	1.28	1.5	1.74
	Staudruck [Pa]	81	116	142	195	274	339	476	622	795	1'106	1'482
75	Massenstrom [kg/h]	947	1'939	2'877	5'388	10'622	16'256	32'486	56'152	92'818	183'959	338'572
	Geschwindigkeit [m/s]	0.422	0.507	0.56	0.656	0.777	0.864	1.02	1.17	1.32	1.56	1.81
	Staudruck [Pa]	87	126	153	211	295	365	513	670	856	1'191	1'595
80	Massenstrom [kg/h]	982	2'009	2'981	5'583	11'002	16'836	33'640	58'137	96'087	190'405	350'386
	Geschwindigkeit [m/s]	0.437	0.525	0.581	0.68	0.805	0.895	1.06	1.21	1.37	1.62	1.87
	Staudruck [Pa]	93	135	165	226	317	391	550	719	917	1'275	1'708
85	Massenstrom [kg/h]	1'016	2'078	3'083	5'771	11'372	17'400	34'759	60'064	99'259	196'662	361'850
	Geschwindigkeit [m/s]	0.452	0.543	0.6	0.703	0.832	0.925	1.1	1.25	1.41	1.67	1.93
	Staudruck [Pa]	100	144	176	242	339	418	587	767	979	1'361	1'822
90	Massenstrom [kg/h]	1'049	2'145	3'181	5'955	11'731	17'948	35'849	61'938	102'345	202'744	372'994
	Geschwindigkeit [m/s]	0.467	0.561	0.62	0.725	0.859	0.954	1.13	1.29	1.46	1.72	1.99
	Staudruck [Pa]	107	154	188	257	360	445	625	816	1'041	1'446	1'936
95	Massenstrom [kg/h]	1'081	2'210	3'277	6'134	12'082	18'482	36'909	63'763	105'349	208'666	383'843
	Geschwindigkeit [m/s]	0.481	0.578	0.638	0.747	0.884	0.982	1.16	1.33	1.5	1.77	2.05
	Staudruck [Pa]	113	163	199	273	382	472	662	865	1'102	1'532	2'050
100	Massenstrom [kg/h]	1'112	2'273	3'371	6'308	12'424	19'003	37'944	65'542	108'279	214'441	394'420
	Geschwindigkeit [m/s]	0.495	0.594	0.656	0.768	0.909	1.01	1.2	1.37	1.54	1.82	2.1
	Staudruck [Pa]	120	173	211	289	404	499	700	913	1'165	1'618	2'164
110	Massenstrom [kg/h]	1'172	2'396	3'552	6'646	13'084	20'009	39'942	68'979	113'935	225'587	414'836
	Geschwindigkeit [m/s]	0.522	0.626	0.692	0.809	0.958	1.06	1.26	1.44	1.62	1.91	2.21
	Staudruck [Pa]	133	192	234	320	448	553	776	1'012	1'290	1'790	2'394
120	Massenstrom [kg/h]	1'230	2'514	3'726	6'969	13'716	20'974	41'856	72'270	119'350	236'257	434'373
	Geschwindigkeit [m/s]	0.548	0.657	0.726	0.849	1	1.11	1.32	1.51	1.7	2	2.32
	Staudruck [Pa]	147	211	257	352	493	607	852	1'111	1'415	1'964	2'625
130	Massenstrom [kg/h]	1'286	2'627	3'893	7'280	14'325	21'900	43'695	75'433	124'553	246'505	453'137
	Geschwindigkeit [m/s]	0.573	0.687	0.758	0.887	1.05	1.16	1.38	1.57	1.78	2.09	2.42
	Staudruck [Pa]	160	230	281	384	537	662	928	1'210	1'541	2'138	2'857
140	Massenstrom [kg/h]	1'340	2'736	4'055	7'580	14'911	22'794	45'468	78'481	129'567	256'381	471'214
	Geschwindigkeit [m/s]	0.597	0.715	0.79	0.923	1.09	1.21	1.43	1.64	1.85	2.17	2.51
	Staudruck [Pa]	174	250	305	417	582	717	1'005	1'310	1'668	2'312	3'089
150	Massenstrom [kg/h]	1'392	2'842	4'211	7'870	15'478	23'658	47'182	81'426	134'412	265'921	488'675
	Geschwindigkeit [m/s]	0.62	0.743	0.82	0.958	1.13	1.26	1.49	1.7	1.92	2.26	2.61
	Staudruck [Pa]	188	270	329	449	627	773	1'082	1'410	1'795	2'488	3'322
160	Massenstrom [kg/h]	1'443	2'944	4'362	8'151	16'028	24'495	48'842	84'279	139'104	275'158	505'581
	Geschwindigkeit [m/s]	0.642	0.77	0.849	0.993	1.17	1.3	1.54	1.76	1.98	2.33	2.7
	Staudruck [Pa]	202	290	353	482	673	829	1'160	1'510	1'922	2'664	3'556
170	Massenstrom [kg/h]	1'492	3'044	4'509	8'423	16'561	25'307	50'453	87'048	143'657	284'120	521'980
	Geschwindigkeit [m/s]	0.664	0.796	0.878	1.03	1.21	1.35	1.59	1.82	2.05	2.41	2.78
	Staudruck [Pa]	216	309	377	514	718	884	1'238	1'611	2'050	2'840	3'791
180	Massenstrom [kg/h]	1'539	3'140	4'652	8'689	17'080	26'097	52'019	89'739	148'082	292'830	537'917
	Geschwindigkeit [m/s]	0.686	0.821	0.906	1.06	1.25	1.39	1.64	1.87	2.11	2.48	2.87
	Staudruck [Pa]	230	329	401	547	764	940	1'316	1'712	2'178	3'017	4'026
190	Massenstrom [kg/h]	1'586	3'235	4'791	8'947	17'586	26'866	53'545	92'359	152'390	301'309	553'429
	Geschwindigkeit [m/s]	0.706	0.846	0.933	1.09	1.29	1.43	1.69	1.93	2.17	2.56	2.95
	Staudruck [Pa]	244	350	425	580	810	997	1'394	1'814	2'307	3'194	4'261

Bild 13.4 R-Wert-Tabelle nach [21] für R-Werte von 65-190 Pa/m

Nennweite DN [mm]		25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250
Rohr-Innendurchmesser [mm]		28.5	37.2	43.1	54.5	70.3	82.5	107.1	131.7	159.3	206.5	260.4
R [Pa/m]												
200	Massenstrom [kg/h]	1'631	3'327	4'927	9'200	18'078	27'617	55'032	94'914	156'590	309'574	568'549
	Geschwindigkeit [m/s]	0.727	0.87	0.959	1.12	1.32	1.47	1.74	1.98	2.23	2.63	3.03
	Staudruck [Pa]	258	370	450	614	856	1'053	1'472	1'916	2'436	3'372	4'497
220	Massenstrom [kg/h]	1'719	3'504	5'189	9'687	19'030	29'066	57'903	99'846	164'696	325'524	597'722
	Geschwindigkeit [m/s]	0.766	0.916	1.01	1.18	1.39	1.54	1.83	2.08	2.35	2.76	3.19
	Staudruck [Pa]	287	410	499	680	949	1'167	1'630	2'120	2'695	3'728	4'971
240	Massenstrom [kg/h]	1'803	3'675	5'440	10'153	19'941	30'453	60'651	104'565	172'453	340'783	625'628
	Geschwindigkeit [m/s]	0.803	0.961	1.06	1.24	1.46	1.62	1.91	2.18	2.46	2.89	3.34
	Staudruck [Pa]	315	451	549	748	1'042	1'281	1'789	2'325	2'954	4'086	5'446
260	Massenstrom [kg/h]	1'884	3'839	5'682	10'602	20'817	31'786	63'292	109'099	179'903	355'435	652'420
	Geschwindigkeit [m/s]	0.839	1	1.11	1.29	1.52	1.69	2	2.28	2.56	3.02	3.48
	Staudruck [Pa]	344	492	599	815	1'135	1'395	1'948	2'531	3'215	4'444	5'922
280	Massenstrom [kg/h]	1'962	3'997	5'915	11'034	21'662	33'070	65'836	113'467	187'080	369'548	678'223
	Geschwindigkeit [m/s]	0.874	1.04	1.15	1.34	1.59	1.76	2.08	2.37	2.67	3.13	3.62
	Staudruck [Pa]	373	534	649	883	1'229	1'510	2'107	2'738	3'477	4'804	6'400
300	Massenstrom [kg/h]	2'038	4'149	6'140	11'452	22'477	34'311	68'294	117'686	194'012	383'177	703'139
	Geschwindigkeit [m/s]	0.908	1.08	1.2	1.39	1.65	1.82	2.15	2.45	2.77	3.25	3.75
	Staudruck [Pa]	403	575	699	951	1'323	1'626	2'268	2'945	3'739	5'165	6'879
350	Massenstrom [kg/h]	2'217	4'512	6'674	12'443	24'410	37'251	74'114	127'673	210'417	415'427	762'085
	Geschwindigkeit [m/s]	0.987	1.18	1.3	1.52	1.79	1.98	2.34	2.66	3	3.52	4.07
	Staudruck [Pa]	477	680	826	1'123	1'561	1'916	2'671	3'466	4'398	6'071	8'080
400	Massenstrom [kg/h]	2'385	4'850	7'173	13'367	26'214	39'995	79'543	136'989	225'716	445'494	817'029
	Geschwindigkeit [m/s]	1.06	1.27	1.4	1.63	1.92	2.13	2.51	2.86	3.22	3.78	4.36
	Staudruck [Pa]	551	786	954	1'296	1'800	2'209	3'076	3'990	5'061	6'982	9'287
450	Massenstrom [kg/h]	2'542	5'169	7'643	14'238	27'912	42'577	84'653	145'754	240'107	473'771	868'692
	Geschwindigkeit [m/s]	1.13	1.35	1.49	1.73	2.04	2.26	2.67	3.04	3.42	4.02	4.63
	Staudruck [Pa]	627	893	1'083	1'470	2'041	2'503	3'484	4'517	5'727	7'897	10'499
500	Massenstrom [kg/h]	2'692	5'471	8'089	15'064	29'522	45'025	89'493	154'056	253'737	500'545	917'603
	Geschwindigkeit [m/s]	1.2	1.43	1.58	1.83	2.16	2.39	2.82	3.21	3.62	4.25	4.9
	Staudruck [Pa]	703	1'000	1'213	1'645	2'283	2'799	3'894	5'047	6'396	8'814	11'715
550	Massenstrom [kg/h]	2'835	5'760	8'514	15'851	31'056	47'356	94'104	161'962	266'715	526'035	964'162
	Geschwindigkeit [m/s]	1.26	1.51	1.66	1.93	2.27	2.52	2.97	3.38	3.8	4.46	5.14
	Staudruck [Pa]	779	1'108	1'344	1'822	2'526	3'097	4'306	5'578	7'067	9'735	12'933
600	Massenstrom [kg/h]	2'972	6'036	8'920	16'604	32'524	49'587	98'514	169'524	279'127	550'410	1'008'679
	Geschwindigkeit [m/s]	1.32	1.58	1.74	2.02	2.38	2.64	3.11	3.54	3.98	4.67	5.38
	Staudruck [Pa]	856	1'217	1'475	1'999	2'771	3'396	4'719	6'111	7'740	10'658	14'155
650	Massenstrom [kg/h]	3'103	6'301	9'311	17'328	33'934	51'730	102'749	176'784	291'042	573'806	1'051'402
	Geschwindigkeit [m/s]	1.38	1.65	1.81	2.11	2.48	2.75	3.24	3.69	4.15	4.87	5.61
	Staudruck [Pa]	934	1'326	1'607	2'177	3'016	3'695	5'133	6'645	8'414	11'583	15'380
700	Massenstrom [kg/h]	3'230	6'557	9'688	18'025	35'292	53'793	106'828	183'776	302'515	596'332	1'092'534
	Geschwindigkeit [m/s]	1.44	1.71	1.89	2.2	2.58	2.86	3.37	3.83	4.31	5.06	5.83
	Staudruck [Pa]	1'012	1'436	1'740	2'356	3'262	3'996	5'549	7'181	9'091	12'511	16'607
750	Massenstrom [kg/h]	3'353	6'804	10'052	18'699	36'603	55'787	110'767	190'527	313'592	618'078	1'132'239
	Geschwindigkeit [m/s]	1.49	1.78	1.96	2.28	2.68	2.96	3.49	3.97	4.47	5.24	6.04
	Staudruck [Pa]	1'090	1'547	1'873	2'535	3'509	4'298	5'965	7'719	9'769	13'440	17'836
800	Massenstrom [kg/h]	3'471	7'044	10'404	19'351	37'874	57'716	114'579	197'061	324'312	639'122	1'170'658
	Geschwindigkeit [m/s]	1.55	1.84	2.03	2.36	2.77	3.07	3.61	4.11	4.62	5.42	6.25
	Staudruck [Pa]	1'168	1'657	2'007	2'715	3'757	4'600	6'383	8'257	10'448	14'370	19'067
850	Massenstrom [kg/h]	3'587	7'276	10'746	19'984	39'106	59'588	118'277	203'398	334'708	659'527	1'207'908
	Geschwindigkeit [m/s]	1.6	1.9	2.09	2.43	2.86	3.17	3.73	4.24	4.77	5.59	6.44
	Staudruck [Pa]	1'247	1'768	2'141	2'896	4'005	4'903	6'802	8'797	11'129	15'303	20'299

