

Minimale Rohrdurchmesser reduzieren Kosten und Netzverluste

# Ökonomisch optimierte Auslegung von Fernwärmenetzen

Fernwärmenetze ermöglichen die Nutzung von Abwärme sowie den Einsatz von Umweltwärme und Biomasse als Energieträger, verursachen aber gegenüber dezentralen Heizungen zusätzliche Kosten und Energieverluste. Eine techno-ökonomische Analyse zeigt, dass für Fernwärmenetze ein Optimum bezüglich Kosten und Energie erzielt wird, wenn die Auslegung auf den kleinsten zur Vermeidung von Kavitation und Lärm erforderlichen Rohrdurchmesser erfolgt. Die Analyse zeigt zudem, dass bei Fernwärmenetzen im Gegensatz zur Wärmeerzeugung ein negativer Skaleneffekt wirksam wird. Für die Kombination von Wärmeerzeuger und Fernwärmenetz ergibt sich deshalb ein systemabhängiges Grössenoptimum.

Thomas Nussbaumer, Stefan Thalmann \*

■ Als einfache Form von Fernwärme verteilten bereits die Römer vor über 2000 Jahren Thermalwasser für Bäder und Fussbodenheizungen in Gebäuden. Technische Fernwärmenetze wurden gegen Ende des 19. Jahrhunderts eingeführt und fanden in Europa vor allem seit 1960 eine grössere Verbreitung [1]. Für die Wärmebereitstellung kamen früher oft fossile Feuerungen zum Einsatz, während grössere Netze heute meist mit Abwärme betrieben und für kleinere Netze Biomasse-Heizwerke errichtet werden. Für Biomasse bietet Fernwärme Vorteile in Bezug auf Komfort und Luftreinhaltung. Dem stehen zusätzliche Kosten für das Fernwärme-

netz und die Wärmeverluste des Netzes gegenüber. Da die Netzauslegung die Verluste und die Kosten der Wärmeverteilung beeinflusst, wird im Beitrag der Einfluss der Auslegungsparameter auf die Effizienz und Wirtschaftlichkeit anhand von einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

## 1 Hintergrund

Für eine gegebene Anschlussleistung und Vorlauftemperatur werden die Effizienz und Wirtschaftlichkeit eines Fernwärmenetzes vor allem durch folgende fünf Faktoren beeinflusst:

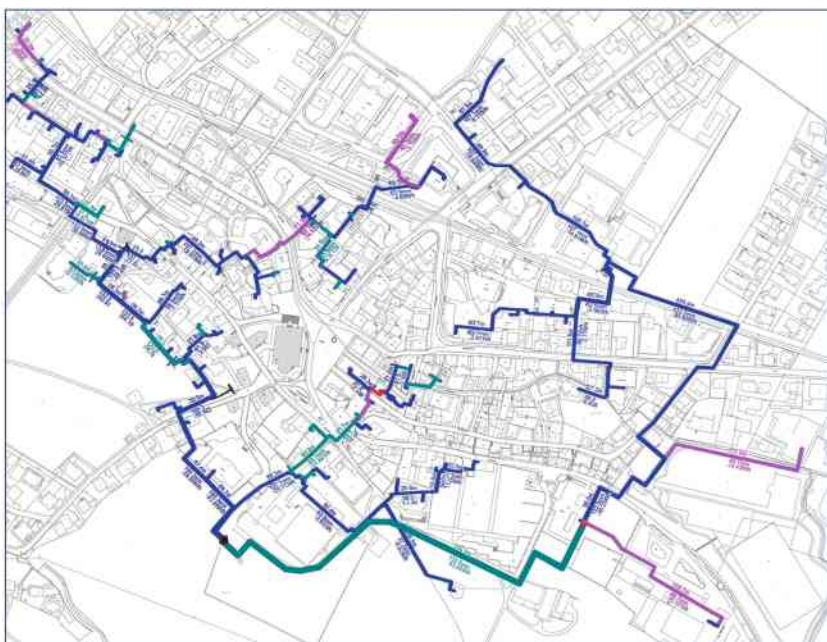
1. Die Wärmeverluste des Netzes verursachen einen zusätzlichen Wärmebedarf. Im Falle eines Heizkessels wird dazu Brennstoff verbraucht, dessen Energieinhalt den Wärmeverlusten dividiert durch den Kesselwirkungsgrad entspricht.
2. Eine Verkleinerung der Rohrdurchmesser bewirkt niedrigere Kapitalkosten und Brennstoffkosten, gleichzeitig steigen der Druckverlust und damit die Pumpleistung und die Stromkosten.
3. Die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf bestimmt die mit einem bestimmten Volumenstrom transportierbare Wärmeleistung:

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

$\dot{Q}$  = Wärmeleistung,  $\dot{m}$  = Massenstrom,  $\dot{V}$  = Volumenstrom,  $w$  = Strömungsgeschwindigkeit,  $A$  = Rohrquerschnitt,  $\rho$  = Dichte von Wasser,  $c_p$  = Wärmekapazität von Wasser,  $\Delta T$  = Temperaturspreizung ( $T_{\text{Vorlauf}} - T_{\text{Rücklauf}}$ ).

Bild 1 zeigt den zum Transport von 1 MW Wärmeleistung erforderlichen Volumenstrom in Funktion der Temperaturspreizung. Eine hohe Temperaturspreizung ermöglicht den Einsatz kleinerer Rohre, wodurch die Kapitalkosten und die Wärmeverluste sinken, während für ein gegebenes Netz die Anschlussleistung durch Vergrösserung der Temperaturspreizung erhöht werden kann.

4. Durch Anhebung des Temperaturniveaus steigen die Wärmeverluste. Gleichzeitig kann die Effizienz des



Netzplan eines Fernwärmenetzes. Die Farben beschreiben verschiedene Ausbaustufen und den Zusammenschluss von zwei bestehenden Netzen.

Wärmeerzeugers sinken, was vor allem für Heizkessel mit Abgaskondensation, Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) und Wärmepumpen entscheidend ist.

5. Für einen wirtschaftlichen Betrieb eines Fernwärmenetzes ist auch die Wärmeübertragung auf der Verbraucherseite (den Hausstationen) wichtig, da die übertragbare Wärmeleistung bei Nichterreichen der Tempe-

raturspitzung sinkt und die Netzverluste steigen.

## 2 Vorgehen

### 2.1 Wirtschaftlichkeit

Für die Wirtschaftlichkeit werden die Kapitalkosten nach der Annuitätenmethode bestimmt, während sich die Betriebskosten aus den Brennstoffkosten

zur Deckung der Wärmeverluste und den Stromkosten für den Netzbetrieb ergeben. Die Kosten für den Unterhalt werden vernachlässigt. Für die Wärmeverteilungskosten  $c$  bezogen auf die Wärme am Netzeingang gilt damit  $c = c_K + c_B$  in [Rp./kWh] mit:

$$\text{Kapitalkosten } c_K = \frac{I \cdot a}{Q \cdot \tau} \text{ (100 Rp./CHF)}$$

$I$  = Investitionskosten [CHF]

$a$  = Annuitätsfaktor [ $a^{-1}$ ] für

$$i > 0 \text{ mit } a = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

$i$  = Kapitalzinssatz [ $a^{-1}$ ]

$n$  = Kalkulationsdauer [a]

$Q$  = Anschlussleistung in [kW]

$\tau$  = Vollbetriebsstunden

Wärmeabnehmer [h/a]

Betriebskosten  $c_B = c_b + c_e + c_u$

Brennstoffkosten  $c_b = f \cdot p_b / \eta_a$

$f$  = Brennstoffverbrauch zur Deckung der Wärmeverteilungsverluste [kWh/kWh]

$p_b$  = Brennstoffpreis [Rp./kWh]

$\eta_a$  = Jahresnutzungsgrad der Wärmeerzeugung [%]

Stromkosten  $c_e = e \cdot p_e$

$e$  = Stromverbrauch für Pumpleistung [kWh/kWh]

$p_e$  = Strompreis in [Rp./kWh]

Unterhaltskosten  $c_u$  = Kosten für Unterhalt (vernachlässigt).

