

# **Möglichkeiten der technologischen und wirtschaftlichen Optimierung von Biomasse-Nahwärme- und Mikronetzen**

**Univ.-Doz.Dipl.-Ing.Dr. Ingwald Obernberger**

Institut für Verfahrenstechnik, Technische Universität Graz  
8010 GRAZ, Inffeldgasse 25, AUSTRIA

Ingenieurbüro BIOS  
8010 GRAZ, Sandgasse 47, AUSTRIA

## **Zusammenfassung**

Einen wesentlichen Punkt im Zuge der energetischen Optimierung von Biomasse-Nahwärme- bzw. Mikronetzen stellt die richtige Netzauslegung und Netzregelung dar. Die größten Wärmeverluste der derzeit in Österreich in Betrieb befindlichen Biomasse-Nahwärmanlagen treten während des Wärmetransportes im Leitungsnetz auf und sind mit rund 28% der aus dem Heizwerk ausgelieferten Wärmeenergie beträchtlich.

Gründe für die falsche Auslegung der Nahwärmenetze sind häufig nicht oder nur mangelhaft durchgeführte Wärmebedarfserhebungen im zukünftigen Versorgungsgebiet sowie die Verwendung falscher Kenngrößen für die Netzberechnung. Laufende und in den letzten Jahren durchgeführte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie genaue Auswertungen von Betriebsdaten bereits bestehender Nahwärmenetze haben auf diesem Gebiet, insbesondere was die EDV-gestützte Berechnung und Simulation von Nahwärmenetzen betrifft, zu neuen Erkenntnissen geführt, auf die in dieser Arbeit näher eingegangen werden soll.

Große Wärmeverluste im Nahwärmenetz werden in den meisten Fällen durch überdimensionierte Rohre verursacht. Um derartige Fehldimensionierungen zu vermeiden, ist es notwendig genaue Berechnungen zur Ermittlung des Wärmebedarfs der Abnehmer durchzuführen, die Dimensionierung des Rohrleitungsnetzes unter der Prämisse einer Minimierung der Gesamtkosten (Investitionskosten + Wärmeverlustkosten + Pumpkosten) vorzunehmen und ein gut funktionierendes Netzregelungssystem zu installieren. Wichtige Faktoren in diesem Zusammenhang sind:

- Die Verwendung praxisgerechter Rohrreibungsbeiwerte zur Berechnung der Druckverluste in den Leitungen.
- Die richtige Wahl der Gleichzeitigkeitsfaktoren für die einzelnen Netztrassen in Abhängigkeit von Art und Anzahl der Wärmeabnehmer.
- Die Kenntnis der tatsächlich in Fernwärmerohren auftretenden Geräuschgrenzen und deren Einflußfaktoren, um die maximal in Rohrleitungen zulässigen Geschwindigkeiten ermitteln zu können.
- Möglichst tiefe Netzurücklauftemperaturen (dabei kommt der richtigen Dimensionierung und Regelung der Hausübergabestationen bei den Abnehmern große Bedeutung zu).
- Die Kenntnis der Auswirkungen innovativer Additive zu Wärmeträgermedien (Tensiden) auf Druck- und Wärmeverluste im Rohrleitungsnetz sowie die Kenntnis des Wärmeverlustsenkungspotentials durch Verwendung innovativer Rohrleitungstypen (Fernwärme-Doppelrohr).

- Eine EDV-gestützte Netzregelung, die die Vorlauftemperatur und den von der Netzpumpe zu überwindenden Differenzdruck in Abhängigkeit von der Außentemperatur und dem tageszeitlich bedingten Wärmeabnahmeverhalten der Kunden minimiert.

Detaillierte Kostenkalkulationen haben ergeben, daß durch eine optimierte Netzauslegung und Netzregelung zwischen 2 und 9% der Betriebskosten und zwischen 5 und 10% der Investitionskosten im Vergleich zu konventionellen Systemen eingespart werden können. Diesen Daten kommt um so mehr Bedeutung zu, wenn man bedenkt, daß auf das Rohrleitungsnetz normalerweise rund 50% der gesamten Investitionskosten einer Biomasse-Nahwärmanlage entfallen.

## **Einleitung und Überblick**

Einen wesentlichen Punkt im Zuge der energetischen Optimierung von Biomassefernheizwerken stellt die richtige Netzauslegung und Netzregelung dar. Die größten Wärmeverluste der derzeit in Österreich in Betrieb befindlichen Biomasseheizwerke treten während des Wärmetransportes im Leitungsnetz auf. Weiters liegt der Investitionskostenanteil der Nahwärme- bzw. Mikronetze im Durchschnitt bei fast 50% der Gesamtinvestitionskosten der Anlage, was die Bedeutung dieser Thematik noch unterstreicht [26].

Gründe für die falsche Auslegung der Nahwärme- bzw. Mikronetze sind häufig nicht oder nur mangelhaft durchgeführte Wärmebedarfserhebungen im zukünftigen Versorgungsgebiet sowie die Verwendung falscher Kenngrößen für die Netzberechnung. Laufende und in den letzten Jahren durchgeführte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie genaue Auswertungen von Betriebsdaten bereits bestehender Nahwärmenetze [1, 12, 19] haben auf diesem Gebiet, insbesondere was die EDV-gestützte Berechnung und Simulation von Nahwärme- bzw. Mikronetzen betrifft, zu neuen Erkenntnissen geführt, auf die in dieser Arbeit näher eingegangen werden soll.

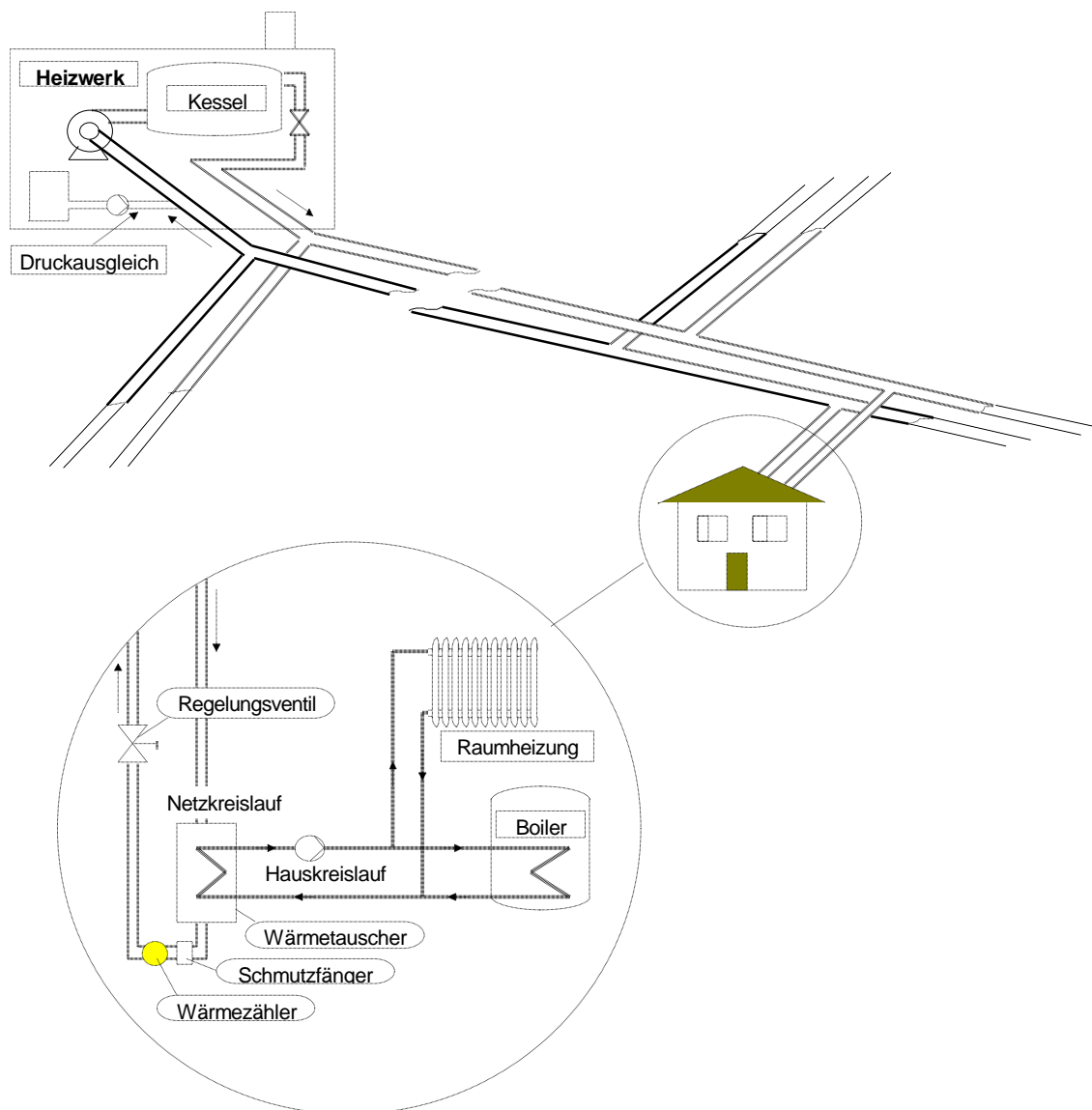
Eine korrekte Rohrdimensionierung verringert die Investitionskosten und stellt für eine Minimierung der Betriebskosten (Wärmeverlust- und Pumpkosten) eine wesentliche Grundlage dar. Die zweite notwendige Basis zur Senkung der Betriebskosten ist eine effiziente Netzregelung. Anhand bereits durchgeführter EDV-gestützter Netzberechnungen im Zuge der Dimensionierung zweier, neu zu errichtender, Nahwärmenetze soll weiters gezeigt werden, wie gut derartige Programme für eine optimale Netzauslegung in der Praxis einsetzbar sind und welche Parameter und Berechnungen sie beinhalten müssen.

Die zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zielen auf die Feststellung wesentlicher, noch nicht hinreichend genau bekannter Kenngrößen ab, die großen Einfluß auf die korrekte Rohrdimensionierung haben (Rohrrauigkeit, Geräuschgrenzen) sowie auf die Prüfung der Wirkung innovativer Wärmeträgeradditive (Tenside) und neuer Rohrtypen (Doppelrohrsysteme) auf den Wärmetransport [5]. Die Ergebnisse aus diesen Forschungsarbeiten und begleitenden Vergleichsmessungen in bestehenden Systemen sollen dann die Basis für die Entwicklung und Anwendung einer EDV-gestützten dynamischen Netzauslegung und Netzregelung bilden (Weiterentwicklung der bereits verfügbaren Berechnungsroutinen), mit deren Hilfe das gesamte Rohrleitungsnetz eines Biomassefernheizwerkes vorausberechnet und hinsichtlich der Gesamtkosten (Summe aus Investitions- und Betriebskosten) optimiert werden kann.

## Allgemeine Grundlagen für die richtige Dimensionierung von Nahwärme- bzw. Mikronetzen

Die wesentlichen Komponenten eines Nahwärme- bzw. Mikronetzes sind die hydraulische Schaltung (hydraulische Ausgleichsstation, Druckhalteanlage, Netzpumpen und Kesselwasserkreislaufsystem) und Regelung im Heizwerk, die Wärmeübergabestationen bei den Abnehmern und das Nahwärme- bzw. Mikronetz selbst (siehe Abbildung 1).

**Abbildung 1:** Schematische Darstellung der Komponenten eines Nahwärmenetzes



Der Netzwasserkreislauf wird dabei als primärseitiger Heizkreislauf, der Heizwasserkreislauf der Abnehmer als sekundärseitiger Heizkreislauf bezeichnet. Primär- und Sekundärseite werden normalerweise hydraulisch getrennt ausgeführt, der Wärmeaustausch erfolgt über die bei jedem Kunden installierte Übergabestation. Drei wesentliche Gründe für die Trennung dieser Kreisläufe sind die hohen im Primärkreislauf möglichen Drücke, die Tatsache, daß im Primärkreislauf im Gegensatz zur Sekundärseite mit vollentsalztem und aufbereitetem Wasser gearbeitet wird und daß durch die Kreislauftrennung das Nahwärmenetz unempfindlich gegenüber sekundärseitigen Leckagen, Reparaturen und Umbauten ist [9, 14, 21, 24]. Im Falle von Mikronetzen kann aber auch ohne hydraulischer Trennung gearbeitet werden, da niedrigere

Drücke auftreten. Die Vorteile der Direktanbindung der Wärmekunden an das Netz sind geringere Investitionskosten sowie niedrigere Rücklauftemperaturen (durch Einsparung der Wärmeübergabestationen).