Bild 13.5 R-Wert-Tabelle nach [21] für R-Werte von 200-850 Pa/m

13.4 Abmessungen und spez. Wärmeverluste für KMR-, MMR- und PMR-Rohre

Tabelle 13.1 Kunststoffverbundmantelrohr **KMR**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN1000. Für die Erstellung der Tabelle wurden Daten von folgenden Herstellern berücksichtigt: Brugg pipesystems, Isoplus und Logstor

Nennweite	Medium-Innenrohr				Aussendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke)			Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter		
	Aussendurchmesser	Wandstärke	Innendurchmesser	Volumen Innenrohr	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	26.9	2.65	21.60	0.37	90	110	125	0.284	0.248	0.229
25	33.7	2.60	28.50	0.64	90	110	125	0.342	0.291	0.266
32	42.4	2.60	37.20	1.09	110	125	140	0.354	0.317	0.290
40	48.3	2.60	43.10	1.46	110	125	140	0.403	0.356	0.322
50	60.3	2.90	54.50	2.33	125	140	160	0.450	0.398	0.350
65	76.1	2.90	70.30	3.88	140	160	180	0.527	0.446	0.393
80	88.9	3.20	82.50	5.35	160	180	200	0.547	0.469	0.416
100	114.3	3.60	107.10	9.01	200	225	250	0.576	0.490	0.432
125	139.7	3.60	132.50	13.79	225	250	280	0.663	0.562	0.482
150	168.3	4.00	160.30	20.18	250	280	315	0.777	0.633	0.531
200	219.1	4.50	210.10	34.67	315	355	400	0.844	0.670	0.555
250	273.0	5.00	263.00	54.33	400	450	500	0.820	0.656	0.556
300	323.9	5.60	312.70	76.80	450	500	580	0.933	0.744	0.578
350	355.6	5.60	344.40	93.16	500	560	630	0.912	0.719	0.589
400	406.4	6.30	393.80	121.80	560	630	730	0.964	0.744	0.579
450	457.2	6.30	444.60	155.25	630	670	800	0.970	0.839	0.605
500	508.0	6.30	495.40	192.75	710	800	900	0.941	0.728	0.595
600	610.0	7.10	595.80	278.80	800	900	1000	1.125	0.836	0.679
700	711.0	8.00	695.00	379.37	900	1000	1100	1.266	0.938	0.761
800	813.0	8.80	795.40	496.89	1000	1100	1200	1.409	1.042	0.842
900	914.0	10.00	894.00	627.72	1100	1200	–	1.542	1.141	–
1000	1016.0	11.00	994.00	776.00	1200	1300	–	1.678	1.241	–

Tabelle 13.2 Kunststoffverbundmantelrohr **KMR-Duo**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN200. Für die Erstellung der Tabelle wurden Daten von folgenden Herstellern berücksichtigt: Brugg pipesystems, Isoplus und Logstor

Nennweite	Medium-Innenrohr				Aussendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke)			Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter		
	Aussendurchmesser	Wandstärke	Innendurchmesser	Volumen Innenrohr	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	26.9	2.60	21.70	0.37	125	140	–	0.204	0.184	–
25	33.7	2.60	28.50	0.64	140	160	–	0.223	0.195	–
32	42.4	2.60	37.20	1.09	160	180	–	0.242	0.213	–
40	48.3	2.60	43.10	1.46	160	180	–	0.286	0.243	–
50	60.3	2.90	54.50	2.33	200	225	–	0.280	0.241	–
65	76.1	2.90	70.30	3.88	225	250	–	0.329	0.278	–
80	88.9	3.20	82.50	5.35	250	280	–	0.371	0.297	–
100	114.3	3.60	107.10	9.01	315	355	–	0.375	0.300	–
125	139.7	3.60	132.50	13.79	400	450	–	0.363	0.293	–
150	168.3	4.00	160.30	20.18	450	500	–	0.419	0.330	–
200	219.1	4.50	210.10	34.67	560	630	–	0.475	0.349	–

Tabelle 13.3 Metallmediumrohr **MMR**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN150. Für die Erstellung der Tabelle wurden Daten von Brugg pipesystems berücksichtigt.

Nennweite	Medium-Innenrohr				Aussendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke)			Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter		
	Aussendurchmesser	Wandstärke	Innendurchmesser	Volumen Innenrohr	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	25.5	0.3	22.00	0.38	91	–	–	0.245	–	–
25	34.0	0.3	30.00	0.71	91	111	–	0.307	0.265	–
32	43.8	0.4	38.90	1.19	111	126	–	0.325	0.294	–
40	54.5	0.5	48.50	1.85	111	126	–	0.401	0.354	–
50	66.5	0.5	60.00	2.83	126	142	–	0.443	0.390	–
65	85.6	0.60	75.80	4.51	178	–	–	0.396	–	–
80	109.2	0.80	98.00	7.54	178	233	–	0.542	0.394	–
100	142.9	0.90	127.00	12.67	233	–	–	0.540	–	–
125	162.7	1.00	147.00	16.97	233	–	–	0.683	–	–
150	218.0	1.20	197.50	30.64	313	–	–	0.693	–	–

Tabelle 13.4 Metallmediumrohr **MMR-Duo**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN50. Für die Erstellung der Tabelle wurden Daten von Brugg pipesystems berücksichtigt.

Nennweite	Medium-Innenrohr				Aussendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke)			Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter		
	Aussendurchmesser	Wandstärke	Innendurchmesser	Volumen Innenrohr	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	25.5	0.3	22.00	0.38	111	–	–	0.156	–	–
25	34.0	0.3	30.00	0.71	126	–	–	0.181	–	–
32	43.8	0.4	38.90	1.19	142	–	–	0.224	–	–
40	54.5	0.5	48.50	1.85	162	–	–	0.251	–	–
50	66.5	0.5	60.00	2.83	182	225	–	0.293	0.215	–

Tabelle 13.5 Kunststoffmediumrohr **PMR**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN150. Für die Erstellung der Tabelle wurden Daten von folgenden Herstellern berücksichtigt: Brugg pipesystems und Isoplus.

Nennweite	Medium-Innenrohr				Aussendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke)			Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter		
	Aussendurchmesser	Wandstärke	Innendurchmesser	Volumen Innenrohr	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	25.0	2.30	20.40	0.33	75	90	–	0.264	0.235	–
25	32.0	2.90	26.20	0.54	75	90	–	0.321	0.279	–
32	40.0	3.70	32.60	0.83	90	110	–	0.332	0.284	–
40	50.0	4.60	40.80	1.31	110	125	–	0.341	0.307	–
50	63.0	5.80	51.40	2.07	125	140	–	0.378	0.340	–
65	75.0	6.80	61.40	2.96	140	160	–	0.405	0.356	–
80	90.0	8.20	73.60	4.25	160	180	–	0.429	0.380	–
100	110.0	10.00	90.00	6.36	160	180	–	0.557	0.476	–
125	125.0	11.40	102.20	8.20	180	–	–	0.567	–	–
150	160.0	14.60	130.80	13.44	250	–	–	0.511	–	–

Tabelle 13.6 Kunststoffmediumrohr **PMR-Duo**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN50. Für die Erstellung der Tabelle wurden Daten von folgenden Herstellern berücksichtigt: Brugg pipesystems und Isoplus.

Nennweite	Medium-Innenrohr				Aussendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke)			Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter		
	Aussendurchmesser	Wandstärke	Innendurchmesser	Volumen Innenrohr	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	25.0	2.30	20.40	0.33	90	110	–	0.211	0.174	–
25	32.0	2.90	26.20	0.54	110	125	–	0.215	0.198	–
32	40.0	3.70	32.60	0.83	125	140	–	0.235	0.222	–
40	50.0	4.60	40.80	1.31	160	180	–	0.264	0.210	–
50	63.0	5.80	51.40	2.07	180	–	–	0.246	–	–

13.5 Spezifische Wärmeverluste pro Trassenmeter Rohrleitung

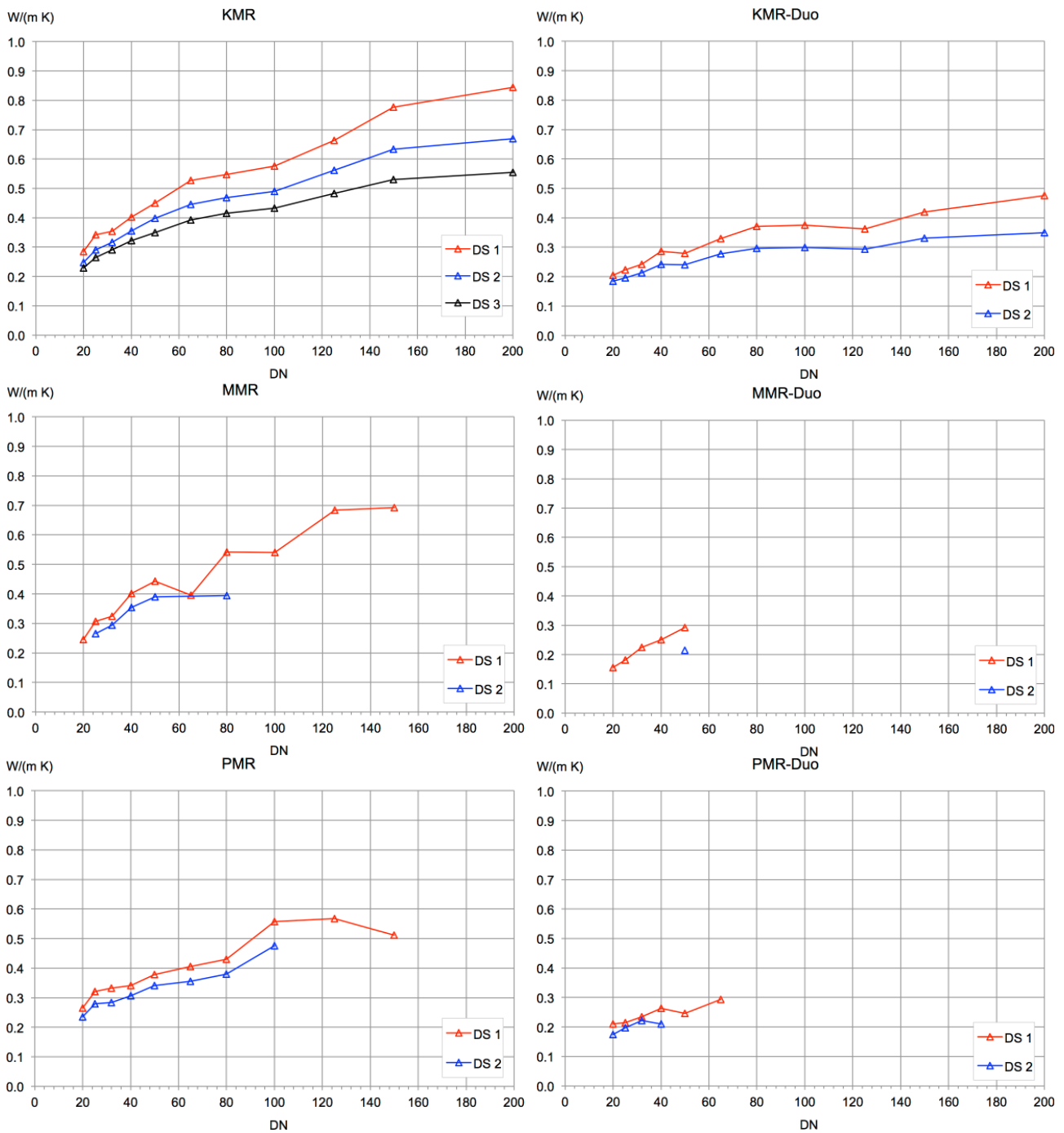


Bild 13.6 Spezifische Wärmeverluste pro Trassenmeter Rohrleitung bis DN200 für KMR-, MMR- und PMR-Rohre. Auf der rechten Seite sind jeweils die gängigen Doppelrohr-Ausführungen aufgeführt. Die Einzelrohre wurden gemäss Kapitel 7.1.3 berechnet. Die Angaben zu den Doppelrohr-Ausführungen wurden den Produktinformationen folgender Firmen entnommen: Brugg Pipesystems, Isoplus und Logstor.

Die Berechnungen für die Einzelrohre basieren auf folgenden Annahmen:

- Wärmeleitfähigkeit Boden $\lambda_{Bo} = 1.2 W/(m K)$
- Wärmeleitfähigkeit Dämmmaterial $\lambda_D = 0.03 W/(m K)$
- mittlere Überdeckungshöhe $h_U = 0.6 m$
- lichter Rohrabstand $a = 0.2 m$.

13.6 Richtpreise Fernwärmeleitungen

Bild 13.7 zeigt Richtpreise der Kosten für KMR-Rohre inklusive Verlegung und Tiefbau gemäss Zusammenstellung in Tabelle 13.7 und Tabelle 13.8. Der Tiefbau ist zusätzlich unterteilt in Grabenkosten in Flur (offenes Gelände ohne befestigte Oberfläche) und Verlegung in Strasse (befestigte Oberfläche z.B. Strasse, Gehsteig), die nach Beendigung der Arbeit wiederhergestellt werden muss.