### 2.2 Annahmen

Für den Referenzfall wird mit einer Annuität von 5.1 % p.a. gerechnet, was einem Zinssatz von 3.0 % p.a. bei 30 Jahren entspricht. Die Investitionskosten für Rohre, Verlegung und Tiefbau werden mit Richtwerten der Branche nach Tabelle 1, die durch Erfahrungen bestätigt wurden, angenommen [2]. Als Basis dienen erdverlegte Kunststoffverbundmantelrohre (KMR) in offenem Gelände. Für Strassen ist für DN 80 mit 23 % und für DN 200 mit 18 % höheren Kosten zu rechnen.

Für die Brennstoffkosten zur Deckung der Netzverluste wird ein Preis von 6.0 Rappen pro ins Netz eingespiessene kWh Wärme angenommen. Dies entspricht Energieholz zu 5.0 Rp./kWh mit Jahresnutzungsgrad 83 % oder Strom zu 20 Rp./kWh und einer Wärmepumpe mit Jahresarbeitszahl 3.0. Die Wärmeverluste werden nach Tabelle 2 berechnet.

Die Stromkosten für die Pumpleistung werden durch Massenstrom, Druckverlust und Pumpwirkungsgrad sowie Be-

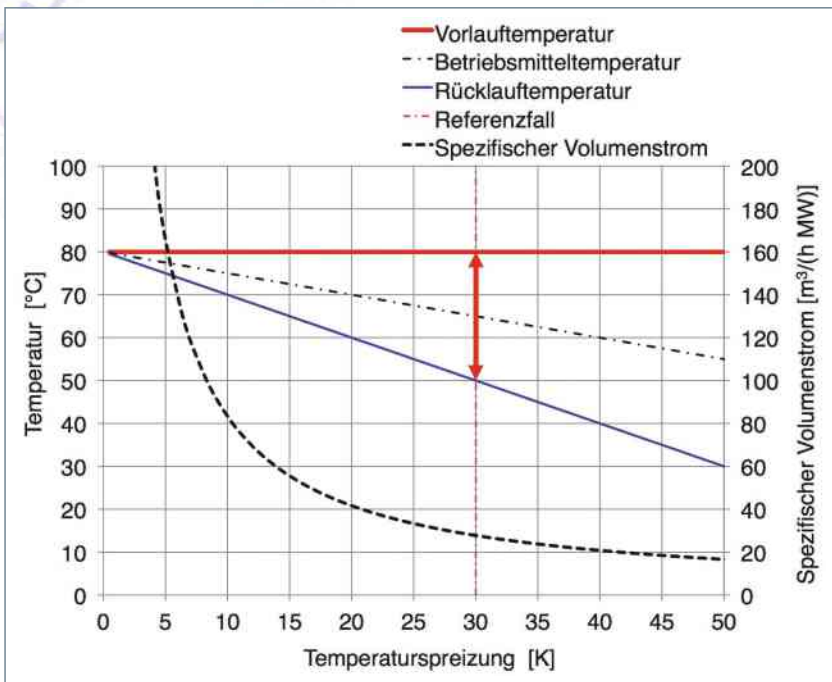


Bild 1: Netztemperatur und spezifischer Volumenstrom in Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf für 1 MW. Das Beispiel zeigt den Referenzfall mit 80 °C Vorlauftemperatur und 30 K Temperaturspitzung.