Die Basis für eine korrekte Netzauslegung (und eine korrekte Dimensionierung der Feuerungsanlage) ist eine richtig und sorgfältig durchgeführte Wärmebedarfserhebung im zukünftigen Wärmeversorgungsgebiet. Dabei geht es insbesondere um die korrekte Erfassung des jährlichen Nutzwärmeverbrauches (für Raumwärme bzw. Prozeßwärme und Warmwasser) der Abnehmer, um die Berechnung der maximal benötigten Wärmeleistung, um die Erhebung der benötigten Vorlauf- und zu erwartenden Rücklauftemperaturen für jeden Abnehmer und um die Erhebung der bestehenden sekundärseitigen hydraulischen Schaltung. Handelt es sich um einen Prozeßwärmeabnehmer, so ist zusätzlich die Aufnahme einer Wärmebedarfskurve über das Jahr erforderlich, um feststellen zu können, wann wieviel Wärme benötigt wird. Für konventionelle Wärme- und Warmwasserverbraucher (Einfamilienhäuser, Wohnblocks, Gasthäuser, Hotels, Schulen) kann bezüglich dieser Kurven von bereits vorliegenden Erfahrungswerten ausgegangen werden [14, 21, 22].

**Abbildung 2:** Wärmeproduktion eines ganzjährig betriebenen und gut ausgelasteten österreichischen Biomassefernheizwerkes in Abhängigkeit der Außentemperatur über ein Jahr

Erläuterungen: Das in der Grafik eingezeichnete Konfidenzintervall beinhaltet 90% aller Meßdaten; zur Auswertung wurden die Betriebsdaten der Heizperiode 1994 herangezogen; Kesselnennleistung des Biomasseheizwerkes: 7 MW<sub>th</sub>; Regressionsfunktion:  $y = a \cdot \exp(-x/b)$ ,  $a = 3352,3$ ,  $b = 19,36$  ( $r^2 = 0,68$ ).

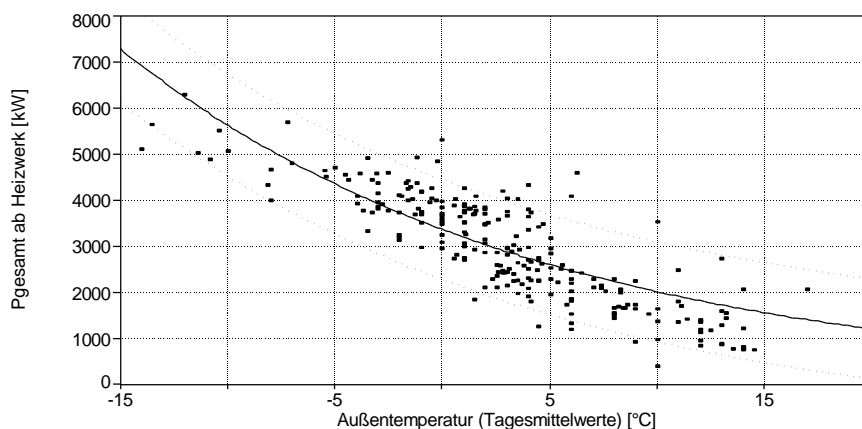
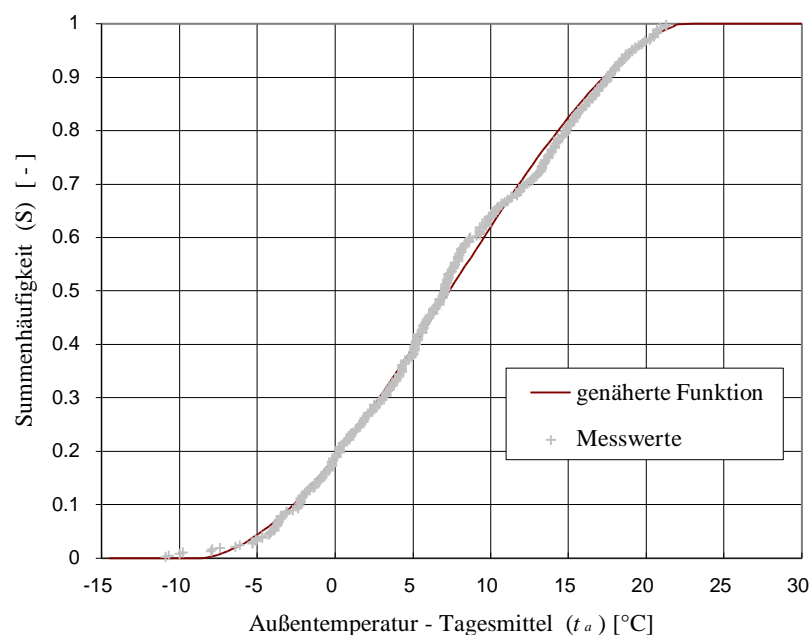


Abbildung 2 stellt beispielhaft die Wärmeproduktion eines österreichischen Biomassefernheizwerkes in Abhängigkeit von der Außentemperatur dar. Mit Hilfe solcher Wärmebedarfskennlinien, der Häufigkeitsverteilung der Außentemperaturen (siehe Abbildung 3) für den jeweiligen Ort und dem erhobenen Gesamtjahreswärmebedarf der Abnehmer kann eine Nutzwärmeverbrauchskurve in Abhängigkeit von der Außentemperatur für jeden Kunden erstellt werden. Die Aufsummierung dieser Kurven ergibt den Gesamtnutzwärmeverbrauch des Versorgungsgebietes in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Unter Berücksichtigung der zukünftigen Ausbaupläne und der auftretenden Netzverluste, die sich aus der Netzberechnung ergeben, kann somit auf die jeweils zu erzeugende Wärmemenge ab Heizwerk geschlossen werden. Diese kann in Abhängigkeit von der Außentemperatur (siehe Abbildung 4) bzw. in Abhängigkeit der zu erwartenden Kesselleistung über eine bestimmte Jahresbetriebsstundenanzahl, als sogenannte Jahresganglinie bzw. Heizlastkurve (siehe Abbildung 5), dargestellt werden. Die Heizlastkurve ist für die Berechnung und Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des Nahwärme-

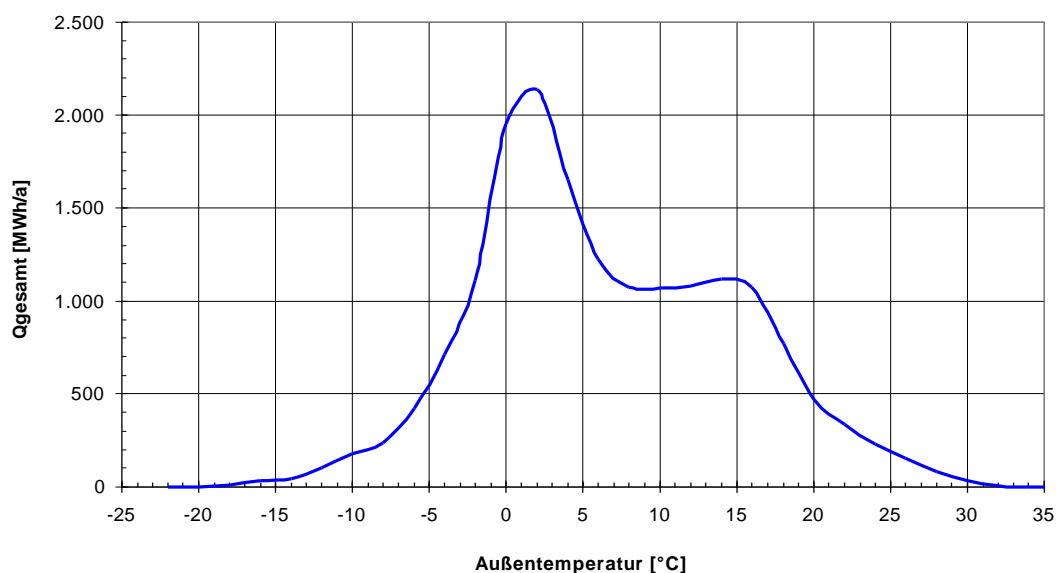
bzw. Mikronetzes (Betrachtung verschiedener Ausbauvarianten), für die Kesselauslegung sowie für die Festlegung der Betriebsführung von großer Bedeutung [2, 3, 9, 13].

**Abbildung 3:** Die Summenhäufigkeit der Außentemperaturverteilung über ein Jahr am Beispiel St. Michael im Lungau



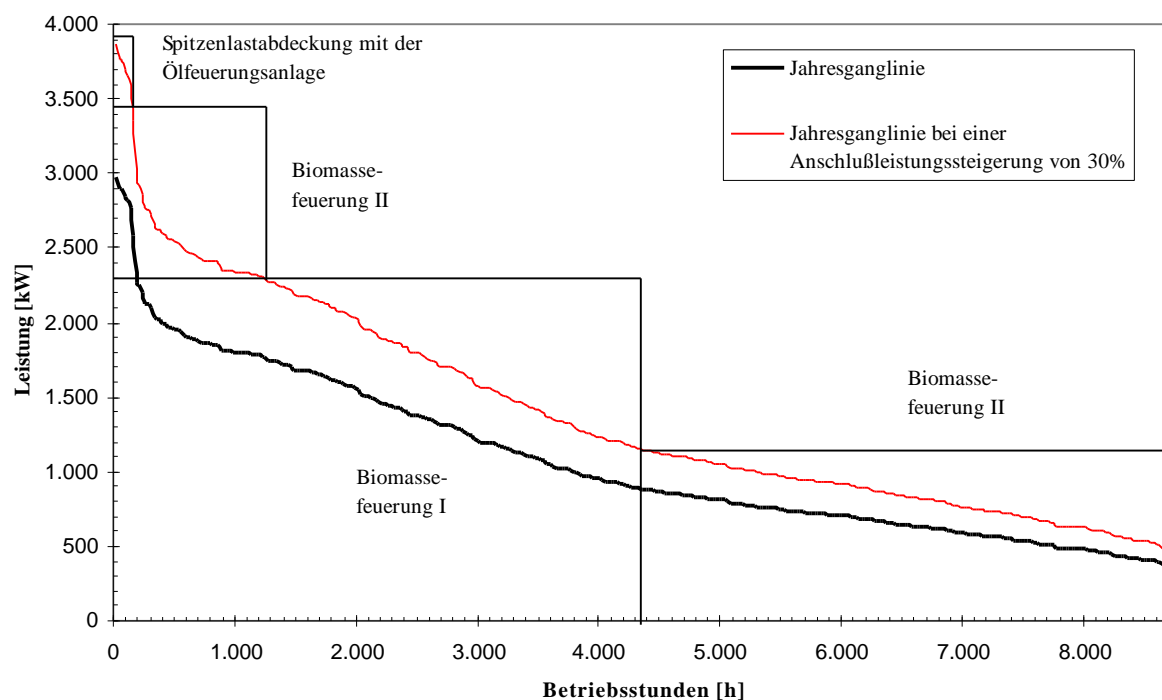
**Abbildung 4:** Berechneter Wärmebedarf eines Nahwärmeversorgungsgebietes in Abhängigkeit der Außentemperatur

Erläuterungen: Berechnung für die Fertigstellung der 2. Netzausbaustufe; bereitzustellende Wärmemenge ab Heizwerk: 15.320 MWh / a; kalkulierte maximale Wärmeleistung ab Heizwerk: 7,2 MW.



**Abbildung 5:** Typische Jahresganglinie (Heizlastkurve) eines ganzjährig betriebenen und gut ausgelasteten österreichischen Biomassefernheizwerkes für den momentan benötigten Wärmebedarf und im Falle einer Kapazitätssteigerung von 30%

Erläuterungen: Kesselnennleistung Biomassefeuerung I 2.000 kW<sub>th</sub>, Kesselnennleistung Biomassefeuerung II 1.000 kW<sub>th</sub>; den beiden Biomassefeuerungen ist eine Rauchgaskondensationsanlage nachgeschaltet, die zu einer rund 15%-igen Wirkungsgradsteigerung der Feuerungen beiträgt, welche ebenfalls in der Abbildung berücksichtigt ist; Vollaststunden pro Jahr: rund 2.800 (momentaner Wärmebedarf); die Spitzenlastabdeckung erfolgt durch eine Ölfeuerung.