Die zusätzlich in Bild 13.7 dargestellten Datenpunkte stellen realisierte Fernwärmenetze in der Schweiz dar und stammen aus einer Ist-Analyse von Fernwärmenetzen aus dem Jahr 2012 (publiziert in [16] im Jahr 2014). Die Datenpunkte stellen die Investitionskosten für das Fernwärme-Verteilnetz pro Trassenmeter in Funktion des durchschnittlichen Rohrinne Durchmesser der eingesetzten Fernwärmerohre dar. Der durchschnittliche Rohrinne Durchmesser wurde anhand einer Funktion berechnet, welche auf der Basis von 134 Fernwärmenetzen in Schweden aufgestellt wurde [3]. Die Datenpunkte in Bild 13.7 stammen von Fernwärmenetzen, die fast ausschliesslich mit KMR-Rohren ausgeführt und zwischen 1984 bis 2011 in Betrieb gegangen sind.

Da sich Preise für Material und Arbeit stetig ändern und der Planungsprozess zwischen Vorstudie und Umsetzung von Fernwärmenetzen mehrere Jahre dauern kann, sind während der Realisierung allfällige Anpassungen der Kosten zu beachten. Insbesondere für Tiefbauarbeiten sind zudem saisonale Unterschiede möglich. Im Vergleich zu günstigen Bedingungen können zudem durch spezifische Situationen erhöhte Kosten auftreten, insbesondere durch hohe Komplexität der Leitungsführung (z.B. Kopfsteinpflaster, Querung von Flüssen, Autobahnen, Bahngleisen).

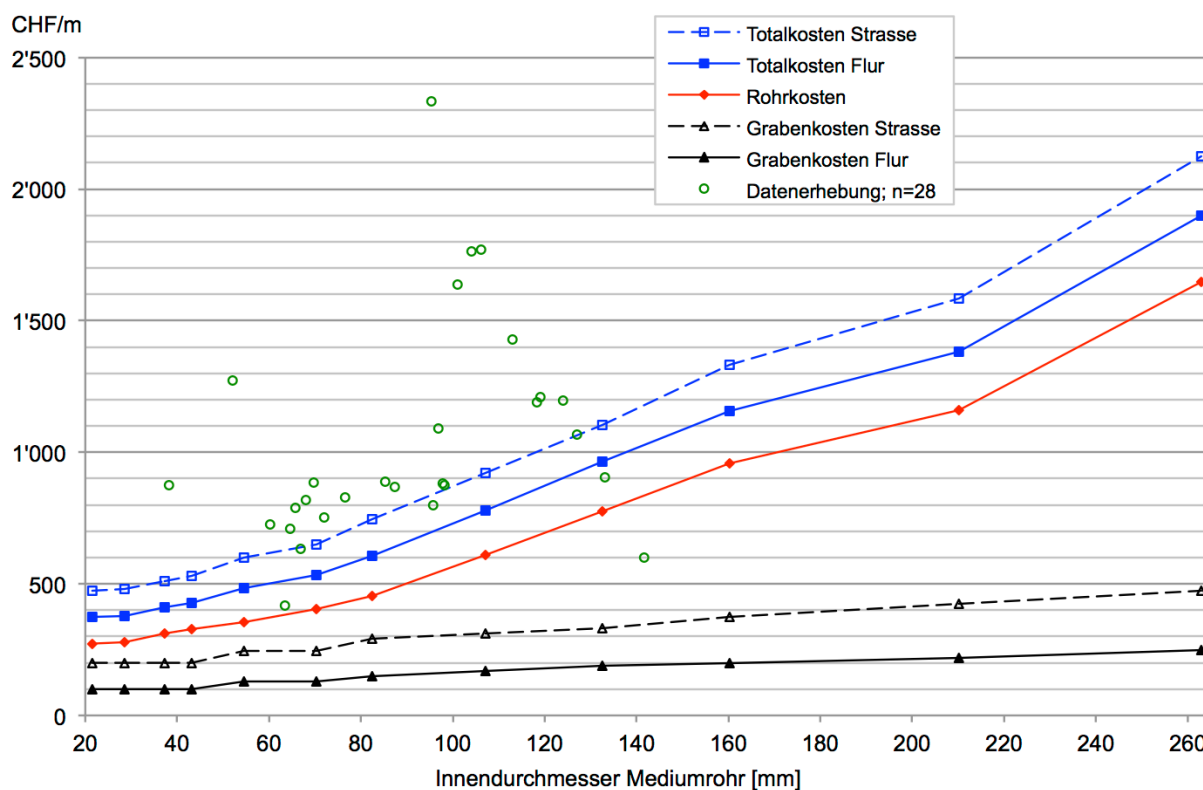


Bild 13.7 Richtpreise für KMR-Rohre (2009) von DN20 - DN250 unterteilt in Rohr- und Grabenkosten für die Verlegung in Flur und Strasse. Zusätzlich sind Daten von existierenden Fernwärmenetzen aus einer Datenerhebung von 2012 [16] aufgeführt.

Tabelle 13.7 Zusammenstellung der inbegriffenen Leistungen für die in der Tabelle 13.8 dargestellten Richtpreise für Fernwärmeleitungen.

Material und Verlegung	Grabarbeiten	Bemerkungen
<ul style="list-style-type: none"> - Vor- und Rücklauf je 1 m - 1/10 Bogenpreisannteil - 5 % T-Stückanteil - 1/6 Muffenpreisannteil - 10 % für Mauerdichtringe, Dehnungszonen, Rohrunterlagen und Schweissmaterial - 1/100 Preisanteil für Überwachungsanlage, vertragen und verschweissen der Rohre - Druckprobe 	<ul style="list-style-type: none"> - Aushub gemäss Unterlagen - 30 % wegführen des Aushubmaterials - Erstellen des Sandbettes - Einsanden der Rohre - Verfüllen des Grabens - Wiederherstellen der Erdoberfläche - Strassenbeläge 	DN20 – DN150 Dämmstärke 3 DN200 – DN250 Dämmstärke 2 Nicht im Preis inbegriffen sind: <ul style="list-style-type: none"> - Röntgen der Schweissnähte - Umlegen von Werksleitungen - Spriessen des Grabens - Verkehrsregelungen

Tabelle 13.8 Richtpreise für Fernwärmeleitungen (2009). Kursiv dargestellte Werte bei KMR ab DN 300 sind extrapolierte Werte. Die Preise sollten bei Bedarf beim Hersteller konkret nachgefragt werden, da der Einsatz von Rohrdimensionen ab DN 300, insbesondere in der Schweiz, eher Selten zum Einsatz kommen.

Nennweite DN	KMR		KMR-Duo		MMR		MMR-Duo		PMR		PMR-Duo	
	Flur	Strasse	Flur	Strasse	Flur	Strasse	Flur	Strasse	Flur	Strasse	Flur	Strasse
	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m
20	373	473	295	374	350	450	252	352	246	346	193	278
25	379	479	299	378	363	463	275	375	258	358	222	322
32	411	511	325	404	453	553	309	409	306	406	245	350
40	429	529	339	418	465	585	348	448	323	423	315	415
50	484	599	382	473	524	634	385	485	458	548	352	452
65	535	650	423	514	726	821	–	–	508	618	–	–
80	605	745	478	589	809	904	–	–	613	708	–	–
100	780	920	616	727	917	1052	–	–	667	762	–	–
125	965	1105	762	873	1027	1162	–	–	721	816	–	–
150	1157	1332	914	1052	1106	1241	–	–	775	870	–	–
200	1381	1586	1091	1253	–	–	–	–	–	–	–	–
250	1899	2124	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
300	<i>2417</i>	<i>2662</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
350	<i>2935</i>	<i>3200</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
400	<i>3453</i>	<i>3738</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
450	<i>3971</i>	<i>4276</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
500	<i>4489</i>	<i>4814</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
600	<i>5007</i>	<i>5352</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
700	<i>5525</i>	<i>5890</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
800	<i>6043</i>	<i>6428</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
900	<i>6561</i>	<i>6966</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1000	<i>7079</i>	<i>7504</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

14 Fragebogen für einen Fernwärmeanschluss

Der Fragebogen ist auf den folgenden zwei Seiten zu finden.

Fragebogen für einen Fernwärmeanschluss

Kontaktdaten Eigentümer Verwaltung Mieter

Name:

Vorname:

Strasse:

Hausnummer:

Adresszusatz:

PLZ, Ort:

Email: Tel.:

Objektdaten Strasse: Hausnummer:

Adresszusatz, PLZ, Ort:

Gebäudetyp: EFH Beschreibung (freistehend, angebaut, Reihnhaus, etc.):

MFH Geschäftshaus Anzahl Stockwerke:

Wohn- und Geschäftshaus Anzahl Wohnungen:

mehr. Gebäude mit einer Übergabestation Anzahl Gebäude:

Industriebetrieb mit Prozesswärme Beschreibung:

..... Beschreibung:

Nutzungsart: Wohnen Anzahl Personen:

Geschäftlich Flächenanteil Wohnen: %

..... Beschreibung der Nutzung:

Baujahr:

Energiebezugsfläche: m² EBF

Wärmeerzeugung Kesseltyp: Jahrgang:

(momentane Situation) Kesselleistung: kW (Gesamt, gemäss Typenschild auf dem Kessel)

mehr als ein Wärmeerzeuger: Ja Nein

Beschreibung:

Bemerkungen:

Energiebedarf Energiebedarf der letzten drei Jahre für Wärme (Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme)

Heizperiode				
Heizöl	l/a			
Gas	m ³ /a			
Holzpellets	t/a			
Holz hackschnitzel	Srm/a			
Stückholz	Ster/a			
Strom	kWh/a			

Genau (z.B. Lieferscheine)

Schätzung

exkl. Warmwasser

inkl. Warmwasser

Anteil WW: %

Bemerkungen:

Energiebedarf für Kälte: Ja Nein

Beschreibung:

Fragebogen für einen Fernwärmeanschluss

Wärmeverteilung / Wärmeabgabe

Anzahl Heizgruppen:

Beschreibung:

- Wärmeabgabesystem
- Fussbodenheizung max. Temperaturen Vorlauf/Rücklauf / °C
 - Heizkörper max. Temperaturen Vorlauf/Rücklauf / °C
 - Heizregister max. Temperaturen Vorlauf/Rücklauf / °C
 - Lüftungsanlagen
 - mit WRG max. Temperaturen Vorlauf/Rücklauf / °C
 - ohne WRG

Bemerkungen

Warmwassererwärmung mit Fernwärme: Ja Nein

Falls Ja, Warmwassererwärmung erfolgt: ganzjährig nur Heizperiode (Sommer z.B. Solar)

Anzahl Bewohner:

- Typ:
- Durchflusssystem
 - Speicher mit internem Wärmeübertrager (z.B. Rohrbündel)
 - Speicher mit Laderegelung (Wärmeübertrager ausserhalb)
 -

Inhalt (Volumen) Speicher: Liter

Zirkulationspumpe vorhanden: Ja Nein

Bemerkungen

Sanierung

Energierelevante Sanierungsabsichten, welche nicht im oben angegebenen Energiebedarf berücksichtigt sind.

	Umsetzung (Jahr):	Einfluss auf Energiebedarf (Reduktion)
<input type="checkbox"/> Fenster %
<input type="checkbox"/> Dämmung Aussenwand %
<input type="checkbox"/> Dämmung Dach %
<input type="checkbox"/> Solaranlage zur Warmwassererwärmung %
<input type="checkbox"/> Solaranlage zur Warmwassererwärmung und Heizungsunterstützung %
<input type="checkbox"/> %
<input type="checkbox"/> %

Bemerkungen:

Anschlusszeitpunkt sofort mittelfristig (bis 5 Jahre) langfristig bis 10 Jahre kein Interesse

Möglicher Anschlusszeitpunkt: (Jahr angeben)













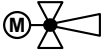





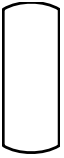
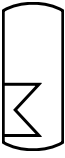
Beilagen

- Lageplan Wärmezentrale (möglicher Standort Übergabestation)
- Lageplan / Skizze für möglichen Hausanschlusseintritt
-
-
-

15 Symbole für Installationen

In der folgenden Tabelle sind die in diesem Planungshandbuch verwendeten Symbole dargestellt. Die Symbole basieren auf der SIA 410 [85].