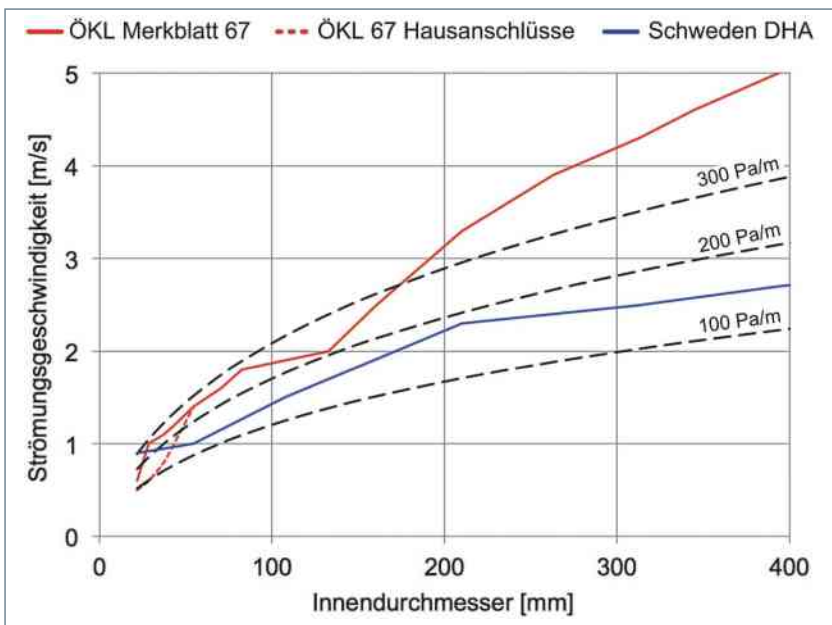


Bild 2: Maximale Strömungsgeschwindigkeit nach ÖKL 67 [3] und DHA Schweden im Vergleich zu Druckverlusten von 100 Pa/m, 200 Pa/m und 300 Pa/m (eigene Berechnungen).

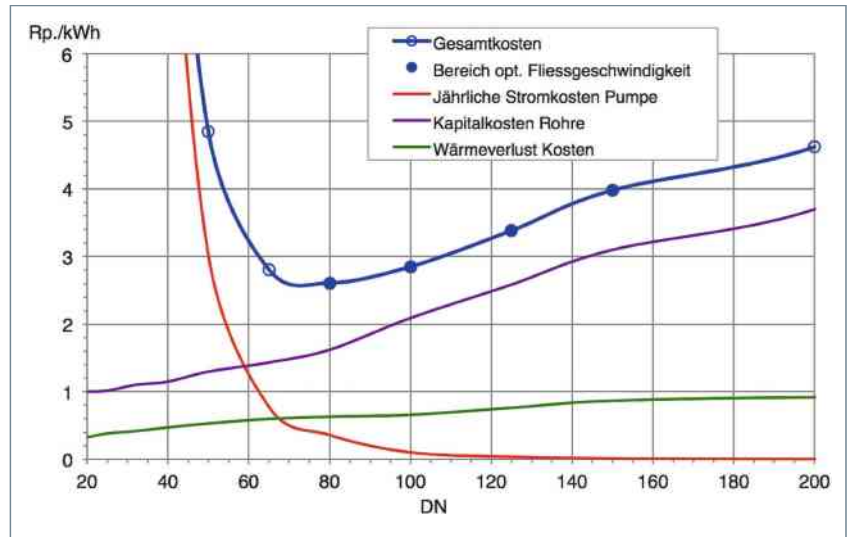
triebsdauer des Netzes bestimmt. Der Druckverlust ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit, die zur Vermeidung von Kavitation und Lärm auf einen vom Durchmesser abhängigen Maximalwert nach Tabelle 3 begrenzt wird. Für den Referenzfall wird ein Worst Case für die Stromkosten mit einem Netzbetrieb mit 8760 Vollbetriebsstunden angenommen. Bei geregelten Netzen wird der Volumenstrom bedarfsgerecht reduziert, wobei die theoretische Pumpleistung bei halbem Volumenstrom auf einen Viertel sinkt. Aufgrund von Erfahrungswerten wird als realitätsnaher oder hier optimistischer Wert damit gerechnet, dass sich die Pumpleistung proportional zur Vollbetriebsstundenanzahl der Wärmeabnehmer reduziert.