Für die Netzauslegung muß von der maximal bereitzustellenden Wärmemenge ab Heizwerk ausgegangen werden. Diese kann mit Hilfe der erhobenen maximalen Anschlußnennleistungen der Verbraucher (am kältesten Tag des Jahres) und unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren für die einzelnen Trassenabschnitte sowie unter Berücksichtigung der auftretenden Netzverluste bei maximaler Wärmeabnahme berechnet werden. Diese Daten stellen die Grundlage für die Dimensionierung eines Nahwärme- bzw. Mikronetzes wie auch der Feuerungsanlage dar [12, 17, 21, 25].

Der Gleichzeitigkeitsfaktor ist dabei als Quotient der tatsächlich durchschnittlich pro Trasse abgenommene Wärmemenge im maximalen Lastfall zur Gesamtwärmeanschlußleistung dieser Trasse definiert. Er gibt an wieviele Abnehmer durchschnittlich zur gleichen Zeit Wärme benötigen. Der Gleichzeitigkeitsfaktor ist somit ein Erfahrungswert, der von der Anzahl und der Art der Wärmeabnehmer abhängt und für das gesamte Nahwärme- bzw. Mikronetz zwischen 0,5 und 1,0 liegt. Im Zuge der EDV-gestützten Netzberechnung wird er in Form von empirisch ermittelten Funktionen, die aus ausgewerteten Betriebsdaten von Nahwärmenetzen abgeleitet wurden, berücksichtigt (siehe Abbildung 6). Die korrekte Netzdimensionierung hängt wesentlich vom richtigen Ansetzen der Gleichzeitigkeitsfaktoren ab, da dadurch die erforderliche zu transportierende Wärmemenge pro Trasse und somit die Rohrdimensionierung stark beeinflusst wird (siehe Gleichung 1).

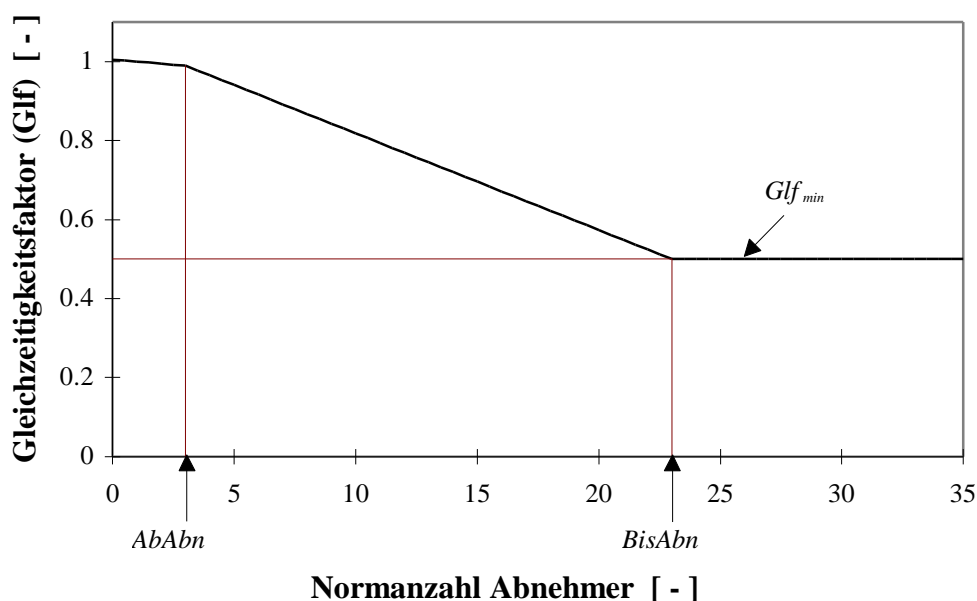
$$P_{\text{Qerf-maximaler Fall}} = \text{GlF}_{\text{Trasse}} \cdot \sum_{\text{Abnehmer pro Trasse}} P_{\text{Qenn}} [\text{kW}] \quad \text{Gleichung 1}$$

- $P_{\text{Qerf}}$ ..... tatsächlich erforderliche Wärmeleistung pro Trasse im maximalen Lastfall  
 $\text{GlF}_{\text{Trasse}}$ .... Gleichzeitigkeitsfaktor der Trasse [-]  
 $P_{\text{Qnenn}}$  ..... Nennwärmeanschlußleistung der Abnehmer einer bestimmten Trasse [kW]

**Abbildung 6:** Typischer Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors in Abhängigkeit der Anzahl ähnlich großer Wärmeabnehmer

Erläuterungen: Datenquellen [19, 20, 21]; die dargestellte funktionale Abhängigkeit sowie die Festlegung der Knickpunkte der Kurve basiert auf Betriebsdatenauswertungen mehrerer österreichischer Nahwärmenetze; die Kurve ist nur für ähnlich große Wärmeabnehmer gültig; falls Prozeßwärmeabnehmer oder Großabnehmer vorhanden sind, müssen entsprechende Korrekturfaktoren berücksichtigt werden.

Verwendete Abkürzungen:  $\text{GlF}_{\text{min}}$  ....minimaler Gleichzeitigkeitsfaktor;  $\text{AbAbn}$ ....ab dieser Anzahl von Abnehmern, sinkt der Gleichzeitigkeitsfaktor kontinuierlich ab;  $\text{BisAbn}$ ....ab dieser Anzahl von Abnehmern bleibt der Gleichzeitigkeitsfaktor wieder konstant.



Für die auftretenden Netzverluste pro Meter Rohrleitung in Abhängigkeit von der Außentemperatur können im Falle parallel verlegter Rohre die Gleichungen 2 und 3 angesetzt werden [6, 14, 23]. Aus diesen Formeln ist ersichtlich, daß für eine korrekte Wärmeverlustberechnung im Nahwärme- bzw. Mikronetz die Kenntnis des Verlaufes der Vor- und Rücklauftemperaturen über die Netztrasse eine wesentliche Rolle spielt. Weiters sind die Wärmeverluste einer Rohrleitung von den Rohrdurchmessern, der Dicke und Art der Isolation, den Systemtemperaturen, der Verlegetiefe und der Art der Verlegung (parallel verlegte Rohre, Doppelrohre) abhängig.

$$Q_{\text{Verlust}}(t_a) = S \cdot I_E \cdot \left( (t_{\text{VL}}(t_a) - t_{\text{EO}}(t_a)) + (t_{\text{RL}}(t_a) - t_{\text{EO}}(t_a)) \right) \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}} \right] \quad \text{Gleichung 2}$$

$$S = \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{p} \cdot a \tan \frac{a \cdot I_E}{h \cdot I_{\text{WD}}} \right) \cdot \frac{2 \cdot p}{\frac{I_E}{I_{\text{WD}}} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + \text{acosh} \frac{2 \cdot h}{d_a}} [-] \quad \text{Gleichung 3}$$

$t_a$	...Außentemperatur [K]
$t_{VL}(t_a)$	...Vorlauftemperatur [K]
$t_{RL}(t_a)$	...Rücklauftemperatur [K]
$Q_{Verlust}(t_a)$	...außentemperaturabhängige Wärmeverlustleistung pro Meter Rohrlänge
$S$	...Formkoeffizient für parallel verlegte Rohre
$I_E$	...Wärmeleitkoeffizient des Erdreichs [W/m·K]
$t_{EO}(t_a)$	...Temperatur an der Erdoberfläche [K]
$I_{WD}$	...Wärmeleitkoeffizient der Wärmedämmung [W/m·K]
$h$	... Verlegetiefe [m]
$d_i$	...Innendurchmesser der Wärmedämmung [m]
$d_a$	...Außendurchmesser der Wärmedämmung [m]
$a$	...Mittelpunktsabstand der Rohrleitungen [m]

Hinsichtlich der Feuerungs- und Kesselauslegung ist auf Basis der ermittelten Heizlastkurve festzulegen, ob ein oder mehrere Biomassekessel notwendig sind, um das gesamte Lastspektrum regelungstechnisch abdecken zu können. Weiters sollte die Spitzenlast (normalerweise 5-10% der gesamten erzeugten Wärmemenge) mit einem Öl- bzw. Gaskessel bereitgestellt werden, da dieser normalerweise sowieso in einem Biomasseheizwerk als Ausfallsreserve (zur Überbrückung von Reparatur- und Wartungsarbeiten) installiert wird und die Spitzenlastabdeckung dadurch wesentlich kostengünstiger erfolgen kann. Durch diese Maßnahme kann auch die Auslastung der Biomassefeuerung(en) verbessert werden. Weiters kann die erforderliche Kesselleistung in Abhängigkeit der Netzausbaustufen berechnet und die Installation der Biomassefeuerungen auf diese abgestimmt werden.

Was die Festlegung der Betriebsführung betrifft, so kann mit Hilfe der Heizlastkurve die wirtschaftliche Bewertung eines Ganzjahresbetriebes gegenüber einer Anlagenstilllegung über die Sommermonate bzw. einer kombinierten Biomasse-Solar-Nahwärmeversorgung geprüft werden. Weiters stellt die Heizlastkurve die Grundlage für die Vorplanung und Entscheidung bezüglich der Installation einer Kraft-Wärme-Kopplung dar.

### **Das Prinzip der optimierten Netzauslegung**

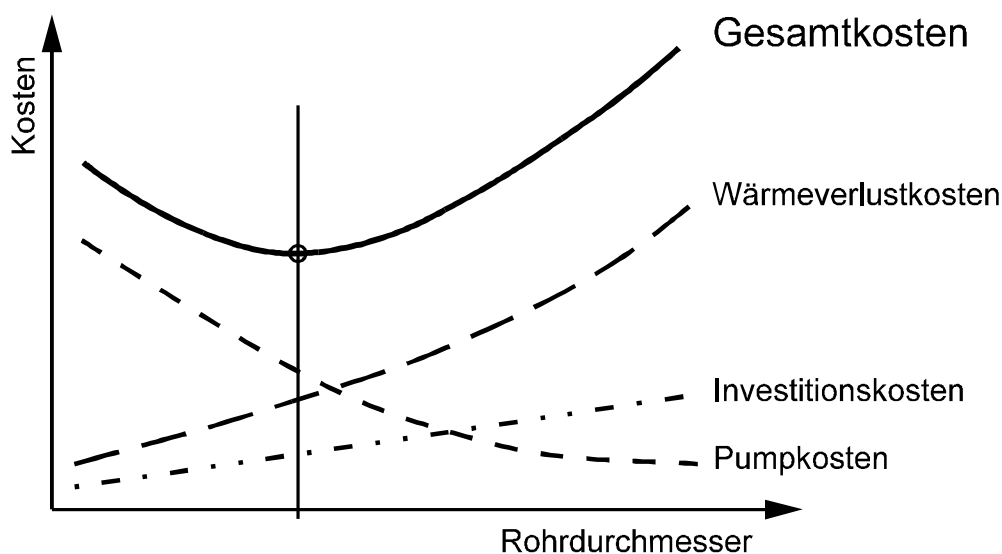
Bei der Auslegung von Nahwärme- bzw. Mikronetzen sollte die Dimensionierung der Rohrdurchmesser unter Berücksichtigung der im Netz auftretenden Druck- und Wärmeverluste und den daraus resultierenden Investitions- und Betriebskosten erfolgen. Ziel ist es in diesem Zusammenhang das Netz so zu dimensionieren, daß die jährlichen Gesamtkosten (Summe aus Investitions- und Betriebskosten - auf einen bestimmten Nutzungszeitraum bezogen) minimiert werden (siehe Abbildung 7).

Während die Investitionskosten und Wärmeverlustkosten mit größer werdendem Rohrdurchmesser ansteigen, verhalten sich die Pumpkosten genau gegenläufig. Aus diesem Grund muß der in Abbildung 7 dargestellte Gesamtkostenverlauf ein Minimum besitzen. Sämtliche Rohrleitungsabschnitte des zu dimensionierenden Nahwärme- bzw. Mikronetzes werden daher unter Einhaltung bestimmter limitierender Randbedingungen, auf die nachfolgend noch genauer eingegangen wird, solange geschrumpft bzw. erweitert, bis für jeden Netzabschnitt der optimale Durchmesser feststeht. Eine derartige Berechnung kann aufgrund ihrer Komplexität nur EDV-gestützt erfolgen.