Tabelle 15.1 Verwendete Symbole nach SIA 410 [85]

Symbol	Beschreibung	Symbol	Beschreibung
	Dreiwegventil mit Motorantrieb		Schmutzfänger
	Durchgangsventil mit Motorantrieb		Druckanzeige
	Drosselarmatur mit Druckmessstutzen		Temperaturanzeige
	Differenzdruckunabhängiges Regelventil (Kombiventil)		Wärmezähler
	Rückschlagventil		Fühler (Temperatur und Druck)
	Absperrarmatur		Pumpe
	Strahlpumpe mit Stellgerät		Heizkreis
	Sicherheitsventil federbelastet		Regler
	Entleerung		Wärmeübertrager (Plattenwärmeübertrager)
	Warmwasserspeicher		Warmwasserspeicher mit internem Wärmeübertrager

16 Formelzeichen und Indizes

Zeichen	Bedeutung	Einheit
A	Fläche, Oberfläche	m ²
AD	Anschlussdichte	MWh/(a m)
\square	Annuitätsfaktor	%/a
\square	Abstand Wellrohr	m
\square	lichter Rohrabstand	m
c _p	spezifische Wärmekapazität	kJ/(kg K); J/(kg K)
d	Durchmesser	m
DN	Nenndurchmesser (Nominal Diameter)	–
DS	Dämmstärke	–
E	Energie	MWh, kWh
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
EBF	Energiebezugsfläche	m ²
f	Faktor	–
f _{el}	Gewichtungsfaktor für Elektrizität	–
g	Fallbeschleunigung	m/s ²
g	Gleichzeitigkeitsfaktor	–
H	Förderhöhe	m; mWS
h	Höhe, Tiefe	m
I	Investitionskosten	CHF
i	Kapitalzinssatz	%/a
K	Jährliche Kosten	CHF/a
k	Rohrrauheit	mm
k	spezifische Kosten	Rp./kWh
k _v	Durchflusskennwert bei Ventilen	m ³ /s · √bar
k _{vS}	Durchflusskennwert bei voll geöffnetem Ventil	m ³ /s · √bar
L	Trassenlänge (Vor- und Rücklauf parallel)	m
L	Hauptrohrlänge	m
L _A	Ausladelänge	m
l	Länge	m
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
M	Moment	Nm; Nmm
\dot{M}	Nachspeisemassenstrom Expansion	kg/s
n	Anzahl; Kalkulationsdauer	–
n	Kalkulationsdauer	a
P	Leistung (i.d.R. elektrisch)	kW

Zeichen	Bedeutung	Einheit
P	Preis	Rp./kWh
P_V	Ventilautorität	–
PS	maximaler Betriebsdruck	bar
p	Druck	bar, Pa, kPa
Δp	Druckunterschied, Druckabfall	bar, Pa, kPa
Δp_{V100}	Druckabfall über dem Ventil bei 100 % Durchfluss	bar, Pa, kPa
Δp_{V0}	Druckabfall über dem Ventil bei 0 % Durchfluss, wenn dieses gerade zu öffnen beginnt	bar, Pa, kPa
Δp_{var100}	Druckabfall über der Strecke mit variablem Durchfluss	bar, Pa, kPa
\square	Jährliche Wärmemenge	MWh/a, kWh/a
\square_h	spezifischer Heizwärmebedarf	MJ/(m ² a), kWh/(m ² a)
\square_{WW}	spezifischer Wärmebedarf für Warmwasser	MJ/(m ² a), kWh/(m ² a)
\dot{Q}	thermische Leistung	MW, kW
\dot{q}	spezifische thermische Leistung	W/m
$\dot{q}_{V,L}$	spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung	W/(m K)
r	Radius	m
Re	Reynolds-Zahl	–
R_e	Streckgrenze	N/mm ²
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²
S	Sicherheitsfaktor	–
S_e	Sicherheitsfaktor auf Streckgrenze	–
S_m	Sicherheitsfaktor auf Zugfestigkeit	–
s	horizontaler Rohrabstand; Wandstärke (Rohr, Zylinder)	m
s	Wandstärke (Rohr, Zylinder)	m
s_e	Bestell-Rohrwandstärke	m
s_v	rechnerische Rohrwandstärke	m
T	Temperatur; Teilstrang	°C
T	Teilstrang	–
t	Zeit	h
ΔT	Temperaturspreizung	K
ΔT^*_{IST}	mittlere (berechnete) Temperaturspreizung im Netz in K, wenn der untersuchte Verbraucher mit Referenz-Temperaturspreizung betrieben wird	K
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)
U	Umfang	m
V	Volumen	m ³ , m ³ /a
ΔV	Volumenänderung (Expansionsvolumen)	m ³ , m ³ /a
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
W	Widerstandsmoment	N/mm ³

Zeichen	Bedeutung	Einheit
w	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K
γ	Volumenänderungskoeffizient	1/K
η	Wirkungsgrad	%
η_{J}	Jahresnutzungsgrad	%
λ	Rohrwiderstandsbeiwert der Rohrströmung	–
λ	Wärmeleitfähigkeit, Wärmeleitwiderstand	W/(m K)
ρ	Dichte	kg/m ³
π	Pi, Kreiszahl	–
τ	Vollbetriebsstunden	h/a
σ	Spannung	N/mm ²
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
ν_{S}	Schweisnaht Wertigkeit	–
ζ	Widerstandsbeiwert Einbauten	–

Indizes	Bedeutung
A	Abkühlung
Aus	Auslegung
a	Jahr
a	Aussen
B	Biegung
B	Betriebsmittel
Be	Betrieb
Br	Brennstoff
Bo	Boden (Erdreich)
D	Dämmmaterial
DH	Druckhaltung
DES	Druckerhöhungsstation
Duo	Doppelrohr, Duo-Rohr
el	elektrisch
ex	exergie
G	Gebäude
g	Gleichzeitigkeit
Geo	Geodätisch
Ges	Gesamt
gew	gewichtet
HA	Hausanschluss

Indizes	Bedeutung
hydr	hydraulisch
i	Innen
i	Nummerierung Teilstränge oder Hausanschlüsse
IST	Ist-Zustand
K	Kapital
K	Kessel
L	Leitungen (erdverlegt); linear
L	linear
M	Mantelrohr
m	Mittel
max	Maximal, Maximum
min	Minimal, Minimum
MV	Mehrverbrauch
N	Nenn
N	Netz
Nutz	Nutzwärme
opt	optimal
P	Pumpe
PN	Nennndruck (Pressure Nominal)
q	Wärme
R	Rohr, Mediumrohr

Indizes	Bedeutung
REF	Referenz
RL	Rücklauf
RS	Rohrstatisch
S	Strom (Kosten)
SP	Schlechtpunkt
Sp	Speicher
St	Statisch
T	Temperatur
T	Teilstrang
tot	Total
u	untere
U	Umgebung
U	Unterhalt- und Servicearbeiten
Ü	Überdeckung
V	Verlust
V	Vergleichsspannung
Ver	Verlegung
VL	Vorlauf
Vor	Vorspannung, Vorspann
VR	Vor- und Rücklauf
W	Wasser
WA	Wärmeabnehmer
WE	Wärmeerzeuger (Wärmezentrale)
WS	Wassersäule
WV	Wärmeverteilung
WZ	Wärmezähler
x	gesuchte Grösse
zu	zugeführt
zul	zulässig
0	Anfang, Eingang
1	Ende, Ausgang

17 Glossar

Begriff	Bedeutung
Abnehmerstruktur	Die Abnehmerstruktur beschreibt ein Versorgungsgebiet nach Kriterien wie Bebauungsdichte, Bebauungsstruktur, Anschlussdichten, Bedarf, Gleichzeitigkeit, etc..
Abonnierte Anschlussleistung	Vertraglich vereinbarte maximale Wärmebezugsleistung eines an ein Fernwärmenetz angeschlossenen Verbrauchers.
Abwärme	Nicht vermeidbare Wärmeverluste aus Energieumwandlungsanlagen oder chemischen Prozessen. Bei einem Prozess anfallende Abwärme kann an andere Prozesse weitergeführt werden. Das nutzbare Potenzial ergibt sich aus der über das Jahr abgegebenen Wärmemenge und dem Temperaturniveau der Abwärme. Für Fernwärme direkt nutzbar sind Abwärmequellen bei Temperaturen über 70°C und mit einer hohen Vollbetriebsstundenzahl.
Anschlussdichte	Die Anschlussdichte beschreibt die pro Jahr und Trassemeter an die Wärmeabnehmer gelieferte Wärme. Sie dient als Kenngrösse zur Beurteilung der Energiedichte der Wärmeverteilung und beeinflusst die Energieeffizienz und die Wirtschaftlichkeit des Netzes. Die Anschlussdichte kann für das gesamte Netz und für Teilstränge ausgewiesen werden.
Anschlussgrad	Der Anschlussgrad ist das Verhältnis des Jahreswärmebedarfs der in einem Gebiet angeschlossenen Wärmeabnehmer bezogen auf den Jahreswärmebedarf aller infrage kommender Wärmeabnehmer im betrachteten Gebiet. Für Gebiete mit ähnlichen Verbrauchern entspricht dies auch dem anzahlmässigen Anteil der angeschlossenen Wärmeabnehmer.
Anschlussleistung	Die Anschlussleistung eines Fernwärmenetzes ist die Summe der Anschlussleistungen aller Wärmeabnehmer unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit, also das Produkt aus der Summe der abonnierten Anschlussleistungen aller Wärmeabnehmer und dem Gleichzeitigkeitsfaktor. Siehe auch Gleichzeitigkeit und Gleichzeitigkeitsfaktor.
Arbeitszahl	Die Arbeitszahl beschreibt das Verhältnis der über einen längeren Betrachtungszeitraum erzeugten Wärme einer Wärmepumpe zu der im Betrachtungszeitraum zugeführten elektrischen Energie. Siehe auch Leistungszahl und Jahresarbeitszahl.
Bandlast	Bandlast bezeichnet eine dauerhaft, also während 8760 Stunden pro Jahr benötigte Leistung. Die Bandlast eines Fernwärmenetzes setzt sich zusammen aus den saisonal unabhängigen Verbrauchern plus den Netzverlusten bei Bandlastbetrieb.
Biomasse	Biomasse umfasst alle pflanzlichen und tierischen Stoffe. Im Zusammenhang mit Energietechnik kommen grundsätzlich alle biogenen Stoffe als Energieträger infrage. Für Fernwärme werden in erster Linie Holz und vergärbare Abfälle genutzt.
Brauchwarmwasser	Siehe Warmwasser
Betriebswasser	Wasser für gewerbliche und häusliche Einsatzbereiche, das nicht Trinkwasserqualität aufweisen muss.
Dämmstärke-Klassen	Die Dämmstärke bezeichnet die Klasse der Wärmedämmung um das Mediumrohr. Für KMR werden drei Klassen angeboten, wobei 1 die schwächste und 3 die stärkste Dämmung beschreibt. Bei MMR und PMR existieren zwei Klassen, die als Standard-Version und als verstärkte Version bezeichnet werden.
Doppelrohr-Ausführung	Vorlauf- und Rücklaufrohr mit PUR-Schaum als Wärmedämmung in einem Kunststoffrohr als Schutz. Es sind starre und flexible Ausführungen mit Stahlmedium- oder Kunststoffmediumrohr erhältlich.
Druckschaubild, Druckverlauf-Diagramm	Darstellung der Druckverteilung im Netz in Abhängigkeit der Distanz von der Wärmezentrale.
Endausbau	Der für die Auslegung und Berechnung prognostizierte Endausbau des Fernwärmenetzes.
Erdverlegung	Unterirdische Verlegung von Fernwärmeleitungen in einem Kanal, einem Graben oder grabenlos.
Expansion und Druckhaltung	Teilsystem im hydraulischen System (Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung), welches die Volumenänderung des Warmwassers zwischen minimaler und maximaler Temperatur aufnimmt und so den Druck weitgehend konstant hält (Druckhaltung).
Fernheizung	Sofern die Wärmeerzeugung eines Fernwärmenetzes mit einer Heizung erfolgt, wird diese auch als Fernheizung bezeichnet.
Fernheizwerk	Als Fernheizwerk wird eine Wärmezentrale zur Versorgung eines Fernwärmenetzes bezeichnet.
Fernwärme	Fernwärme beschreibt eine leitungsgebundene Wärmeversorgung von Kunden über Wasser oder Dampf mit zentral erzeugter Wärme. Fernwärmenetze decken einen breiten Leistungsbereich mit Anschlussleistungen von weniger als 100 kW bis zu über 1 GW ab. Für die Gesamtenergiestatistik des Bundes wird zudem vorausgesetzt, dass das Haupttransport- und Verteilnetz öffentlichen Boden beansprucht und dass die Wärme an Dritte verkauft wird [11]. Grosse Wärmenetze innerhalb einer juristischen Einheit wie zum Beispiel einer Grossüberbauung sind technisch mit einem Fernwärmenetz identisch, werden aber nicht als Fernwärme erfasst.
"Nahwärme"	Für kleinere Netze wird zum Teil auch der Begriff Nahwärme verwendet. In Deutschland wird damit die Übertragung von Wärme für Heizung und Warmwasser zwischen Gebäuden mit Leistungen zwischen 50 kW und einigen Megawatt beschrieben [6]. Von Minergie® wird Nahwärme auch dann verwendet, wenn die Wärmeproduktionsanlage einige Gebäude oder Gebäudekomplexe versorgt, wobei nicht zwingend ein Verkauf an Dritte erfolgen muss [7]. Da der Übergang zwischen Nahwärme und Fernwärme fließend ist, wird im vorliegenden Planungshandbuch nur der Begriff Fernwärme verwendet.
Fernwärmenetz	Ein Fernwärmenetz ist eine Rohrleitungsanlage mit allen nötigen Zusatzeinrichtungen zur Versorgung von Kunden mit Wärme. Als Wärmeträger dienen Wasser oder Dampf. Der Wärmeträger fliesst in einem geschlossenem System vom Wärmeerzeuger zu den Wärmeabnehmern und zurück. Das geschlossene System bildet das Fernwärmenetz.
Ganzjahresbetrieb	Ganzjährige Bereitstellung und Lieferung von Wärme an die Wärmeabnehmer.
Gebäudetypen	Kategorisierung der Gebäude nach Bauart, Nutzungsart, Alter und weiteren Kriterien.. Beispiele zur Charakterisierung sind Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus, Altbau und Neubau, Wohngebiet und Industriezone sowie der Gebäudeabstand.
Gebiete und Zonen	Ein potenzielles Wärmeversorgungsgebiet kann eine Ortschaft, Quartiere, Stadtteile, mehrere Grossabnehmer oder einen einzelnen Grossabnehmer umfassen. Die Einteilung des potenziellen Wärmeversorgungsgebietes in Gebiete und Zonen erfolgt aufgrund der erwarteten Wärmebezugsdichte von Gebäudetypen oder aufgrund von geografischen Gegebenheiten wie z.B. Strassen, Bahntrassen, Bächen usw.. Einzelne Zonen können vereinfacht als Grossabnehmer behandelt werden. Als Hilfsmittel zur Einteilung einer Ortschaft dient der Ortsplan und wenn vorhanden ein Energiekataster.
Geodätisches Netzprofil, Höhenkurve	Das geodätische Netzprofil stellt den Höhenverlauf des Netzes in Meter über Meer dar.