**Abbildung 7:** Schematische Darstellung des Prinzips der optimierten Auslegung von Nahwärme- bzw. Mikronetzen

Erläuterungen: Datenquelle [12].



### Die Berechnung der Wärmeverlustkosten

Die Berechnung der Wärmeverluste pro Meter Rohrleitung wurde bereits erläutert (siehe Gleichungen 2 und 3) erläutert. Die Wärmeverlustkosten lassen sich aus der Gesamtinvestitionskostenrechnung des Biomasseheizwerkes ableiten und stellen die Wärmebereitstellungskosten (nicht den Wärmeverkaufspreis) dar. Diese setzen sich aus den Betriebskosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie den anteiligen Abschreibungen der Gesamtanlage über deren kalkulierte Nutzungsdauer zusammen und liegen normalerweise, je nach Ausführung der Anlage, zwischen 0,30 und 0,44 S pro kWh erzeugte Wärmemenge [21, 25, 26]. Somit lassen sich die jährlichen Wärmeverlustkosten nach den Gleichungen 4 und 5 berechnen.

$$K_Q = \frac{1}{1000} \cdot C_Q \cdot Q_{\text{Verlust}}(t_a) \left[ \frac{\text{S}}{\text{m} \cdot \text{h}} \right] \quad \text{Gleichung 4}$$

$$K_{Q, \text{ges}} = \frac{24}{1000} \cdot C_Q \cdot \int_{t_{a, \text{min}}}^{t_{a, \text{max}}} Q_{\text{Verlust}}(t_a) \cdot n(t_a) \cdot dt_a \left[ \frac{\text{S}}{\text{m} \cdot \text{a}} \right] \quad \text{Gleichung 5}$$

$K_{Q, \text{ges}}$  ... Wärmeverlustkosten pro Meter Rohrlänge und Jahr

$C_Q$  ... Wärmepreis  $\left[ \frac{\text{S}}{\text{kWh}} \right]$

$n(t_a)$  ... Häufigkeitsdichte der Außentemperaturverteilung über ein Jahr [1/a]

## Die Berechnung der auftretenden Druckverluste und Pumpkosten

Um die erforderlichen jährlichen Pumpkosten berechnen zu können, muß vorerst eine Berechnung der auftretenden Druckverluste im Nahwärme- bzw. Mikronetz erfolgen. Die Basis für derartige Berechnungen stellt die Kenntnis der auftretenden Druckverluste in geraden Rohrleitungen und Einbauten (Krümmer, Abzweiger, Sammler) von Nahwärmenetzen und die Kenntnis der Fließgeschwindigkeitsgrenzen zur sicheren Hintanhaltung von Geräusentwicklung dar. Genau diese Parameter sind jedoch für Rohre und Wärmeträgermedien, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen, nur unzureichend bekannt.

Die für die Berechnung der Druckverluste in Fernwärme-Rohrleitungen wesentlichsten Formeln sind in den Gleichungen 6 bis 9 angeführt. Daraus ist ersichtlich, daß für die korrekte Kalkulation der auftretenden Druckverluste die spezifische Wärmekapazität, die Zähigkeit und die Dichte des strömenden Mediums sowie die Abhängigkeit dieser Stoffdaten von der Vor- bzw. Rücklauftemperatur (die Druckabhängigkeit kann bei Flüssigkeiten vernachlässigt werden) im jeweiligen Rohrabschnitt zu berücksichtigen ist.

$$w(t_a) = \frac{4 \cdot \dot{Q}(t_a)}{\mathbf{r}_M \cdot d_i^2 \cdot \mathbf{p} \cdot c_p \cdot [t_{VL}(t_a) - t_{RL}(t_a)]} \quad \text{Gleichung 6}$$

$\dot{Q}(t_a)$  ... durch die Rohrleitung geförderte Wärmemenge pro Sekunde [kW]

$t_{VL}(t_a)$  ... Vorlauftemperatur [K]

$t_{RL}(t_a)$  ... Rücklauftemperatur [K]

$t_a$  ... Außentemperatur [K]

$d_i$  ... Rohrinne Durchmesser [m]

$\mathbf{r}_M$  ... Dichte des strömenden Mediums [kg/m<sup>3</sup>]

$c_p$  ... spez. Wärmekapazität des strömenden Mediums [kJ/kg · K]

$w(t_a)$  ... Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

$$dp(t_a) = \frac{\mathbf{r}_M}{2} \cdot \left( \frac{\mathbf{l}}{d_i} + \frac{\mathbf{x}_{ges}}{l_i} \right) \cdot w^2(t_a) \quad \left[ \frac{Pa}{m} \right] \quad \text{Gleichung 7}$$

$dp(t_a)$  ... Druckverlust eines bestimmten Trassenabschnittes [Pa/m]

$\mathbf{l}$  ... Rohrreibungsbeiwert [-]

$l_i$  ... Rohrlänge an geraden Rohre [m]

$\mathbf{x}_{ges}$  ... Summe der Einzelwiderstandsbeiwerte der Rohreinbauten [-]

$$I = A + \frac{B}{\sqrt{\text{Re}}} + C \cdot \frac{\ln(\text{Re})}{\text{Re}} + \frac{D}{\text{Re} \cdot \sqrt{\text{Re}}} \quad [-] \text{ für } \text{Re} \geq 2.300$$

mit

$$A = 0,0414114 - 0,00174691 \cdot \ln(\mathbf{e}) - \frac{0,3378228}{\ln(\mathbf{e})}$$

$$B = 12,118 + \frac{118,8186}{\ln(\mathbf{e})} + \frac{276,8167}{(\ln(\mathbf{e}))^2}$$

**Gleichung 8**

$$C = \frac{-19,906 + 93.940,3 \cdot \mathbf{e}}{1 + 8.130,958 \cdot \mathbf{e}}$$

$$D = \frac{2.851,1 - 19.910,827 \cdot \mathbf{e}}{1 + 10.116,5 \cdot \mathbf{e}}$$

$\mathbf{e}$  ...relative Rohrrauigkeit [-]

$$\text{Re} = \frac{\mathbf{r}_M \cdot d_i \cdot w(t_a)}{\mathbf{h}_M} \quad [-]$$

**Gleichung 9**

$\text{Re}$  ...Reynoldszahl [-]

$\mathbf{h}_M$  ...dynamische Zähigkeit des strömenden Mediums [ $\text{Ns}/\text{m}^2$ ]

$w(t_a)$  ...Strömungsgeschwindigkeit [ $\text{m}/\text{s}$ ]

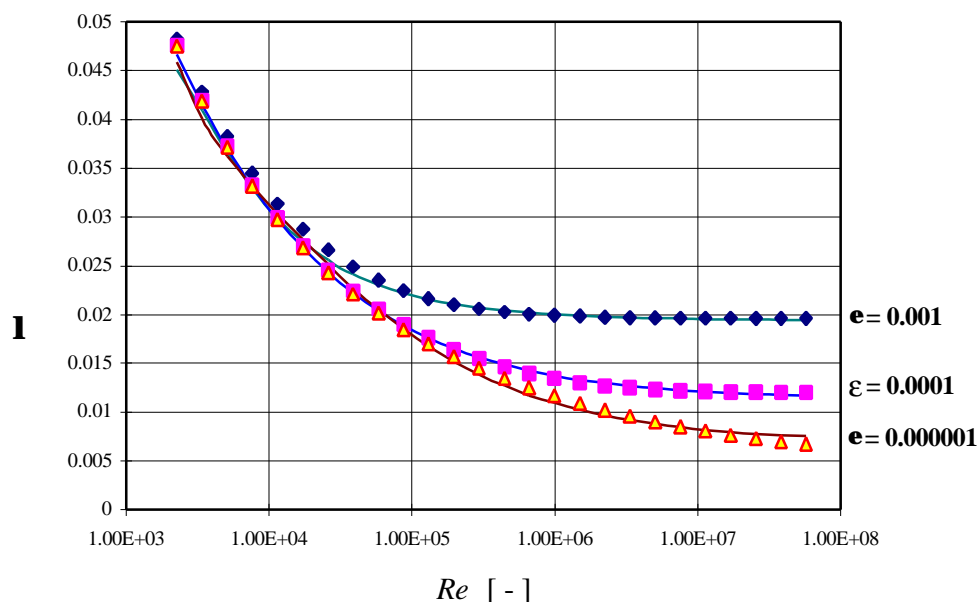
In den in der Fachliteratur vorgeschlagenen Berechnungsmethoden für den Druckverlust in geraden Rohrleitungen [14, 18], werden, wie aus durchgeführten Kontrollmessungen an bestehenden Nahwärmenetzen hervorgeht, zu hohe Werte für die relative Rohrrauigkeit angegeben. Dies liegt höchstwahrscheinlich daran, daß es heutzutage Stand der Technik ist, als Wärmeträgermedium vollentsalztes und chemisch aufbereitetes Wasser einzusetzen, das von normalem Wasser abweichende Stoffdaten besitzt und dessen Verwendung auch langfristig die Bildung von, die Rohrrauigkeit erhöhenden, Ablagerungen an den Rohroberflächen verhindert [21, 25].

Da Fernwärmeleitungen hauptsächlich aus geraden Rohrleitungen bestehen, ist es wesentlich, daß die relative Rohrrauigkeit korrekt berücksichtigt wird, da ansonsten die Druckverluste mit zu hohen Rohrreibungsbeiwerten kalkuliert werden (siehe Abbildung 8), was aufgrund der großen Rohrlängen zu beträchtlichen Berechnungsfehlern führen kann. Die genaue experimentelle Bestimmung der Rohrreibungsbeiwerte in Abhängigkeit der verwendeten Rohre und des strömenden Mediums ist somit von großer Bedeutung, da für vollentsalztes Wasser bzw. mit Additiven versetztes Wasser, wie es in Nahwärmesystemen zum Einsatz kommt, derzeit keine gesicherten Daten zur Verfügung stehen.

Für die in Nahwärme- bzw. Mikronetzen vorkommenden Einbauten (Abzweiger, Krümmer, Absperrklappen u.s.w.) können die in einschlägigen Standardwerken bzw. laut Herstellerangaben spezifizierten Widerstandsbeiwerte für die Druckverlustberechnung verwendet werden.

### Abbildung 8: Rohrreibungsbeiwert $\lambda$ in Abhängigkeit der relativen Rohrrauigkeit $\varepsilon$

Erläuterungen: Datenquellen [14, 19]; die Einzeldatenpunkte stellen die Berechnungsergebnisse laut der Formel von Prantl-Colebrook dar (gültig für  $Re > 2.300$ ), die Kurven stellen die Berechnungsergebnisse laut Gleichung 8 (Regressionsfunktion) dar.



Nach Durchführung der EDV-gestützten Netzberechnung kann auf Basis des ermittelten Gesamtdruckverlustes bei maximaler Lastabnahme die Dimensionierung und Auswahl der Netzpumpen erfolgen. Darauffolgend ist es möglich die erforderliche jährliche Pumpenleistung nach den Gleichungen 10 und 11 integrativ zu bestimmen. Die jährlichen Pumpkosten ergeben sich laut Gleichung 12, wobei in Österreich von durchschnittlichen Stromkosten für Biomasseheizwerke von 1,50 S/kWh (Preisbasis 1996) ausgegangen werden kann.

$$P_p(t_a) = \frac{\dot{V}(t_a) \cdot dp(t_a)}{h_p} \quad \left[ \frac{\text{kW}}{\text{m}} \right] \quad \text{Gleichung 10}$$

$P_p(t_a)$  ...außentemperaturabhängige Pumpenleistung pro m Rohrleitung [kW/m]

$\dot{V}(t_a)$  ...außentemperaturabhängiger Volumenstrom im Rohrabschnitt [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$h_p$  ...Pumpenwirkungsgrad [-]

$$K_p = C_{Strom} \cdot P_p(t_a) \quad \left[ \frac{\text{S}}{\text{m} \cdot \text{h}} \right] \quad \text{Gleichung 11}$$

$$K_{p,ges} = 24 \cdot C_{Strom} \cdot \int_{t_{a,min}}^{t_{a,max}} P(t_a) \cdot n(t_a) \cdot dt_a \quad \left[ \frac{\text{S}}{\text{m} \cdot \text{a}} \right] \quad \text{Gleichung 12}$$

$K_{p,ges}$  ...Pumpkosten pro Jahr und Meter

$C_{Strom}$  ...Strompreis [ $\text{S}/\text{kWh}$ ]

$t_{a,max}$  ... maximale Außentemperatur [K]

$t_{a,min}$  ...minimale Außentemperatur [K]

$n(t_a)$  ...Häufigkeitsdichte der Außentemperaturverteilung über ein Jahr [ $1/\text{a}$ ]

Durch die derzeit häufig stattfindende falsche Druckverlustberechnung kommt es zu einer Überdimensionierung der Fernwärmerohre, die die Investitionskosten erhöht. Weiters bedeuten größere Rohrdurchmesser auch höhere Wärmeverluste in den Leitungen, bedingt durch größere Oberflächen und längere Verweilzeiten des Mediums pro Netzumlauf. Auch die Netzpumpen sind bei einer fehlerhaften Druckverlustberechnung falsch ausgelegt und arbeiten durch die Überdimensionierung im Teillastbereich mit schlechtem Wirkungsgrad. Teilweise sind sie sogar Kavitationsgefahr ausgesetzt, da geringere Druckverluste auftreten, als laut Auslegung berechnet, und somit höhere Wassermengen gefördert werden. Dadurch steigen auch die Betriebskosten deutlich an.

## Die Gesamtkosten des Nahwärme- bzw. Mikronetzes als Zielfunktion für eine optimierte Netzauslegung

Um die Gesamtinvestitionskosten des Nahwärme- bzw. Mikronetzes pro Jahr Nutzungsdauer bestimmen zu können, müssen noch die jährliche kalkulatorische Abschreibung und die kalkulatorischen Zinsen berechnet werden. Dabei wird normalerweise von einer Nutzungsdauer des Netzes zwischen 25 und 30 Jahren ausgegangen. Mit Hilfe dieser jährlichen Investitionskosten (siehe Gleichung 13) können dann die Gesamtkostenfunktionen pro m Netzlänge bzw. für das gesamte Nahwärme- bzw. Mikronetzes (in Abhängigkeit der verwendeten Rohrdurchmesser und Rohrlängen) aufgestellt werden (siehe Gleichungen 14 und 15). Gleichung 15 wird als Zielfunktion für die EDV-gestützte Optimierung des Nahwärme- bzw. Mikronetzes herangezogen.

$$K_I = a_K + z_K \left[ \frac{\text{S}}{\text{m} \cdot \text{a}} \right] \quad \text{Gleichung 13}$$

$K_I$  ... berechnete jährliche Investitionskosten über die Nutzungsdauer pro Meter Rohrlänge

$a_K$  ... kalkulatorische Abschreibung  $\left[ \frac{\text{S}}{\text{m} \cdot \text{a}} \right]$

$z_K$  ... kalkulatorische Zinsen  $\left[ \frac{\text{S}}{\text{m} \cdot \text{a}} \right]$

$$K_{ges} = K_{P,ges} + K_{Q,ges} + K_I \left[ \frac{\text{S}}{\text{m} \cdot \text{a}} \right] \quad \text{Gleichung 14}$$

$$K_{ges,Netz} = \sum_{d_{min}}^{d_{max}} l(d) \cdot K_{ges}(d) \Rightarrow \min \left[ \frac{\text{S}}{\text{a}} \right] \quad \text{Gleichung 15}$$

$K_{ges,Netz}$  ... Gesamtkosten des Fernwärmenetzes

$l(d)$  ... durchmesserspezifische Leitungslänge im Fernwärmenetz [m]

$K_{ges}(d)$  ... durchmesserspezifische Gesamtkosten bezogen auf einen Meter Netzlänge  $\left[ \frac{\text{S}}{\text{m} \cdot \text{a}} \right]$

$d_{min}$  ... minimaler Rohrleitungsdurchmesser [m]

$d_{max}$  ... maximaler Rohrleitungsdurchmesser [m]

## Der eigentliche Berechnungsablauf einer optimierten Netzauslegung

Die EDV-gestützte Netzdimensionierung basiert, wie bereits erläutert, auf den Ergebnissen der durchgeführten Wärmebedarfserhebung. Von diesen Daten ausgehend, werden ein oder meh-

rere mögliche Netzstrukturen festgelegt und EDV-gestützt durchgerechnet, wobei die Berechnung immer von den am weitesten entfernten Abnehmern zum Heizwerk erfolgen muß.

Der erste zu durchlaufende Berechnungsschritt sieht eine Vordimensionierung der einzelnen Rohrleitungen unter Berücksichtigung der technisch zulässigen Strömungsgeschwindigkeit vor. Die maximalen technisch zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten für jeden Rohrdurchmesser, die zur Vermeidung von Geräuschbildungen einzuhaltende Randbedingungen der Berechnung darstellen, müssen dabei im Programm vorgegeben werden.

Weiters ist es wichtig, daß bei der Netzberechnung generell von der vorgesehenen Endausbaustufe ausgegangen werden muß, also auch zukünftige Netzausbaupläne mitberücksichtigt werden, um eine zu kleine Netzdimensionierung zu vermeiden. Dies ist bei sehr großen Fernwärmenetzen schwierig, bei kleinen dezentralen Netzen, wie sie bei österreichischen Biomassefernh Heizwerken vorliegen, aber durchaus möglich. Daher kommt einer EDV-gestützten Netzoptimierung insbesondere für Nahwärme- bzw. Mikronetze große Bedeutung zu, da die Qualität der aus der Netzoptimierung erzielten Ergebnisse direkt von der Genauigkeit der Vorhersage des tatsächlichen Endausbaus abhängt.

Als zweiter Schritt wird überprüft ob die sich laut Berechnung ergebenden Druckverluste für den maximalen Wärmebedarfsfall den zulässigen maximalen Gesamtdruckverlust für das Nahwärme- bzw. Mikronetz einhalten oder überschreiten. Dieser maximale Gesamtdruckverlust stellt eine zweite einzuhaltende Randbedingung dar und hängt in erster Linie von der Wahl des Fernwärmerohrtyps ab. Bei der Verwendung von Stahlrohren beträgt der zulässige Nenn- druck in Nahwärmenetzen normalerweise 16 bar, bei Kunststoffrohren zwischen 6 und 10 bar [18, 22, 23]. Dieser maximal zulässige Gesamt-Nenn- druck setzt sich aus dem dynamischen Druckverlust in den Rohrleitungen (abhängig vom Netzdurchmesser) und im Heizwerk (Druckverlust der Kessel und der hydraulischen Schaltung im Heizwerk) sowie dem erforderlichen statischen Druck (vom Kesselhersteller bzw. durch die Höhendifferenzen im Wärmeversorgungsgebiet vorgegeben) zusammen. Der erforderliche statische Druck liegt normalerweise zwischen 4,0 und 6,0 bar, der Druckverlust in den Rohrleitungen darf somit nicht mehr als rund 10,0 bar betragen.

Wird dieser maximal zulässige dynamische Druckverlust laut der Netzberechnung aus Schritt 1 nicht erreicht, so ist bereits die optimale Netzauslegung gefunden und es kann mit der Berechnung der jährlichen Wärmeverlustkosten, Pumpkosten und Investitionskosten fortgefahren werden, die für die Gesamtwirtschaftlichkeitsrechnung der Anlage wesentlich sind.

Wird der maximal zulässige dynamische Druckverlust überschritten, so werden durch die EDV-gestützte Berechnung die Durchmesser der einzelnen Rohrleitungen solange verändert, bis die in Gleichung 14 angegebene Zielfunktion minimiert ist (unter Einhaltung der erläuterten Randbedingungen für Strömungsgeschwindigkeiten und Gesamtdruckverlust). Das heißt, daß nach jeder Änderung der Rohrleitungsdurchmesser, die zu einer Unterschreitung des maximal zulässigen Gesamtdruckverlustes führt, die jährlichen Gesamtkosten berechnet werden und aus der Vielzahl der erhaltenen Lösungen dann die günstigste ausgewählt wird. Nachdem die Gesamtkosten für jeden Lösungsfall integrativ berechnet werden müssen (in Abhängigkeit der vorgegebenen Außentemperaturverteilung und dem Wärmeabnahmeverhalten der Kunden über das Jahr) stellt die Netzoptimierung eine relativ komplexe Aufgabe dar, die es mathematisch bestmöglich zu lösen gilt.

Eine Vorversion für ein derartiges Programm wurde vom Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro BIOS, Graz, bereits

entwickelt und auch für die Dimensionierung neuer Nahwärme- bzw. Mikronetze bereits erfolgreich eingesetzt [12, 19, 20, 25].

## **Geplante zukünftige Verbesserungen und Entwicklungen**

Die Erläuterung der EDV-gestützten Netzberechnung zeigt, daß, neben der Kenntnis der gültigen Rohrreibungsbeiwerte für das verwendete Rohr und Wärmeträgermedium, der Kenntnis der Fließgeschwindigkeiten, ab der Geräuschbildung möglich ist, und der Erfassung der dafür wesentlichen Einflußparameter, hinsichtlich einer optimierten Netzauslegung große Bedeutung zukommt, da diese Fließgeschwindigkeiten als Grenzwerte (einzuhaltende Randbedingungen) in die Berechnung miteingehen. Derzeit sind diesbezüglich von den Rohrleitungsherstellern und Nahwärmegesellschaften nur Schätz- bzw. Erfahrungswerte verfügbar, wobei diese Daten deutlich voneinander abweichen [1, 4, 6, 17, 23]. Ein Grund dafür dürfte der große Einfluß der im Netz befindlichen Einbauten (Art der Gestaltung der Abzweiger) auf die Geräuschentwicklung sein.

Um dieses Informationsdefizit zu beseitigen und die Basis für eine optimierte Netzauslegung zu schaffen, sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten angelaufen, die mittels umfangreicher Versuche an speziell konzipierten Teststrecken die Druckverluste und Geräuschgrenzen in Rohrleitungen, Einbauten und Wärmeübergabestationen sowie deren Einflußfaktoren ermitteln sollen [5]. Diese Versuche sollen mit normalem Wasser, vollentsalztem und chemisch aufbereitetem Wasser sowie Wasser mit Tensidzusatz durchgeführt werden. Dadurch soll auch innovativen Ansätzen, wie der Verwendung von reibungsmindernden Zusätzen [8, 15, 16], Rechnung getragen werden. Weiters sind im Rahmen dieser Forschungsarbeiten Wärmeverlustmessungen mit einem von einem österreichischen Hersteller für Fernwärmerohre neu entwickelten Doppelrohrsystem mit ovalem Querschnitt geplant [7], das deutlich geringere Wärmeverluste als konventionelle Rohre erwarten läßt.

Die Ergebnisse aus diesen Forschungsarbeiten können dann in ein entsprechendes EDV-gestütztes Programm zur Netzberechnung eingebunden werden, wodurch das derzeit noch bestehende Informationsdefizit beseitigt wäre und die Netzoptimierung auf einer wissenschaftlich gesicherten Basis durchgeführt werden könnte.

## **Vorteile einer EDV-gestützten Netzauslegung hinsichtlich einer verbesserten Netzregelung**

Durch die Computersimulation des zu dimensionierenden Netzes ist es möglich für eine berechnete optimale Netzvariante die herrschenden Temperaturen und Drücke an jedem Knotenpunkt und bei jedem Wärmeabnehmer anzugeben, da sowohl der Temperaturverlauf als auch der Druckverlauf in der gesamten Vor- und Rücklaufleitung unter Berücksichtigung der sich ändernden Stoffwerte (Wärmekapazität, dynamische Viskosität, Dichte des strömenden Mediums, Wärmeleitfähigkeit der Isolation) berechnet wird. Dadurch ist es möglich mit guter Näherung die tatsächlich in dem zu errichtenden Nahwärme- bzw. Mikronetz zu erwartenden Druck- und Temperaturverläufe in Abhängigkeit von der Außentemperatur und vom (tageszeitlichen) Wärmeabnahmeverhalten der Kunden zu ermitteln.

## Die Regelung der Netzpumpen

Abbildung 9 stellt schematisch die Druckverhältnisse in einem Nahwärmenetz dar. Von besonderem Interesse hinsichtlich der Regelung der Netzpumpen ist der erforderliche Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf der Wärmeübergabestationen derjenigen Abnehmer, deren Verbindungsleitungen zum Heizwerk die größten Druckverluste im Netz aufweisen, da bei allen anderen Wärmeabnehmern die überschüssige Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf im, in jeder Wärmeübergabestation eingebauten, Druckregelventil vernichtet wird. Diese weit vom Heizwerk entfernten Stationen legen den von der Netzpumpe aufzubringenden dynamischen Druck fest.