Begriff	Bedeutung
Geografisches Informationssystem (GIS)	Datenverarbeitungsanwendung zur Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation räumlicher Daten. Zur Planung von Fernwärmenetzen kann damit die Trassenführung unter Berücksichtigung der geografischen Gegebenheiten und der eventuell bereits vorhandenen anderen Versorgungssysteme (Wasser, Gas, Elektrizität etc.) festgelegt werden. Daneben kann das GIS auch zur Abschätzung des lokalen Energie- und Leistungsbedarfs genutzt werden.
Gleichzeitigkeit und Gleichzeitigkeitsfaktor	Die Gleichzeitigkeit beschreibt in einem Verbund von Wärmeabnehmern den Effekt, dass bei einer grösseren Anzahl Wärmeabnehmer nie alle gleichzeitig die maximale Wärmeleistung beziehen. Der Gleichzeitigkeitsfaktor beträgt 1 für einen einzigen Wärmeabnehmer und wird kleiner als 1 für mehrere Wärmeabnehmer und er beschreibt, das Verhältnis zwischen der effektiv erwarteten maximalen Abnahmeleistung aller Wärmeabnehmer zur gesamten abonnierten Anschlussleistung der Wärmeabnehmer.
Grabenloser Leitungsbau	Beim grabenlosen Leitungsbau werden Leitungen unterirdisch durch Einziehen, Einschieben, Einpressen oder Einrammen in einen im Boden geschaffenen Hohlraum verlegt.
Grabentechnik	Bei der Grabentechnik werden die Fernwärmeleitungen in direktem Kontakt mit der Erde in offenen Gräben verlegt. Sie ist das am häufigsten eingesetzte Verlegeverfahren.
Grädigkeit	Die Grädigkeit ist die Temperaturdifferenz zwischen der primären und der sekundären Rücklauftemperatur am Wärmeübertrager der Übergabestation. Sie ist ein Mass für die Qualität der Wärmeübertragung und sollte möglichst klein sein.
Grundlast	Bei Einsatz von zwei Wärmeerzeugern wird der Wärmeleistungsbedarf in einen Grundlast- und einen Spitzenlastanteil aufgeteilt. Der Grundlastwärmeerzeuger weist dabei eine hohe Vollbetriebsstundenzahl auf, der Spitzenlastkessel eine niedrige.
Grundlastabdeckung	Wärmeerzeugungseinheit zur Deckung der Grundlast.
Hauptleitung	Leitung von der Wärmezentrale bis zu den Zweigleitungen im Wärmeverteilnetz, üblicherweise ohne Hausanschlüsse. Weitere Begriffe sind z.B. Stammleitung oder auch Transpoptleitung, wenn die Wärmezentrale relativ weit vom Versorgungsgebiet entfernt ist.
Hausanlage	Die Hausanlage besteht aus dem Verteilsystem im Gebäude zur Verteilung von Raum- und Prozesswärme sowie Brauchwarmwasser.
Hausanschlussleitung	Verbindungsleitung zwischen Wärmeverteilnetz und Übergabestation.
Hausanschlussraum	Der Hausanschlussraum beinhaltet die Hausstation und die Hauptabsperrorgane.
Hausstation	Die Hausstation besteht aus der Übergabestation und der Hauszentrale.
Hauszentrale	Die Hauszentrale ist das Bindeglied zwischen der Übergabestation und der Hausanlage. Sie dient der Anpassung der Wärmelieferung an die Hausanlage hinsichtlich Druck, Temperatur und Volumenstrom. Bei der Gestaltung der Hauszentrale ist zwischen direkten oder indirekten Anschluss zu unterscheiden.
Heisswasser	Der Begriff Heisswasser im Fernwärmebereich bezeichnet das Zirkulationswasser im Fernwärmenetz, wenn die Temperatur über 110°C beträgt.
Heizwerk Fernheizwerk	Energiezentrale zur Erzeugung von Wärme.
Heizkraftwerk	Energiezentrale mit gleichzeitiger Erzeugung von Wärme und Strom. Siehe auch Wärme-Kraft-Kopplung
Jahresdauerlinie der Aussentemperatur	Die Jahresdauerlinie der Aussentemperatur ist eine Darstellung der Summenhäufigkeit der Aussentemperatur als Anzahl Tage oder Stunden pro Jahr für eine bestimmte Messstation. Sie entspricht somit einer Summenhäufigkeitskurve der Aussentemperatur.
Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs	Die Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs ergibt sich aus der Lastkennlinie und der Jahresdauerlinie der Aussentemperatur. Sie ist eine Summenhäufigkeitskurve und stellt den Wärmeleistungsbedarf in Abhängigkeit der Anzahl Tage oder Stunden pro Jahr dar.
Jahreswärmebedarf	Der Jahreswärmebedarf eines Verbrauchers ist dessen an der Wärmeübergabestelle anfallende jährliche Wärmebedarf. Für ein Fernwärmenetz ist der Jahreswärmebedarf der jährliche Wärmebedarf an der Schnittstelle zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeverteilnetz.
Jahresnutzungsgrad	Nutzungsgrad während eines Jahres. Siehe auch Nutzungsgrad.
Jahresarbeitszahl (JAZ)	Die Jahresarbeitszahl beschreibt das Verhältnis der Jahreswärmeproduktion zu der in einem Jahr zugeführten elektrischen Energie einer Wärmepumpe. Siehe auch Leistungszahl und Arbeitszahl.
Jährliche Betriebsstunden	Effektive Anzahl Stunden pro Jahr, während der eine Anlage betrieben wird. Die jährlichen Betriebsstunden werden nicht als Vollbetriebsstunden ausgewiesen, d.h. eine Betriebsstunde bei 50 % Leistung gilt als eine Betriebsstunde.
Kaltwasser	Kaltes Trinkwasser, dessen Temperatur nicht gezielt erhöht wurde.
Kanaltechnik	Vorgefertigte oder vor Ort hergestellte Betonkanäle zur Aufnahme von Fernwärmeleitungen.
Kellerleitung	Die Kellerleitung verbindet die Hausanschlussleitung mit der Übergabestation.
Kesselwirkungsgrad	Die von einem Heizkessel wasserseitig produzierte Nutzenergie dividiert durch die im Brennstoff als Heizwert zugeführte Energie. Die Bestimmung erfolgt entweder im stationären Zustand ohne Speichereffekte (z.B. bei automatischen Feuerungen) oder über einen Abbrandprozess (z.B. bei handbeschickten Feuerungen).
Kunststoffmediumrohre (PMR)	Flexibles Kunststoffmediumrohr mit einem PUR-Schaum als Wärmedämmung und einem Kunststoffmantelrohr als Schutz.
Kunststoffverbundmantelrohre (KMR)	Starres Stahlmediumrohr mit einem PUR-Schaum als Wärmedämmung und einem Kunststoffmantelrohr als Schutz.
Lastkennlinie	Darstellung des Wärmeleistungsbedarfs in Abhängigkeit des Tagesmittelwertes der Aussentemperatur.
Leistungsdichte,	Auf eine Gebietsfläche bezogene maximale Leistung. Im Zusammenhang mit Fernwärme ist die Wärmeleistungsdichte von Interesse.
Leistungszahl	Die Leistungszahl einer Wärmepumpe ist das Verhältnis zwischen der erzeugten Wärmeleistung und der zugeführten elektrischen Leistung. Sie beschreibt einen Momentanwert oder einen über eine kurzfristige Betrachtungsdauer bestimmten Wert. .
Maschennetz	Ein Maschennetz ist ein Netz, dessen Strahlen oder Ringe an mehreren Knotenpunkten zusammengeschlossen sind.
maximal zulässige Betriebstemperatur	Maximale über eine kurze Zeitperiode zulässige Betriebstemperatur.

Begriff	Bedeutung
Maximaldruck	Druck, der an keiner Stelle des Netzes und zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf.
maximale Dauerbetriebstemperatur	Maximale, ohne zeitliche Einschränkung zulässige Betriebstemperatur
Metallmediumrohre (MMR)	Flexibles Stahlmediumrohr mit einem PUR-Schaum als Wärmedämmung und einem Kunststoffmantelrohr als Schutz. Das Stahlmediumrohr ist vielfach als Wellrohr ausgeführt.
Minimaldruck	Druck, der an keiner Stelle des Netzes und zu keinem Zeitpunkt unterschritten werden darf.
Nahwärme	Siehe Fernwärme.
Nennndruck PN (Pressure Nominal)	Der Nennndruck gibt für ein Rohrleitungssystem eine Referenzgrösse an. Die Angabe erfolgt nach DIN, EN, ISO durch die Bezeichnung PN (Pressure Nominal) gefolgt von einer Zahl, die den Auslegungsdruck in bar bei Raumtemperatur (20°C) angibt und ist in EN 1333 ausgeführt.
Nennndurchmesser DN, Nennweite, nominaler Durchmesser	Referenz-Durchmesserangabe, die Grösse und Kompatibilität von Bauteilen definiert. Der Nennndurchmesser ist Teil der Bezeichnung des Bauteils nach EN ISO 6708 und ist nicht identisch mit dem Zahlenwert in Millimetern.
Nennwärmeleistung	Höchste Dauerleistung einer Anlage für die sie gemäss Herstellerangaben ohne zeitliche Einschränkung ausgelegt ist.
Netzdifferenzdruck Differenzdruck	Der Netzdifferenzdruck bezeichnet den über das ganze Fernwärmenetz betrachteten Druckunterschied zwischen Vor- und Rücklauf.
Netzdruck	Als Netzdruck wird der Druck in der Fernwärmeleitung bezeichnet.
Netzleistung, maximale Netzleistung, momentane Netzleistung	Die <i>maximale Netzleistung</i> ist die im Auslegefall am Eingang des Fernwärmenetzes abzudeckende Wärmeleistung. Sie ergibt sich aus dem Wärmeleistungsbedarf aller Verbraucher multipliziert mit dem Gleichzeitigkeitsfaktor und zuzüglich der Wärmeverteilungsverluste. Die <i>momentane Netzleistung</i> entspricht bei regulärem Betrieb dem momentanen Wärmeleistungsbedarf aller Kunden, sie kann aber zum Beispiel im Störfall auch durch die momentane Wärmeerzeugungsleistung limitiert werden.
Netzschlechtpunkt Schlechtpunkt	Standort des geringsten Differenzdruckes zwischen Vor- und Rücklauf. Dieser Ort kann im Netz in Funktion des momentanen Wärmebedarfes wandern. Der Netzschlechtpunkt dient als Auslegungsgrösse für die Hauptpumpeneinheit.
Netztemperaturen	Die Netztemperaturen werden als gemeinsame Angabe der Vorlauf- und Rücklauftemperatur in Grad Celsius (z.B. 80/50) beschrieben.
Netztrennung	Die Netztrennung bezeichnet die Trennung zweier hydraulischer Netze beispielsweise durch einen Wärmeübertrager oder eine hydraulischen Weiche. Netztrennungen führen zu zusätzlichen Energieverlusten, sowohl an Wärme als auch an Strömungsenergie.
Nutzungsgrad	Der Nutzungsgrad ist das Verhältnis zwischen der in einem längeren Betrachtungszeitraum erzeugten Nutzenergie über die im Betrachtungszeitraum zugeführten Energie. Dies entspricht dem Verhältnis zwischen der im Betrachtungszeitraum aufsummierten Nutzleistung (z.B. die über den Wärmehzähler aufsummierte produzierte Wärme) dividiert durch die über den Betrachtungszeitraum aufsummierte zugeführte Leistung (z.B. dem Heizwert des verfeuerten Brennstoffs). Wenn die Betrachtung über einen Zeitraum von einem Jahr erfolgt, wird dies als Jahresnutzungsgrad bezeichnet. Wird das Verhältnis von Nutzenergie zu zugeführter Energie über eine kurze Betrachtungsdauer oder als Momentwert bestimmt, wird dies als Wirkungsgrad bezeichnet (siehe auch Wirkungsgrad).
Primäre Rücklauftemperatur	Temperatur des Fernwärmemediums, das vom Wärmeabnehmer zum Wärmeerzeuger fliesst.
Primäre Vorlauftemperatur	Temperatur des Fernwärmemediums, das vom Wärmeerzeuger zum Wärmeabnehmer fliesst.
Primärseite	Als Primärseite wird der mit Fernwärmemedium durchströmte Anlagenteil bezeichnet.
Redundanz	Bereitstellung einer zusätzlichen, im Regelbetrieb nicht notwendigen funktionalen Einheit zur Erhöhung der Betriebssicherheit.
Ringnetz	Bei einem Ringnetz sind eine oder mehrere Leitungen zu einem Ring zusammengeschlossen. Dadurch kann die Versorgungssicherheit erhöht werden.
Rohrrauheit	Kenngösse einer Oberfläche (hier der Rohrwand) für die Höhe der Unebenheiten in Millimeter.
Rohrwidestandsbeiwert Rohrreibungszahl Rohreiwert	Dimensionslose Kennzahl zur Berechnung des Druckabfalls einer Strömung in einem Rohr.
Rohrstatik	Berechnungsvorgehen zur Bewertung der Festigkeit und zur Auslegung von Rohrleitungen und Leitungsbestandteilen.
Saisonbetrieb	Saisonale Bereitstellung und Lieferung von Wärme an die Wärmeabnehmer meist während der Heizsaison und in der Übergangszeit.
Schlechtpunkt	Siehe Netzschlechtpunkt.
Schlüsselkunde	Ein Schlüsselkunde ist ein Kunde (oder in der Planungsphase ein potenzieller Kunde) mit einem grossen Wärmeverbrauch in einem zu beurteilenden Gebiet.
Sekundäre Rücklauftemperatur	Temperatur des Heizwassers, das von den einzelnen Verbrauchern beim Wärmeabnehmer zur Übergabestation zurückkommt.
Sekundäre Vorlauftemperatur	Temperatur des Heizwassers von der Übergabestation zu den einzelnen Verbrauchern beim Wärmeabnehmer. Die Wärmeinstallation beim Kunden wird als sekundär bezeichnet, da meist eine hydraulische Trennung zum Fernwärmenetz besteht.
Sekundärseite	Als Sekundärseite wird der vom Heizmedium der Hausanlage durchströmte Anlagenteil bezeichnet.
Situationserfassung	Die Situationserfassung ist eine Analyse der Ist-Situation mit Erfassung des Energie- und Leistungsbedarfs für Wärme (Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme), der baulichen Situation für die Trassenverlegung und des potenziellen Wärmeversorgungsgebietes.
Spitzenlastabdeckung	Wärmeerzeugungseinheit zur Deckung der Spitzenlast. Diese sollte einen breiten Regelbereich aufweisen und schnell zu- und weggeschaltet werden können. Als zusätzliche Redundanz werden der oder die Spitzenlastkessel oft gross ausgelegt, um den Ausfall einer oder mehrerer Grundlastkessel zu kompensieren.
Spitzenleistung	Maximal benötigte Leistung bei einer für die Auslegung massgebenden Aussentemperatur.
Stahlmantelrohre (SMR)	Starres Stahlmediumrohr mit einem Mantelrohr aus Stahl als Schutz. Die Wärmedämmung erfolgt hauptsächlich durch ein Vakuum zwischen Medium- und Mantelrohr.