**Abbildung 9:** Schematische Darstellung der Druckverläufe in einem Nahwärmenetz

Erläuterungen: Datenquelle [19]; alle Druckangaben in [bar]; der Druckverlust ( $\Delta p$ ) der einzelnen Hausübergabestationen setzt sich aus dem Druckverlust der Station selbst bei geöffnetem Differenzdruckventil und demjenigen Druckverlust, der durch das teilweise Schließen des Ventils entsteht, zusammen; der Wärmeabnehmer dessen Verbindungsleitungen zum Heizwerk die größten Druckverluste im Netz aufweisen ist gekennzeichnet.

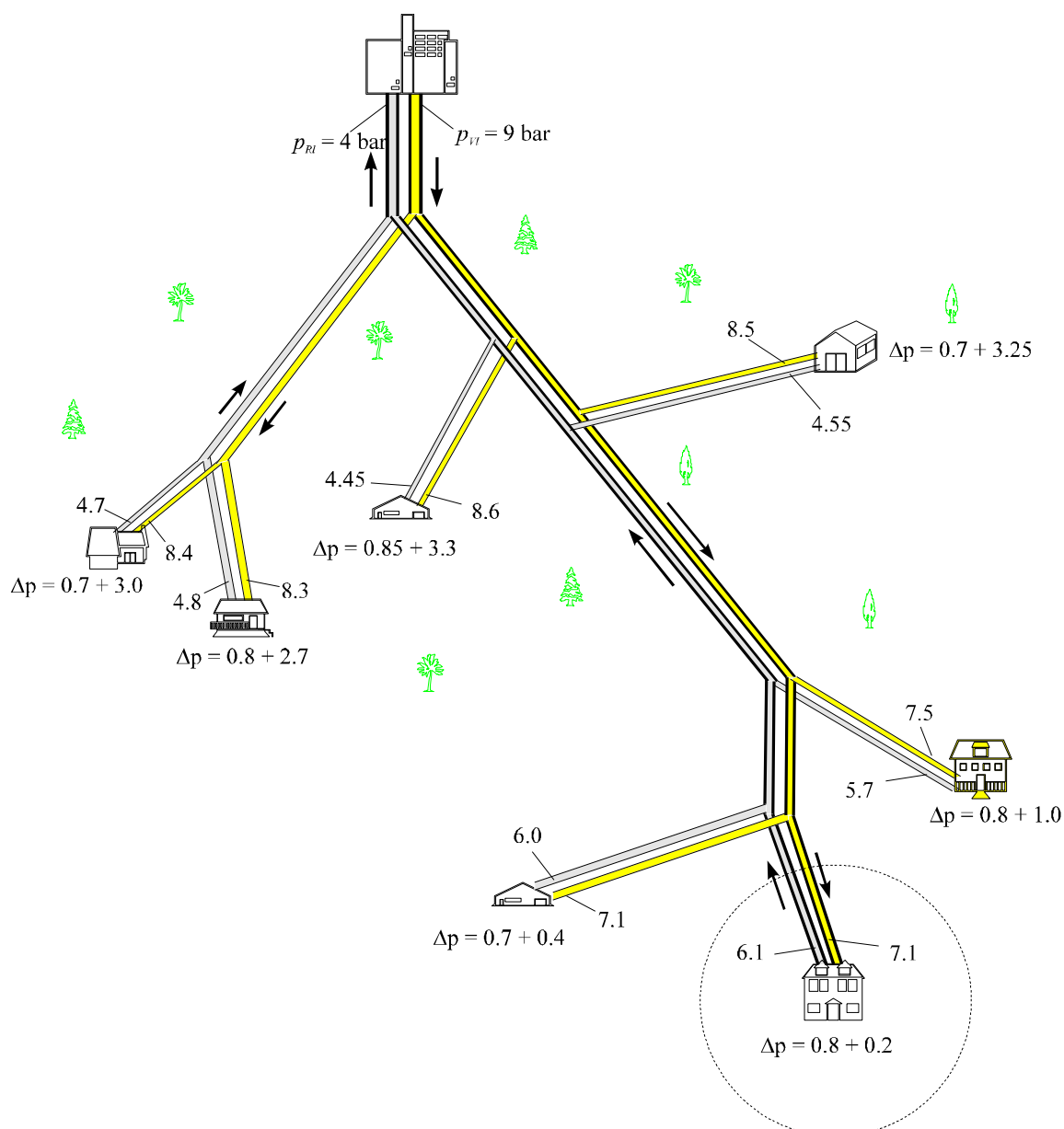


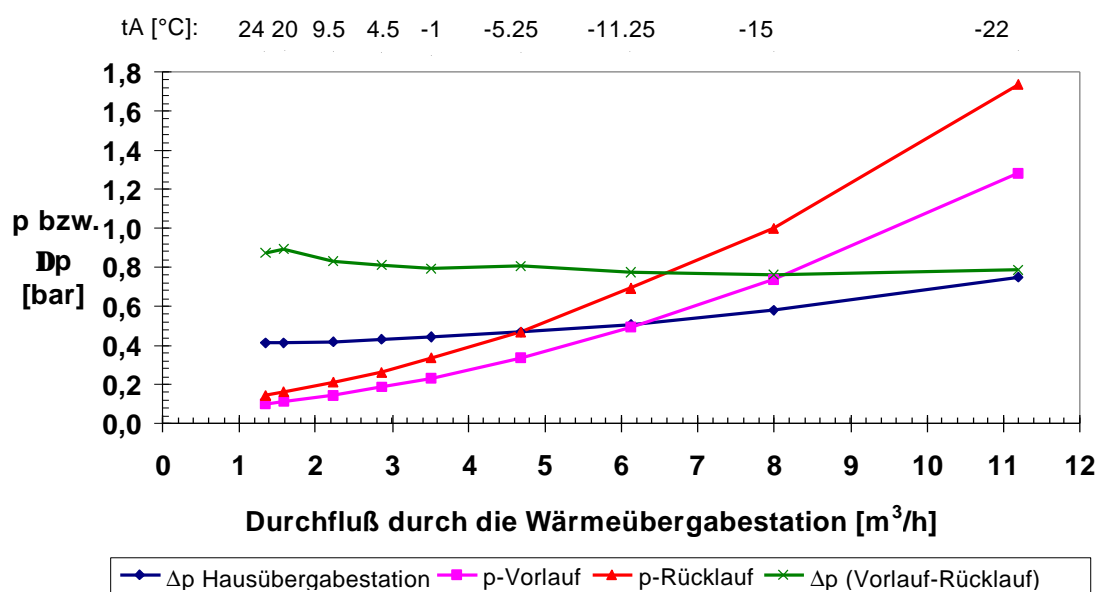


Abbildung 10 stellt die Druckverhältnisse an einer derartigen Wärmeübergabestation dar. Der primärseitige Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf an dieser Station muß mindestens so groß sein, wie der in der Wärmeübergabestation auftretende Druckverlust. Er sollte jedoch nur geringfügig höher liegen, um den Leistungsbedarf der Netzpumpe möglichst gering zu halten. Die in Abbildung 10 dargestellte Übergabestation weist bei maximaler Wärmeabnahme ( $t_A = -22,0^\circ\text{C}$ ) den größten Druckverlust zum Heizwerk auf, in allen anderen Lastfällen liegt der Druckverlust bei einer anderen Wärmeübergabestation im Netz höher, woraus sich die Differenz der Linien " $\Delta p$  Vorlauf-Rücklauf" und " $\Delta p$ -Hausübergabestation" erklärt.

**Abbildung 10:** Schematische Darstellung der Druck- und Differenzdruckverläufe über die Wärmeübergabestation eines vom Heizwerk weit entfernten Abnehmers in Abhängigkeit des Durchflusses und der Außentemperatur

Erläuterungen: Datenquelle [12].

Verwendete Abkürzungen:  $t_A$ ....Außentemperatur; p-Vorlauf....auftretender Druckverlust in der Vorlauf-Leitung zwischen Heizwerk und Abnehmer; p-Rücklauf....auftretender Druckverlust in der Rücklauf-Leitung zwischen Heizwerk und Abnehmer;  $\Delta p$  Vorlauf-Rücklauf....Differenzdruck zwischen Vorlauf und Rücklauf an der Wärmeübergabestation;  $\Delta p$  Hausübergabestation....erforderlicher Differenzdruck zum Überwinden der Druckverluste der Wärmeübergabestation bei geöffnetem Druckregelventil.



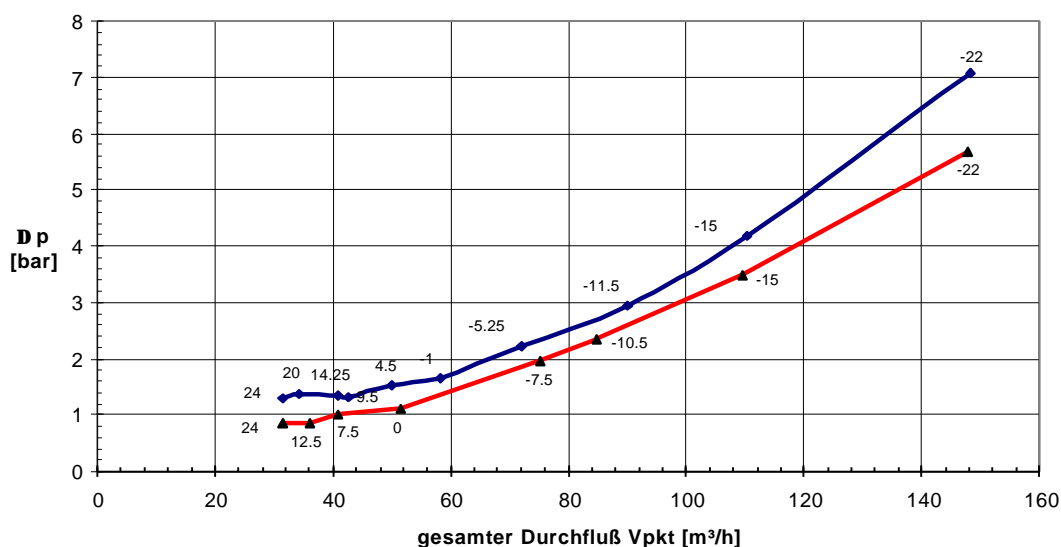
Mit Hilfe eines EDV-gestützten Netzauslegungsprogrammes ist es möglich für sämtliche Außentemperaturen und Wärmeabnahmefälle den maximal zu überwindenden Druckverlust zu berechnen und denjenigen Wärmeabnehmer, bei dem er auftritt, zu lokalisieren. Die Ergebnisse dieser Berechnungen liefern die Anlagenkennlinie der Netzpumpe in Abhängigkeit der Außentemperatur. Die in Abbildung 11 enthaltenen Resultate stellen die oberen und unteren Grenzen der möglichen auftretenden Druckverluste in einem Nahwärmenetz beispielhaft dar. Die Differenz zwischen den beiden Linien ergibt sich in Abhängigkeit der Durchströmung derjenigen Wärmeübergabestationen, die die Netzpumpen am stärksten belasten. Zwischen diesen beiden Linien kann sich die tatsächliche Anlagenkennlinie der Netzpumpe bewegen. Somit ist es möglich mit Hilfe einer EDV-gestützten Netzsimulation die Anlagenkennlinie der Netzpumpe näherungsweise vorzugeben. Diese kann einerseits für die korrekte Auslegung und Auswahl der Netzpumpe als auch für deren Frequenzregelung verwendet werden. Bei modernen

Nahwärme- bzw. Mikronetzen mit elektronischer Datenfernübertragung wird der an den Wärmeübergabestationen kritischer Abnehmer anliegende Differenzdruck gemessen, mit dem entsprechenden Sollwert verglichen, und die Netzpumpe direkt nach diesen Meßergebnissen geregelt [21, 25].