Begriff	Bedeutung
Stammleitung	Siehe Hauptleitung
Sternnetz	Die Leitungen gehen von einem Einspeisepunkt sternförmig aus und werden nur von einer Seite gespeisen.
Tarifblatt	Das Tarifblatt ist Teil des Wärmeliefervertrages und regelt die Bedingungen für das Erbringen der Wärmelieferung.
Technische Anschlussvorschriften TAV,	Die Technische Anschlussvorschriften TAV (auch Technische Anschlussbedingungen TAB) regeln im Idealfall alle technisch relevanten Anschlussbedingungen wie Druck, Temperatur, Material, Messausrüstung, Verrechnung, etc.. Diese gelten bei der Planung, dem Anschluss und Betrieb des Fernwärmenetzes. Die TAV sind Teil des Wärmeliefervertrages.
Temperaturspreizung	Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur. Bei einem Fernwärmenetz interessiert meistens die Temperaturspreizung der Primärseite, also im Fernwärmenetz.
Trasse	Die Trasse ist der für die Führung der Fernwärmeleitung erforderliche Geländebereich.
Trassenlänge	Länge der Trasse von Haupt-, Zweig, und Hausanschlussleitungen. Bei je einem Rohr für Vor- und Rücklauf ist die Rohrleitungslänge das Zweifache der Trassenlänge.
Trinkwasser	Nach der schweizerischen Lebensmittelgesetzgebung ist Trinkwasser definiert als Wasser, das natürlich belassen oder nach Aufbereitung bestimmt ist zum Trinken, zum Kochen, zur Zubereitung von Speisen sowie zur Reinigung von Gegenständen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen [67]. Wasser in Trinkwasserqualität wird auch für Körperpflege und –reinigung (Dusch- und Badewasser usw.) verwendet.
Übergabestation	Die Übergabestation ist das Bindeglied zwischen der Hausanschlussleitung und der Hauszentrale. Sie dient der vertragsgemässen Übergabe der Wärme und der Messung des Wärmebezuges.
Umgebungswärme, Umweltwärme	Umgebungswärme oder Umweltwärme ist eine erneuerbare, natürliche und überall verfügbare Energieform auf relativ tiefem Temperaturniveau. Quellen von Umgebungswärme sind die Luft, das obere Erdreich sowie Grund-, See- und Flusswasser. Mit Wärmepumpen kann Umgebungswärme auf ein höheres Temperaturniveau gehoben und nutzbar gemacht werden. Dazu ist die Zufuhr von hochwertiger Energie in der Regel in Form von Elektrizität aus einer anderen Quelle erforderlich.
Verbraucher	Siehe Wärmeabnehmer
Verteilung	Siehe Zweigleitung
Vollbetriebsstunden und Vollbetriebsstundenzahl	Die Vollbetriebsstundenzahl ist der Jahresenergiebedarf dividiert durch die Nennwärmeleistung. Sie ist eine wichtige Kenngrösse zur Anlagendimensionierung für einen einzelnen Verbraucher oder das ganze System. Eine Vollbetriebsstunde entspricht zum Beispiel einer Stunde Betrieb bei Nennlast oder zwei Betriebsstunden bei 50 % Last und es gilt: Anzahl Vollbetriebsstunden \leq Anzahl jährlicher Betriebsstunden.
Wandrauheit	Siehe Rohrauheit
Wärme-Kraft-Kopplung	Eine Anlage zur Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) nutzt eine thermische Maschine wie zum Beispiel einen Verbrennungsmotor oder eine Dampfturbine zur Krafterzeugung, die meistens zur Stromproduktion dient und mit gleichzeitiger Nutzung der Abwärme des thermischen Prozesses als Nutzwärme. WKK-Anlagen mit Motoren oder kleinen Gasturbinen werden auch als Blockheizkraftwerke (BHKW) bezeichnet, während thermische Kraftwerke mit Abwärmenutzung als Heizkraftwerke bezeichnet werden.
Wärmebedarfsdichte	Die Wärmebedarfsdichte ist der jährliche Wärmebedarf aller Gebäude eines Versorgungsgebietes im Verhältnis zur Grundfläche.
Wärmebezugsdichte	Die Wärmebezugsdichte ist der jährliche Wärmebezug aller Gebäude eines Versorgungsgebietes im Verhältnis zur Grundfläche.
Wärmeerzeugungsanlage	Ein Wärmeerzeuger wandelt Endenergie in Nutzwärme um und überträgt diese an ein Heizmedium.
Wärmeabnehmer Wärmebezüger Wärmeabnehmer	Bezieht vom Wärmelieferanten Wärme und bezahlt die Wärme gemäss vertraglich abgemachten Bedingungen.
Wärmeleistungsdichte	Auf eine Gebietsfläche bezogene maximale Wärmeleistung.
Wärmelieferant	Erbringt die vertraglich vereinbarte Wärmeversorgung an den Wärmeabnehmer.
Wärmeliefervertrag	Im Wärmeliefervertrag ist die Schnittstelle zwischen Wärmelieferant und Wärmeabnehmer vertraglich vereinbart. Üblicherweise enthält der Wärmeliefervertrag zusätzlich folgende Vertragsbestandteile: Allgemeine Geschäftsbedingungen AGB, Technische Anschlussvorschriften TAV und ein Tarifblatt.
Wärmespeicher	Wärmespeicher für Fernwärmenetze werden oft als drucklose, mit Wasser gefüllte Behälter ausgeführt. Sie dienen dazu, den Wärmebedarf des Fernwärmenetzes auszugleichen, indem Lastspitzen durch den Speicher abgedeckt werden, während der Speicher während Phasen mit geringem Wärmebedarf wieder geladen wird. Dies ermöglicht eine kleinere Dimensionierung und ein optimierte Betriebsweise der Wärmeerzeugung. Die Grösse der Speicher hängt von der Grösse der Wärmeerzeugungsanlage und der Aufgabe der Speicherung ab. Das Fassungsvermögen kann wenige Kubikmeter bis mehrere Tausend Kubikmeter betragen.
Wärmeträgermedium	Das für die Wärmeübertragung im Wärmeverteilnetz eingesetzte Medium wie Wasser, Dampf oder Thermoöl.
Wärmeübertrager	Ein Wärmeübertrager (veraltet: Wärmetauscher) ist ein Apparat, in dem thermische Energie von einem warmen Stoffstrom auf einen anderen, kälteren Stoffstrom übertragen wird.
Warmwasser	Der Begriff Warmwasser wird in der Gebäudetechnik und in der Fernwärmetechnik unterschiedlich wie folgt verwendet: In der Fernwärmetechnik beschreibt Warmwasser das Zirkulationswasser im Fernwärmenetz, wenn die Temperatur bis zu 110°C beträgt, während Zirkulationswasser mit über 110°C als Heisswasser bezeichnet wird. Warmwasser im Fernwärmenetz muss keine Trinkwasserqualität aufweisen und ist daher nicht zu verwechseln mit Warmwasser in der Gebäudetechnik. In der Gebäudetechnik steht Warmwasser für erwärmtes Trinkwasser, das bei Bedarf erwärmt oder in Warmwasserspeicher bei rund 60°C zur Verfügung gestellt wird. Um erwärmtes Trinkwasser von Zirkulationswasser im Fernwärmenetz zu unterscheiden, wird es im vorliegenden Handbuch als Brauchwarmwasser BWW bezeichnet, das mit einer Brauchwarmwassererwärmung BWE zur Verfügung gestellt wird.
Werkleitungen	Der Begriff umfasst Kanalisations-, Wasser, Abwasser und Stromleitungen einer Gemeinde, einer Stadt oder einem Unternehmen.

Begriff	Bedeutung
Wirkungsgrad	<p>Der Wirkungsgrad einer technischen Anlage beschreibt das Verhältnis zwischen Nutzenergie und zugeführter Energie. Bei stationären Bedingungen ohne Verfälschung durch Speichereffekte kann der Wirkungsgrad auch als Verhältnis zwischen Nutzleistung und zugeführter Leistung bestimmt werden. Im vorliegenden Handbuch wird der Begriff des Wirkungsgrades für einen über die Leistungen bestimmten Momentanwert oder einen über eine kurze Betrachtungsdauer ermittelten Wert verwendet.</p> <p>Zur Bewertung des Anlagenbetriebs über einen längeren Betrachtungszeitraum beschreibt der Nutzungsgrad das Verhältnis zwischen der über den Betrachtungszeitraum aufsummierten Nutzleistung zu der über den Betrachtungszeitraum aufsummierten zugeführten Leistung (siehe auch Nutzungsgrad)...</p>
Zentralheizung	Eine Zentralheizung dient zur Wärmeversorgung eines Gebäudes durch einen zentralen Wärmeerzeuger.
Zweigleitung	Zweig- oder Verteilleitungen sind Abgänge von den Hauptleitungen zu einzelnen Verbrauchergruppen.

18 Stichwortverzeichnis

A

Abnahme	102, 115
Abnahmeprotokoll	75, 116
Abnehmerstruktur	56, 107
Abwärme	11
Anergie	42
Anergienetze	11, 67
Anlagenkennlinie	133
Annuitätenmethode	173
Anschlussdichte	20, 82, 108
Anschlussinteresse	106
Anschlussleistung	12, 99, 107, 163
Armatur	75
Ausbauetappe	105
Ausführung	115
Ausführungsplan	115
Auslastung	20
Auslegungstemperatur	140
Ausschreibung	113

B

Bauherr	102, 115, 171
Bauüberwachung	115
Beanspruchungsermittlung	137
Beimischschaltung	157, 167
Betriebsdruck	
Maximal	58
Minimal	59
Betriebshandbuch	117
Betriebskonzept	120
Betriebsoptimierung	118
Betriebsstunden	16
Betriebstemperatur	
Dauerbetriebstemperatur	11, 68, 71
Maximal	71, 72, 80
Betriebswasser	93
Bewirtschaftung	120
Biomasse	24
Brandes-System	73
Brauchwarmwasser	11, 93, 153, 166
Businessplan	105, 175

D

Dämmstärke	14, 71, 122, 147
Dehnpolster	142
Dehnschenkel	88
Dehnungsausgleich	140
Dichtprüfung	91
Dienstbarkeit	86, 89
Differenzdruck	
Hausstation	58
Messung	52, 56
Minimal	55
Regelung	52, 152, 158, 160
Dokumentation	115
Doppelrohr	70, 142

Dreiwegeventil	158
Drosselschaltung	157, 163
Druckfestigkeit	137
Druckhaltung	58, 61, 98
Druckschaubild	58
Durchgangsventil	158

E

Einspritzschaltung	157, 164
Endausbau	105, 130, 171
Energieangebot	109
Energiebedarf	19, 105
Energiebedarf Pumpen	134, 174
Energiebezugsfläche	19, 106
Energieinhalt	12, 42
Entlüftung und Entleerung	83
Entwurfsplanung	111
Erfolgsüberwachung	120
Exergie	11, 42, 65
Expansion	49
Externe Kosten	175

F

Fernheizwerk	25, <i>Siehe</i> Heizwerk
Fernleitungsgruppe	57
Fernleitungspumpe	53, 133, 159
Festigkeitsberechnung	137
Festpunkt	91, 141, 143
Flüssigkeitskategorien	94
Förderhöhe	51, 133, 159
Führungslager	144
Funktionskontrolle	115
Funktionsstörung	115

G

Ganzjahresbetrieb	16
Gebäudetypen	105
Gebiete	83, 86, 87, 105
geodätisch	58, 164
Geografisches Informationssystem GIS	110
Gesamtanlage	17, 105, 162
Gleichzeitigkeit	107
Gleichzeitigkeitsfaktor	107
Gleitlager	143
Grabentiefe	89, 90, 92
Grabenverfüllung	92
Grädigkeit	113, 152
Grundkennlinie	
gleichprozentig	158
linear	158
Grundlast	16, 20, 23, 26
Grundlastabdeckung	11
Grundschaltungen	157

H

Hauptleitung	80, 83, 131
Hausanlage	97, 111, 149, 156, 164, 169

Hausanschlussleitung 80, 96, 131
 Hausanschlussraum..... 96
 Hauseinführung 90
 Hausstation 59, 97, 146, 149
 Hauszentrale 97, 146, 149
 Heisswasser 94, 95
 Heizgrenze 16, 50
 Heizkraftwerk 36
 Heizwärmebedarf 16, 106
 Hilfenenergieverbrauch 14, 171
 Hydraulik 156
 Hydraulikschema..... 100

I

Inbetriebnahme 115, 147
 Inbetriebsetzung..... 115
 Indikator-System 73
 Instandhaltung..... 120, 171
 Instandsetzung 120, 171
 Instandsetzungskosten..... 172
 Instandstellung 93
 Investitionskosten..... 49, 171

J

Jahresarbeitszahl 22, 30
 Jahresdauerlinie 18, 20
 Jahreskosten 109, 173
 Jahresnutzungsgrad..... 22, 109, 175
 Jahreswärmebedarf 16, 20, 106, 171

K

Kaltwasser..... 93, 96, 155, 167
 Kellerleitung 96
 Kesselwirkungsgrad 12, 22, 23
 Kompensator..... 143
 Kostenarten 171
 Kostengruppen 171
 Kostenstruktur 171
 Kreuzgleiter 143
 Kunststoffmediumrohr (PMR)..... 69, 71
 Kunststoffverbundmantelrohr (KMR) 68, 71, 141

L

Lastkennlinie (MMR) 16, 17, 18, 105
 Leckageüberwachung 71, 73, 113
 Legionellen 11, 154, 168
 Leistungszahl 12, 22, 30
 Leitungsbau
 Betonkanal..... 66, 73, 84, 142
 Erdverlegt 65, 71, 87, 115, 124, 141
 Frei Verlegt..... 142
 Grabenlos 84, 87
 Kaltvorspannung..... 144
 Oberirdisch 84, 116, 123, 142

M

Maschennetz..... 81, 83
 Mauerdurchführung 90
 Mehrfachrohr 142
 Metallmediumrohr (MMR)..... 69, 71

Minimalleistung..... 20

N

natürlicher Festpunkt 141
 Nenndruck (PN)..... 58, 72, 80
 Nenndurchmesser (DN)..... 13, 71, 130
 Netzdruck 59, 149
 Netzkennlinie 53
 Netzleistung..... 12
 Netztemperatur..... 11, 49, 59, 68, 178
 Netztrennung 49, 60, 87
 Nordisches-System 73
 Nutzungsdauer 71, 172
 Nutzungsgrad 22

O

Optimierung 118, 119
 Optimierungsmassnahmen..... 119
 Ortungsverfahren
 Impulslaufzeit-Messverfahren 74
 Widerstands-Referenz-Messverfahren 74

P

Planbilanz- und Planerfolgsrechnung 109, 175
 Primärseite 98, 149, 154, 169, 182
 Pumpenauslegung..... 133
 Pumpenkennlinie 52, 133
 Pumpenregelkennlinie 162

Q

Querdehnungslager 143

R

Redundanz 20, 54, 99
 Regelventil..... 157, 169
 Ringnetz 82
 Rohrlager..... 143
 Rohrleitungssystem 71
 Rohrnetzberechnung 132
 Rohrrauheit..... 128, 132, 193
 Rohrstatik 88, 113, 136
 rohrstatische Auslegungstemperatur 140
 Rohrwiderstandsbeiwert 128, 193
 Rücklauftemperatur 49, 126, 152, 156, 163, 178

S

Saisonbetrieb 108, 126
 Schachtbauwerk 87, 91, 116
 Schlechtpunkt 55, 130
 Schlüsselkunde 105, 106, 111
 Schwachlast 20
 Schwachlastbetrieb 119, 170
 Schweissklasse 91
 Sekundärseite 98, 149, 154, 157, 163, 169, 183
 Situationserfassung 105, 107
 Spitzenlast..... 16, 21, 107, 165
 Spitzenlastkessel..... 11, 83
 Stahlmantelrohr (SMR) 70, 142
 Stammleitung 80
 Standard-Schaltung..... 163

Statischer Nachweis.....	139
Sternnetz.....	81
Störung.....	119, 120
Strömungsgeschwindigkeit.....	13, 128, 131
Stützweite.....	144
Submission.....	114

T

Tarifblatt.....	100
Technische Anschlussvorschriften (TAV).....	100, 152
Temperaturspreizung.....	12, 15, 49, 122, 131, 178
Teuerung.....	175
Thermografie.....	73
Tragfähigkeitsermittlung.....	137
Trasse	
Trassenabschnitt.....	174
Trassenführung.....	69, 80, 82, 105, 111
Trassenlänge.....	108, 174
Trassenplan.....	116
Trassenplanung.....	88
Trassenwarnband.....	115
Trinkwasser.....	93, 153, 188

U

Überdeckung.....	89, 113
Übergabe.....	115
Übergabestation.....	12, 96, 97, 113, 146, 178
Umgebungswärme.....	11, 25
Umwälzpumpen.....	51

V

Ventil.....	77, 158
Ventilautorität.....	147, 148, 158
Verlegemethoden.....	84
Verlege-Situationen	
kreuzende Leitungen.....	86
parallele Leitungen.....	86
Verlege-Technik	
Betriebliche Selbstvorspannung.....	142
Kaltverlegung.....	141
Thermische Vorspannung.....	142
Verlegetemperatur.....	140
Versicherung.....	120

Verteilleitung.....	80
Vollbetriebsstunden.....	16, 106, 181
Vorlauftemperatur.....	11, 49, 65, 109, 126, 149, 152
Vorspannung.....	137

W

Wandstärke.....	137
Wärmeabnehmer.....	10, 17, 49, 107, 156, 178
Wärmebedarf.....	16, 105
Wärmebezugsdichte.....	105
Wärmedämmung.....	146
Wärmeerzeugung.....	16, 80, 102, 122
Wärmegestehungskosten.....	71, 108, 173
Wärme-Kraft-Kopplung (WKK).....	11, 21, 26, 36
Wärmeleistungsbedarf.....	18, 105, 146
Wärmelieferant.....	96, 99, 146, 169, 183
Wärmeliefervertrag.....	99
Wärmespeicher.....	16, 165
Wärmeträgermedium.....	61, 63, 65, 146
Wärmeübertrager.....	97, 152, 153, 158, 163
Wärmeversorgungsgebiet.....	105
Wärmeverteilungskosten.....	13, 171
Wärmeverteilung	
Dampf.....	65
Heisswasser.....	66
Warmwasser.....	66
Wärmezähler.....	147
Wärmezentrale.....	49, 71, 80, 108, 111, 171
Warmwasser	
Fernwärmetechnik.....	94
Gebäudetechnik.....	93, 153, 166
Wartung.....	172
Wartungskonzept.....	120
Wartungsvertrag.....	120
Wasserqualität.....	93
Werkleitung.....	87, 90
Wirkungsgrad.....	22, 43, 134
Wirtschaftlichkeit.....	12, 171

Z

Zonen.....	83, 105
Zweingleitung.....	80, 131

19 Quellenverzeichnis

19.1 Literatur

- [1] Wikipedia: Chaudes-Aigues, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaudes-Aigues> 16. Mai 2016
- [2] Collins, J. F.: The History of District Heating, District Energy onSite, April 1959, 154–161
- [3] Frederiksen, S.; Werner, S.: District Heating and Cooling, Studentlitteratur AB, Lund 2013, ISBN 978-91-44-08530-2
- [4] Wikipedia Commons: Fernwärme Leipzig, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:021_DDR_Fernwärme_Leipzig_1986.jpg 24. Mai 2016
- [5] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V.: Bau von Fernwärmenetzen, Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H – VWEW, Frankfurt am Main 1993, ISBN 3-8022-0-14-3
- [6] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V.: Technisches Handbuch Fernwärme, AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Frankfurt am Main 2013, ISBN 3-89999-039-0 3
- [7] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V.: AGFW-Hauptbericht 2010, Frankfurt am Main 2011
- [8] Bundesverband Fernwärmeleitungen e.V. BFW: Das praktische Montagehandbuch für wärmege-dämmte Fernwärmeleitungen – Planen – Prüfen – Sichten, Bundesverband Fernwärmeleitungen e.V. BFW, Billigheim DE, 2. Auflage 2015, ISBN 978-3-00-048305-9
- [9] Euroheat & Power: Country by Country Statistics Overview 2013, Zugriff im Januar 2014, <http://www.euroheat.org/Statistics-69.aspx>
- [10] Wikipedia: Nahwärme, <https://de.wikipedia.org/wiki/Nahwärme>, 7. Dezember 2015
- [11] Verein Minergie®: Anwendungshilfe MINERGIE® und MINERGIE-P®, Minergie Schweiz, Agentur Bau, MuttENZ, Stand Januar 2013
- [12] Zinko, H.; et al: Improvement of operational temperature differences in district heating systems, International Energy Agency – Implementing Agreement on District Heating and Cooling, IEA DHC/CHP, Annex VII 8DHC-05.03, Paris 2005
- [13] Nussbaumer, T.; et al: Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen – Vorstudie, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, Bern 2012
- [14] Nussbaumer, T.; Thalmann, S.: Influence of system design on heat distribution costs in district heating, Energy 101(2016) 496–505
- [15] Nussbaumer, T.; Thalmann, S.: Einfluss von Auslegung und Betrieb auf die Wirtschaftlichkeit von Fernwärmenetzen, 13. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich 12.9.2014, Verenum Zürich 2014, ISBN 3-908705-25-8
- [16] Thalmann, S.; Nussbaumer, T.: Ist-Analyse von Fernwärmenetzen, 13. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich 12.9.2014, Verenum Zürich 2014, ISBN 3-908705-25-8
- [17] Thalmann, S.; Jenni, A.; Nussbaumer, T.: Optimierung von Fernwärmenetzen, 14. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich 16.9.2016, Verenum Zürich 2016, ISBN 3-908705-31-2, 153–172
- [18] Bundesamt für Energie: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2015, Bern 2016
- [19] Sres, A.: Weissbuch Fernwärme – VFS Strategie, Schlussbericht Phase 2: GIS-Analyse und Potentialstudie, Verband Fernwärme Schweiz VFS, Niederrohrdorf 2014
- [20] Felsmann, C.; Dittmann, A.; Richter, W. et al.: *LowEx Fernwärme, Multilevel District Heating*, Zusammenfassung, Technische Universität Dresden, TUDpress, Dresden 2011, ISBN 978-3-942710-15-2
- [21] QM Holzheizwerke: Planungshandbuch, Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 4, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing, 2. Auflage 2008, ISBN 978-3-937441-94-8
- [22] QM Holzheizwerke: Standard-Schaltungen Teil I, Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 2, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing, 2. Auflage 2010, ISBN 978-3-937441-92-1
- [23] QM Holzheizwerke: Leitfaden QMmini – Version Schweiz, Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke, 1. Auflage Stand Januar 2012
- [24] Nussbaumer, T.: Verbrennung. In: Kaltschmitt, M., Hartmann, H. (Hrsg.), Energie aus Biomasse, Springer, Berlin 2001, ISBN 3-540-64853-42001, 287–426
- [25] Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985, Stand am 1. August 2016, Artikel 814.318.142.1, www.admin.ch
- [26] Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) vom 4. Dezember 2015, gültig ab 1.1.16, Stand am 19. Juli 2016, Artikel 814.600, www.admin.ch
- [27] Nussbaumer, T.: Entwicklungstrends der Holzenergie und ihre Rolle in der Energiestrategie 2050. Schweiz Z Forstwesen 164 (2013) 12, 389–397
- [28] QM Holzheizwerke: FAQ 36: Neue Klassifizierung von Brennstoffen und Partikelgrößen basierend auf der EN ISO 17225-1:2014 und der EN ISO 17225-4:2013. www.qmholzheizwerke.ch, Februar 2016
- [29] AWEL: Heizen und kühlen mit Abwasser, AWEL-Standard vom 12.6.212 (Rev. Juli 2014).
- [30] Kobel, B.: Abwasser-Wärmerückgewinnung für Nahwärmenetze. 11. Fernwärme-Tagung, VFS, 26.1.2012, Biel
- [31] EnergieSchweiz: Heizen und Kühlen mit Abwasser. Artikel 805.208.D, Bern 2016, www.energieschweiz.ch