Der Vorteil der Netzpumpenregelung nach einer vorgegebenen Anlagenkennlinie besteht darin, daß nur soviel Differenzdruck erzeugt wird, wie für den Betrieb des Netzes tatsächlich erforderlich ist, wodurch eine Minimierung der Pumpkosten erreicht wird. Derzeit basiert die Netzpumpenregelung der meisten Anlagen auf einem vorgegebenen konstanten Differenzdruck ohne Berücksichtigung einer Anlagenkennlinie, wodurch ständig zu viel Pumpenergie ins Netz geliefert und in den Regelventilen der Hausübergabestationen wieder vernichtet wird.

**Abbildung 11:** Berechneter Druckverlust eines Nahwärmenetzes in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Erläuterungen: Berechnung für die Fertigstellung der 2. Netzausbaustufe; bereitzustellende Wärmemenge ab Heizwerk: 15.320 MWh / a; kalkulierte max. Wärmeleistung ab Werk: 7,2 MW; Netzlänge (Vorlauf): 16.460 m; die beiden eingezeichneten Differenzdruckverläufe geben die oberen und unteren Grenzen an, zwischen denen der tatsächlich auftretende Differenzdruck (und somit die Anlagenkennlinie der Netzpumpe) liegen wird; die im Heizwerk auftretenden Druckverluste des Kessels und der hydraulischen Schaltung sind bereits inkludiert.



## Die Regelung der Vorlauftemperatur und Kontrolle der Rücklauftemperatur

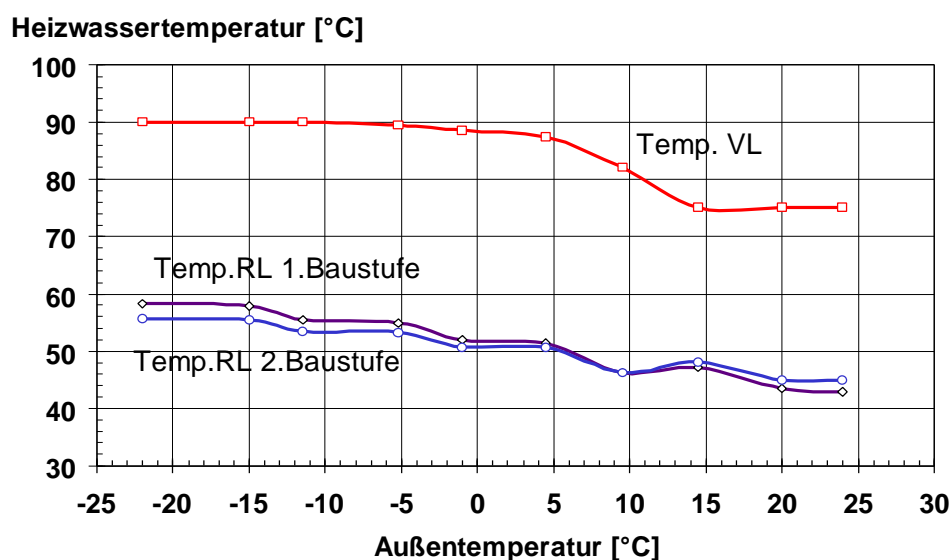
Abbildung 12 stellt den für ein zu errichtendes Nahwärmenetz, auf Basis der durchgeführten Wärmebedarfserhebung und anschließenden EDV-gestützten Netzberechnung, ermittelten Verlauf der Vor- und Rücklauftemperaturen im Heizwerk in Abhängigkeit von der Außentemperatur dar. Die Vorlauftemperatur der Wärmeabnehmer hängt vom installierten Heizsystem im Haus bzw. vom benötigten Prozeßwärmeniveau ab. Je niedriger die benötigte Vorlauftemperatur der Kunden ist, desto geringer sind die Wärmeverluste im Netz, wobei derjenige Wärmeabnehmer mit der höchsten benötigten sekundärseitigen Vorlauftemperatur das primärseitige Vorlauftemperaturniveau festlegt. Der berechnete Verlauf der Vorlauftemperatur ab Heizwerk kann somit als Sollwertkurve für die Vorlauftemperaturregelung der Feuerung verwendet werden, um diese so niedrig wie möglich zu halten. In Zukunft wird es mit Hilfe schnell

übertragender Datenfernleitsysteme, die direkt mit den Rohren mitverlegt werden, sogar möglich sein, periodisch sämtliche benötigte Vorlauftemperaturen der Wärmeabnehmer abzufragen und die jeweils höchste als Sollwertvorgabe für die Feuerung zu verwenden. Dieses System steckt jedoch erst in der Entwicklung und muß noch umfangreichen Tests hinsichtlich seiner praktischen Anwendbarkeit und Stabilität unterzogen werden. Es stellt jedoch die Grundlage für eine optimale Vorlauftemperaturregelung dar, die neben der Außentemperatur auch noch das tageszeitlich unterschiedliche Wärmeabnahmeverhalten der Kunden mitberücksichtigt. Einen ersten bereits realisierten Schritt in diese Richtung stellt die primär- und sekundärseitige Nachtabsenkung der Vorlauftemperaturen dar.

**Abbildung 12:** Berechneter Verlauf der Vorlauftemperatur und zu erwartenden Rücklauftemperatur eines österreichischen Biomasseheizwerkes in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Erläuterungen: Berechnungsbasis: durchgeführte Wärmebedarfserhebung bei den zukünftigen Abnehmern und nachgeschaltete EDV-gestützte Netzberechnung und Netzbetriebssimulation.

Verwendete Abkürzungen: VL....Vorlauf; RL....Rücklauf.



Die Rücklauftemperatur wird nur von den Verbrauchern bestimmt. Dabei spielt die ausgewählte Wärmeübergabestation und die Regelung derselben eine große Rolle. Weiters ist die Art der sekundärseitig installierten hydraulischen Schaltung sowie die Art der Warmwasseraufbereitung (Boilerladung oder Durchlauferhitzung) von Bedeutung. Hinsichtlich der Auswahl und Regelung der Hausübergabestationen gilt als Vorgabe, daß die Temperaturdifferenz zwischen primär- und sekundärseitigem Rücklauf 2 °C nicht überschreiten soll (sog. Grädigkeitsregelung) [21, 22]. Die Regelung und Schaltung der Sekundärkreisläufe sollte, soweit möglich, ebenfalls auf Erzielung möglichst niedriger Rücklauftemperaturen modifiziert werden. Dies ist durch die Minimierung der erforderlichen sekundärseitigen Vorlauftemperatur in Abhängigkeit des installierten Raumheizungssystems möglich (die sekundärseitige Vorlauftemperatur wird normalerweise ebenfalls nach einer modifizierbaren Sollwertkurve in Abhängigkeit der Außentemperatur und Tageszeit geregelt). Eine weitere Möglichkeit der Optimierung stellt eine einfache Frequenzregelung der sekundärseitig installierten Pumpe dar, mit dem Ziel die sekundärseitige Rücklauftemperatur zu minimieren. Eine dritte Verbesserungsmöglichkeit stellt die Art und Regelung der Warmwasseraufbereitung dar. Mit Durchflußwarmwassererzeugern lassen sich wesentlich niedrigere primärseitige Rücklauftemperaturen erzielen als mit Boilern, da

sekundärseitig kaltes Leitungswasser erwärmt werden muß. Kostenmäßig läßt sich durch die Installation von Durchflußwarmwassererzeugern sekundärseitig der Boiler einsparen, dafür ist eine zweite, relativ große Wärmeübergabestation zur Warmwasserbereitung erforderlich, die mit sehr schnell reagierenden Regelventilen ausgestattet sein muß.

Eine Kontrolle der primär- und sekundärseitigen Rücklauftemperaturen bei den Wärmeabnehmern ist in modernen, mit Datenfernleitsystemen ausgestatteten, Biomasseheizwerken durchführbar. Gleichzeitig ist auch eine Modifizierung der primär- und sekundärseitigen Regelung der Wärmeübergabestationen direkt ab Heizwerk möglich. Fehler in hydraulischen Schaltungen bei einzelnen Abnehmern können auf diese Weise auch nachträglich aufgespürt und korrigiert werden. Dies bringt in den meisten Fällen auch für die Wärmeabnehmer wirtschaftliche Vorteile mit sich und trägt zu einer schrittweisen Optimierung der sekundärseitigen Installationen und Regelungen bei.

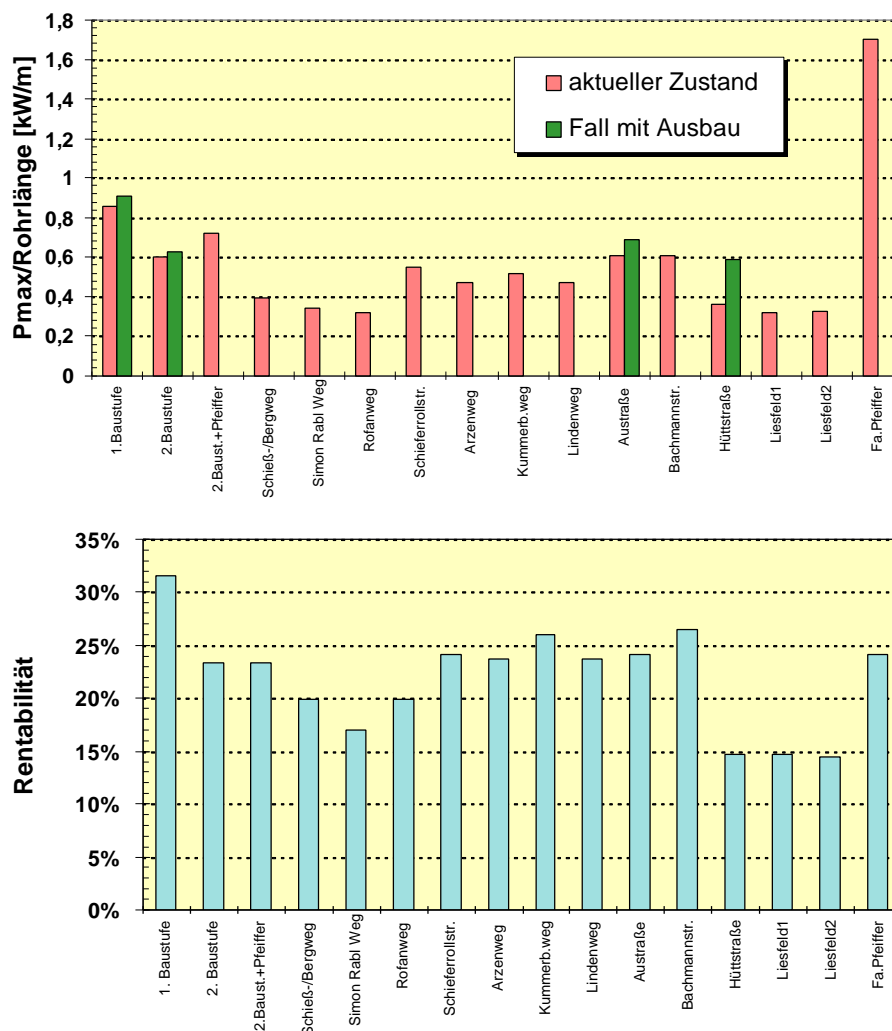
### **Vorteile einer EDV-gestützten Netzoptimierung und Netzregelung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Nahwärme- bzw. Mikronetzen**

Wie bereits erläutert machen die Kosten zur Errichtung des Nahwärme- bzw. Mikronetzes durchschnittlich rund 50% der gesamten Investitionskosten eines Biomasseheizwerkes aus. Genaue Kostenkalkulationen für zwei neu zu errichtende Nahwärme- bzw. Mikronetze haben ergeben, daß durch eine EDV-gestützte Netzoptimierung zwischen 5,0 und 10,0% der Investitionskosten für das Rohrleitungssystem eingespart werden können. Weiters ist, durch die Kombination einer optimierten Netzauslegung und Netzregelung, eine Reduktion der Betriebskosten um 2,0 bis 9,0% im Vergleich zu konventionellen Systemen möglich [20, 21, 25]. Diese Zahlen sprechen für sich und lassen erkennen, daß einer Optimierung von Nahwärme- bzw. Mikronetzen große wirtschaftliche Bedeutung zukommt und diese zukünftig in der Anlagenplanung verstärkt Beachtung finden muß. Ökologisch ist eine Verringerung der Wärmeverluste und die damit verbundene Steigerung des Anlagenwirkungsgrades ebenfalls von Bedeutung, da die Emissionsfaktoren der Biomassefeuerung in gleichem Ausmaß sinken.