- [32] EnergieSchweiz: Sonnenwärme – Kosten und Kennzahlen. EnergiInnovation Nr. 33, Bern 2016, www.energieschweiz.ch
- [33] Huber, A.: Benutzerhandbuch zum Programm EWS Version 5.0 – Berechnung von Erdwärmesonden. Huber Energietechnik, Zürich 2016
- [34] Sterner, M.; Stadler, I.: Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg 2014, ISBN 978-3-642-37379-4
- [35] Hauer, A.; Hiebler, S.; Reuss, M.: Wärmespeicher, Fraunhofer IRB Verlag, 5. vollständig überarbeitete Auflage, Stuttgart 2013, ISBN 978-3-8167-8366-4
- [36] Mangold, D.; et al: Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung, Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0329607N, Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, Stuttgart 2012
- [37] Schmidt, T.: Grosse saisonale Wärmespeicher, 11. Fernwärme Forum – Wärme- und Kälteversorgung in der Energiestrategie Schweiz, Verband Fernwärme Schweiz, Biel 2012
- [38] BWK: Leuchtturmprojekt in Dänemark –Saisonaler Erdsonden-Wärmespeicher, BWK Band 64, Seite 17-18, 2012
- [39] Hoffstede, U.; et al: FLEXHKW – Flexibilisierung des Betriebes von Heizkraftwerken, Fraunhofer-Institut Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Kassel 2016
- [40] Winter, W.; et al: Untersuchungen der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen, Euroheat & Power, 09/2001 und 10/2001
- [41] Winter, W.; et al: Hydraulische Rohrrauhigkeit von Stahlmediumrohren für Fernwärmenetze, Euroheat & Power, Volume 29, 05/2000, Seite 24-33
- [42] Thorsen, J. E.: Minergie schliesst Fernwärme nicht aus – Fernwärme in der künftigen Niedrigenergie Gesellschaft, 13. Fernwärme Forum, Kongresshaus Biel 29. Januar 2014, Verband Fernwärme Schweiz, Niederrohrdorf 2014
- [43] Dötsch C.; Taschenberger J.; Schönberg I.: Leitfaden Nahwärme, Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT-Schriftenreihe Band 6, Fraunhofer IRB Verlag Germany 1998, ISBN 381675186
- [44] Glück, B.: Heizwasser Netze für Wohn- und Industriegebiete, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1. Auflage 1985, ISBN 3-8022-0095-0
- [45] Glück, B.: Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung – Druckverluste, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1. Auflage 1988, ISBN 3-345-00222-1
- [46] Böswirth, L.: Technische Strömungslehre, 7. Auflage, Vieweg, Wiesbaden 2007, ISBN 978-3-8348-0272-9
- [47] Idelchik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, Beggel House, Danbury, 4. Auflage 2007, ISBN 978-1-56700-251-5
- [48] VDI-Wärmeatlas, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006, Zehnte bearbeitete und erweiterte Auflage
- [49] Wagner, W.: Rohrleitungstechnik, Vogel Buchverlag, Würzburg, 11. Auflage 2012, ISBN 978-3-8343-3283-7
- [50] Wagner, W.: Festigkeitsberechnungen im Apparat- und Rohrleitungsbau, Vogel Buchverlag, Würzburg, 8. Auflage 2012, ISBN 978-3-8343-3272-1
- [51] Oberhammer, A.: Die längste Fernwärmeleitung Österreichs – Bericht über die Planung, den Bau und die Qualitätssicherung, 5. FGW Fernwärmeforum, Congress Center Villach 17.-18.03.2010, Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen 2010
- [52] C.A.R.M.E.N. e.V. (Hrsg.): So klappt's mit dem Wärmeliefervertrag – Was bei der Vertragsgestaltung zu beachten ist, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing, Download von www.carmen-ev.de am 28.10.2015
- [53] C.A.R.M.E.N. e.V. (Hrsg.): Preisanpassungsklauseln und Preisindizes, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing 2013
- [54] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V.: Leitfaden zur Kalkulation und Änderung von Fernwärmepreisen, AGFW e.V., Frankfurt am Main 2013, ISBN 3-89999-028-5
- [55] Holzenergie Schweiz: Mustervertrag Wärmelieferung – Automatische Holzfeuerungen, Holzenergie Schweiz, Zürich 2002
- [56] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V.: Hausanschlüsse an Fernwärmenetze, AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Frankfurt am Main 2004, ISBN 3-89999-002-1
- [57] isoplus Fernwärmetechnik GmbH: Planungshandbuch, Rosenheim, 6. Auflage 2011
- [58] Bundesgerichtshof BGH VIII ZR 229/88: Begriff der Fernwärme, Urteil vom 25.10.1989, NJW Heft 18/1990, Seite 1181
- [59] Winkens, H.P.: Heizkraftwirtschaft und Fernwärmeversorgung, Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H – VWEW, Frankfurt am Main 1998
- [60] Leemann, R.: Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse von Energiesystemen, Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1992
- [61] Müller, A.; Walter, F.: RAVEL zahlt sich aus: Praktischer Leitfaden für Wirtschaftlichkeitsberechnungen, Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1994
- [62] Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI in der Fassung vom 10.07.2013, in Kraft getreten am 17.07.2013
- [63] Wirtschaftskammer Österreich, Fachverband Technische Büros – Ingenieurbüros: Unverbindliche Kalkulationsempfehlung für Ingenieurleistungen

- gen – Leistungsbild Maschinenbau, Fachverband Technische Büros – Ingenieurbüros, Wien 2007
- [64] 941.210: Messmittelverordnung (MessMV), vom 15. Februar 2006 (Stand am 1. Oktober 2015)
- [65] 941.231: Verordnung des EJPD über Messmittel für thermische Energie, vom 19. März 2006 (Stand am 1. Januar 2013)
- [66] 819.121: Verordnung über die Sicherheit von Druckgeräten (Druckgeräteverordnung), vom 20. November 2002 (Stand am 1. Juli 2015)
- [67] 817.022.102: Verordnung des EDI über Trink-, Quell- und Mineralwasser, vom 23. November 2005 (Stand am 1. Januar 2014)
- [68] Druckgeräte Richtlinie (DGRL) 97/23/EG – Leitlinien, Download von <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/5202/attachments/1/translations/de/renditions/native>, am 10. Februar 2016
- [69] von Euw, R.; et al: Gebäudetechnik – Systeme integral planen; Fachhochschule Nordwestschweiz – Institut Energie am Bau, Windisch, Oktober 2012, ISBN 978-3-905711-18-9
- [70] Betschart, W.: Hydraulik in der Gebäudetechnik – Wärme und Kälte effizient übertragen, Faktor Verlag, Zürich, 1. Auflage 2013, ISBN 978-3-905711-23-3
- [71] Konferenz Kantonalen Energiedirektoren EnDK: Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich MuKE, Ausgabe 2014, Bern, Januar 2015
- [72] Verordnung (EG) Nr. 641/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von externen Nassläufer-Umwälzpumpen und in Produkte integrierten Nassläufer-Umwälzpumpen
- [73] Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren
- [74] Topmotors-Merkblätter: Merkblatt 23 – Pumpen, www.topmotors.ch, November 2012
- [75] EnV: Energieverordnung EnV vom 7. Dezember 1998 (730.01), Stand am 1. Juni 2015, Bern
- [76] KEV: Richtlinie kostendeckende Einspeisevergütung (KEV), Artikel 7a EnG, Biomasse Anhang 1.5 EnV, Stand am 1. Juni 2015, Bern
- [77] Bauarbeitenverordnung BauAV: Verordnung über die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer bei Bauarbeiten (832.311.141), vom 29. Juni 2005, Stand am 1. November 2011, Bern
- 19.2 Normen- und Richtlinien**
- [78] CRB: Normpositionen-Katalog NPK, Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung CRB, Zürich
- [79] SIA-Ordnung 103:2014: Ordnung für Leistungen und Honorare der Bauingenieurinnen und Bauingenieure, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2014.
- [80] SIA-Ordnung 108:2014: Ordnung für Leistungen und Honorare der Ingenieurinnen und Ingenieure der Bereiche Gebäudetechnik, Maschinenbau und Elektrotechnik, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich 2014
- [81] SIA-Ordnung 380-1:2009: Thermische Energie im Hochbau, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2009
- [82] SIA-Ordnung 384.201:2003: Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2003
- [83] SIA-Ordnung 385/1:2011: Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich 2011
- [84] SIA-Ordnung 385/2:2015: Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Warmwasserbedarf, Gesamtanforderungen und Auslegung, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich 2015
- [85] SIA-Ordnung 410: Kennzeichnung von Installationen in Gebäuden – Sinnbilder für die Haustechnik, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich 1986
- [86] SUVA: Bauarbeitenverordnung – Skizzen und Erläuterungen, SUVA, Luzern Oktober 2012
- [87] SUVA: Checkliste Gräben und Baugruben, SUVA, Luzern Juni 2013
- [88] SVGW-Richtlinie W3/E1: Rückflussverhinderung in Sanitäranlagen, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, Zürich 2013
- [89] SVGW-Merkblatt W10002d: Legionellen in Trinkwasserinstallationen – Was muss beachtet werden?, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, Zürich
- [90] DVGW-Merkblatt W 332 – Auswahl, Einbau und Betrieb von metallischen Absperrarmaturen in Wasserverteilungsanlagen, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches DVGW, Bonn, November 2008
- [91] SWKI-Richtlinie BT102-01: Wasserbeschaffenheit für Gebäudetechnik-Anlagen, Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren, Schönbühl, 2. Auflage 2012-08
- [92] SN 640535C:2004-12: Grabarbeiten – Ausführungsvorschriften
- [93] SN EN 13480:2013-02: Metallische industrielle Rohrleitungen
- [94] SN EN 13941:2010-10: Auslegung und Installation von werkmässig gedämmten Verbundmantelrohren für die Fernwärme
- [95] SN EN ISO 9001:2015: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen
- [96] SN EN 253+A2:2016: Fernwärmerohre – Werkmässig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze – Verbundrohrsystem, bestehend aus Stahl-Mediumrohr,

- Polyurethan-Wärmedämmung und Aussenmantel aus Polyethylen
- [97] SN EN 14597:2012 – SIA 386.050: Temperaturregeleinrichtungen und Temperaturbegrenzer für wärmeerzeugende Anlagen
- [98] SN EN 12828+A1:2014 – SIA 384.101+A1: Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Warmwasser-Heizungsanlagen
- [99] SN EN 1333:2006-05: Flansche und ihre Verbindungen – Rohrleitungsteile – Definition und Auswahl von PN
- [100] AGFW FW 401 Teil 1-18 – Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2007
- [101] AGFW FW 410 – Stahl-Mantelrohre (SMR) für Fernwärmeleitungen, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2011
- [102] AGFW FW 411 – Fernwärmeleitungen in Gebäuden und Bauwerken mit Mediumrohren aus Stahl, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2007
- [103] AGFW FW 433 – Mindestanforderungen für die sicherheitstechnische Ausführung neu zu erstellender Fernwärmeschächte, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2013
- [104] AGFW FW 442 – Druckhaltung in Heizwasser-Fernwärmenetzen, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2011
- [105] AGFW FW 515 – Technische Anschlussbedingungen – Heizwasser (TAB-HW), Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2015
- [106] AGFW FW 601 – Unternehmen zur Errichtung, Instandsetzung und Einbindung von Rohrleitungen für Fernwärmesysteme – Anforderungen und Prüfungen, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2016
- [107] DIN 18195:2015-06: Abdichtung von Bauwerken Teil 1-10
- [108] DIN EN 12953-1:2012-05: Grosswasserraumkessel – Teil 1: Allgemeines
- [109] DIN 4124:2012-1: Baugruben und Gräben – Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten
- [110] DIN 16271:2004-07: Absperrventile PN 250 und PN 400 mit Prüfanschluss für Druckmessgeräte
- [111] DIN 43772:2000-03: Leittechnik - Metall-Schutzrohre und Halsrohre für Maschinen-Glasthermometer, Zeigerthermometer, Thermoelemente und Widerstandsthermometer - Masse, Werkstoffe, Prüfung
- [112] DIN 18012:2008-05: Haus-Anschlusseinrichtungen – Allgemeine Planungsgrundlagen
- [113] DIN EN 60034-30-1:2014-12: Drehende elektrische Maschinen – Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code) (IES 60034-30-1:2014 Deutsche Fassung)
- [114] DIN EN 12266-1:2012-06: Industriearmaturen – Prüfung von Armaturen aus Metall – Teil 1: Druckprüfungen und Annahmekriterien – Verbindliche Anforderungen
- [115] DIN 4747-1:2003-11: Fernwärmanlagen – Teil 1: Sicherheitstechnische Ausrüstung von Unterstationen, Hausstationen und Hausanlagen zum Anschluss an Heizwasser-Fernwärmenetze
- [116] VDI 2036:2009-11: Gebäudetechnische Anlagen mit Fernwärme
- [117] VDI 2067 Blatt 1:2012-09: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung
- [118] VDI 3733:1996-07: Geräusche bei Rohrleitungen
- [119] AD 2000 Regelwerk, Beuth-Verlag, Berlin
- [120] Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL), Merkblatt-Nr. 67 – Planung von Biomasseheizwerken und Nahwärmenetzen, Wien, 3. Auflage 2016
- [121] AVBFernwärmeV: Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme, Berlin 2010



**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur



fernwärme
Die Komfort-Energie