Ein weiterer großer wirtschaftlicher Vorteil einer EDV-gestützten Netzauslegung ist die Möglichkeit einer trassenspezifischen Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Nahwärme- bzw. Mikronetzes. Abbildung 13 stellt die Ergebnisse einer derartigen Berechnung grafisch dar. Dabei wurde die trassenspezifische maximale Wärmeabnahmeleistung (Summe der Abnehmer-nennanschlusleistungen) pro Meter Trassenlänge errechnet, für die in der einschlägigen Fachliteratur Richtwerte von mindestens 0,5 kW/m angegeben sind [9, 13], um wirtschaftlich arbeiten zu können (ideal sind Werte über 1,0 kW/m). Weiters ist die Rentabilität der einzelnen Trassen dargestellt, woraus ersichtlich wird, daß diese Kennzahl wesentlich besser zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit geeignet ist, da sie die pro Trasse erzielten Einnahmen aus dem Wärmeverkauf mitberücksichtigt. Dies ist von Bedeutung, da nicht alle Wärmekunden gleich hohe Wärmepreise bezahlen, weil diese meist nach dem Wärmeverbrauch gestaffelt berechnet werden. Diese trassenspezifische Vorkalkulation, die im Zuge einer EDV-gestützten Netzauslegung sehr exakt berechenbar ist, muß mit in die Entscheidung einfließen, welche Netzstruktur letztendlich realisiert wird. Trassen mit einer Rentabilität kleiner 20% sollten normalerweise nicht gebaut werden.

**Abbildung 13:** Trassenspezifische Beurteilung eines geplanten Nahwärmenetzes hinsichtlich der zu erwartenden Nennanschlußleistung pro Meter Rohrnetz und der Rentabilität

Erläuterungen: Rentabilität = Einnahmen aus Wärmeverkauf / Netzinvestitionskosten (pro Trasse berechnet und auf eine bestimmte Netznutzungsdauer bezogen).

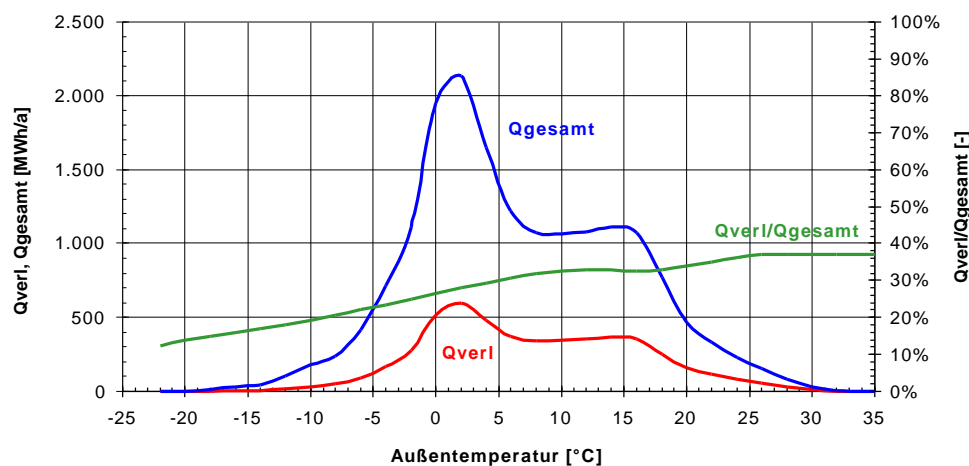


Ein letzter aber sehr bedeutender Punkt hinsichtlich eines möglichst wirtschaftlichen Betriebes eines Fernwärmenetzes ist die Frage, ob das Netz ganzjährig oder nur während der Heizperiode betrieben werden sollte. Wie Abbildung 14 zeigt, bringt hier eine EDV-gestützte Netzberechnung ebenfalls wesentliche Vorteile, da sie die auftretenden Wärmeverluste in Abhängigkeit von der Außentemperaturabhängigen Wärmeabnahme deutlich veranschaulicht. Während die Wärmeverluste für das berechnete Nahwärmenetz bei  $-20^{\circ}\text{C}$  (maximale Wärmeabnahme) bei nur 13,0% der gesamten ausgelieferten Wärme liegen, steigen sie für  $15^{\circ}\text{C}$  Außentemperatur bereits auf 33% an (trotz optimierter Netzauslegung). Ein Betrieb über die Sommermonate erhöht somit die Netzverluste aufgrund der geringen Durchsätze beträchtlich. Der Mehrbedarf an Personal erhöht die Betriebskosten noch zusätzlich. Dieser Mehraufwand ist nur dann gerechtfertigt, wenn auch im Sommer eine entsprechende Grundauslastung des Nahwärmenetzes von zumindest 20,0% bis 30,0% der Kesselnennleistung des Heizwerkes gesichert ist (z.B. durch Prozeßwärmeabnehmer oder den Warmwasserbedarf großer Hotels in touristischen Gebieten). Andernfalls sollte auf einen Sommerbetrieb der Anlage verzichtet werden. Eine

EDV-gestützte Netzberechnung liefert die für eine derartige Entscheidung notwendigen Daten, die direkt in die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Gesamtanlage übernommen werden können.

**Abbildung 14:** Berechnete jährlich produzierte Wärmemenge und anfallende Verlustwärmemenge durch den Wärmetransport im Nahwärmenetz für ein österreichisches Biomasseheizwerk in Abhängigkeit der Außentemperatur

Erläuterungen:  $Q_{\text{gesamt}}$ ....vom Heizwerk ausgelieferte Wärme;  $Q_{\text{verl}}$ ....Wärmeverluste im Nahwärmenetz.



Die in diesem Kapitel angeführten Erläuterungen zeigen, daß eine EDV-gestützte Netzauslegung nicht nur hinsichtlich der dadurch erzielbaren auslegungs- und regelungstechnischen Optimierung eines Nahwärme- bzw. Mikronetzes große Vorteile mit sich bringt, sondern auch für die wirtschaftlich bedeutenden Fragestellungen der Anlagenbetriebszeit und der genauen Netzstruktur (Ausbau) die notwendigen Entscheidungsgrundlagen bereitstellt.

## Literatur

1. AGFW (Arbeitsgemeinschaft Fernwärme), 1994: AGFW-Grafikdienst, Grafiken zur Fernwärmeversorgung, Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (Hrsg.), Frankfurt, Deutschland
2. BIEDERMANN Friedrich, 1994: EDV-gestützte Bilanzierung und Bewertung von Biomasseheizwerken, Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Technische Universität Graz, Österreich
3. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ANGELEGENHEITEN, 1993: Energiebericht 1993 der Österreichischen Bundesregierung, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten (Hrsg.), Wien, Österreich
4. FERNWÄRME WIEN, 1994: Maximale Wassergeschwindigkeiten in nahtlosen Stahlrohren, Datenblatt, Fernwärme Wien GmbH (Hrsg.), Wien, Österreich
5. HEIN D., OBERNBERGER I., 1995: Optimierung der Dimensionierung und des Betriebes von Rohrleitungssystemen für dezentrale Biomassefernhelzwerke - Projektphase I: Untersuchung und Bewertung der Strömungs- und Wärmeverluste in Fernwärmenetzen, Forschungsprojektantrag, Institut für Thermische Kraftanlagen (Hrsg.), Technische Universität München, Deutschland
6. ISOPLUS, 1994: ISOPLUS Fernwärmesysteme, Bauteile und Anwendungstechnik, 3. Auflage (1994), Isoplus GmbH. (Hrsg.), Hohenberg, Österreich
7. ISOPLUS, 1995: Patentschrift zu einem neu entwickelten Doppelrohrsystem für Fernwärmeleitungen, Hohenberg, Isoplus GmbH, Hohenberg, Österreich
8. KLÖPPER Karsten, ALTHAUS Wilhelm, WEFELS Peter, BESCH Helmut, 1994: Langzeiteinsatz von Reibungsminderern im Fernwärmenetz Vöcklingen - Luisenthal, Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (Hrsg.), Oberhausen, Deutschland

9. LEV STEIERMARK, 1992: Fernwärme, Nahwärme aus Biomasse, Handbuch, Landesenergieverein Steiermark (Hrsg.), Graz, Österreich
10. OBERNBERGER Ingwald, NARODOSLAWSKY Michael, MOSER Franz, 1994: Biomassefernheizwerke in Österreich: Entwicklung, Stoff- und Energieflüsse, Umweltverträglichkeit; In: Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, Heft 3 (1994)
11. OBERNBERGER Ingwald, 1995 a: Biomass Combustion Plants in Austria: State of the Art and Possibilities of Optimization; In: Proceedings of the 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, April 1995, INFUB (ed.), Lisbon, Portugal
12. OBERNBERGER Ingwald, 1995: Moderne Biomasse-Fernwärmeanlagen - Effiziente Leitungssysteme für Fernwärme; In: Tagungsband zum 4. Österreichischen Biomassetag, Nov. 1995, Kautzen, Austria; Österreichischer Biomasseverband (Hrsg.), Wien, Österreich
13. RAKOS Christian, 1993: Nahwärme aus Biomasse, Studie im Auftrag der Energieverwertungsagentur, Wien, Österreichische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.), Wien, Österreich
14. RECKNAGEL, SPRENGER, HÖNLMANN, 1995: Taschenbuch für Heizungs- und Klimatechnik; 67. Auflage (1995), ISBN 3-486-26213-0
15. SAARBERG-FERNWÄRME GMBH, 1995: „Anwendung und Erprobung mizellarere Reibungsminderer in Fernwärmesystemen“, BMFT-Projekt 0328710B, Saarberg-Fernwärme GmbH (Hrsg.), Saarberg, Deutschland
16. SCHÖNBERG Ingo, ALTHAUS Wilhelm, KLÖPPER Karsten, WEINSPACH Paul- Michael, 1994: Kostenreduktionspotential durch den Einsatz widerstandsmindernder Additive in Fernwärmesystemen; In: Fernwärme international- FWI, Jg. 23 (1994), Heft 4/5
17. SPITZER Josef, 1988: Emissionsbezogene Bewertung von Energieplanungsmaßnahmen, Endbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, Forschungsgesellschaft Joanneum Ges.m.b.H. (Hrsg.), Graz, Österreich
18. 1994: WÄRMEATLAS, 7. Auflage (1994), Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Düsseldorf, Deutschland
19. SEISER R., BIEDERMANN F., STEINWENDER K., 1995: Technisch und ökologisch optimierte Auslegung eines 5,0 MW<sub>th</sub>-Biomassefernheizwerkes samt Fernwärmenetz, Anlagenkonstruktionsübung, Institut für Verfahrenstechnik, Technische Universität Graz, Österreich
20. OBERNBERGER Ingwald, ORFANIOTIS Alexander, 1995: Fernwärme Kundl - Netzauslegung, Endbericht, Ingenieurbüro BIOS (Hrsg.), Graz, Österreich
21. LAUCHER Andreas, 1995: Biomasseortszentralheizungen - Technische und betriebswirtschaftliche Überlegungen; In: Logistik bei der biogenen Nutzung biogener Festbrennstoffe, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Band 5 (1995), Landwirtschaftsverlag Münster, Deutschland
22. LISCHANSKY Josef, 1995: Hausübergabestationen; In: Tagungsband zum Seminar "Grundlagen für den Betrieb einer Biomasse-Fernwärmeanlage, Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen (Hrsg.), Wien, Österreich
23. FACHVERBAND DER GAS- UND WÄRMEVERSORGUNGSUNTERNEHMEN, 1987: Technische Richtlinien für die Errichtung von Fernheizrohrsträngen und Hausanschlußleitungen, 4. Ausgabe (1987), Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen (Hrsg.), Wien, Österreich
24. FACHVERBAND DER GAS- UND WÄRMEVERSORGUNGSUNTERNEHMEN, 1989: Technische Richtlinien für die Errichtung und den Betrieb von Wärmeübergabestationen und Hauszentralen, 1. Ausgabe (1989), Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen (Hrsg.), Wien, Österreich
25. OBERNBERGER Ingwald, ORFANIOTIS Alexander, 1996: Technologische und wirtschaftliche Bewertung des Nahwärmenetzes des Biomasseheizwerkes Mauterndorf, Meß- und Prüfbericht, Ingenieurbüro BIOS (Hrsg.), Graz, Österreich
26. OBERNBERGER Ingwald, 1997: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente, Schriftenreihe "Thermische Biomassenutzung", Band 1, ISBN 3-7041-0241-5, dbv-Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, Österreich