**2.3 Netzdimensionierung**

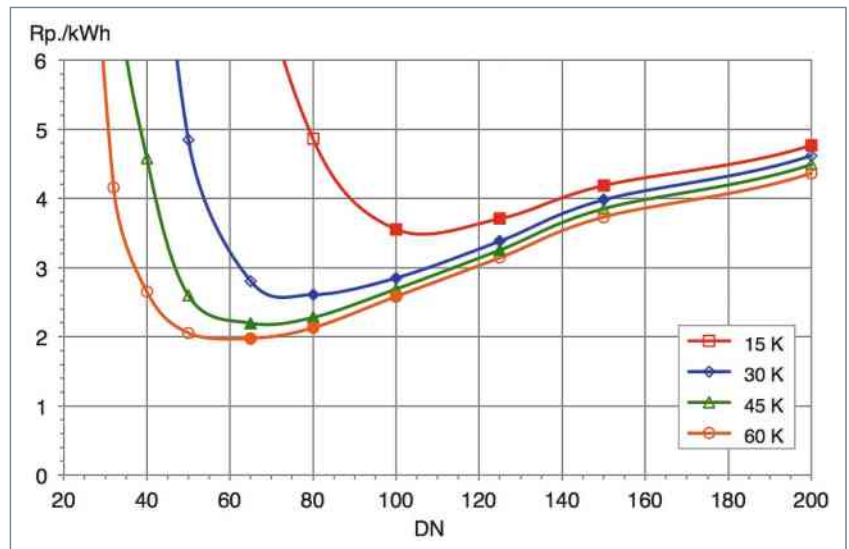
Für einen durch die Leistung und die Temperaturspreizung bestimmten Volumenstrom verbleibt der Rohrdurchmesser als Auslegungsparameter zur Netzdimensionierung. Als Bedingung für den Mindestdurchmesser dient die in Tabelle 3 eingeführte Limitierung der Fließgeschwindigkeit. Alternativ kommen auch Branchenempfehlungen aus Schweden infrage [1], während in der Schweiz eine Begrenzung des Druckverlusts auf 150 Pa/m bis 200 Pa/m für Dauerbetrieb [4] sowie 250 Pa/m für maximal 500 Stunden pro Jahr [2] empfohlen wird. Bild 2 zeigt einen Vergleich verschiedener Auslegungswerte.

**2.4 Definition des Fernwärmenetzes**

Ein Fernwärmenetz umfasst eine oder mehrere Wärmezentralen, das Verteil-



**Bild 3: Kapital-, Wärmeverlust- und Stromkosten der Wärmeverteilung und resultierende Gesamtkosten in Funktion des Nenndurchmessers. Die ausgefüllten Symbole zeigen den kleinsten zulässigen und die nächsten drei grösseren Nenndurchmesser.**



**Bild 4: Wärmeverteilungskosten in Funktion von DN für eine Temperaturspreizung von 30 K (Referenzfall) im Vergleich zu 15 K, 45 K und 60 K.**

**Tabelle 1: Investitionskosten in CHF pro Trassenmeter für Fernwärmenetze mit Dämmstärke DS 2. Basis Schweiz 2014 [2].**

| Nenndurchmesser DN | Kosten Rohre | Kosten Graben |         | Gesamtkosten |         |
|--------------------|--------------|---------------|---------|--------------|---------|
|                    |              | Gelände       | Strasse | Gelände      | Strasse |
| 20                 | 273          | 100           | 200     | 373          | 473     |
| 25                 | 279          | 100           | 200     | 379          | 479     |
| 32                 | 311          | 100           | 200     | 411          | 511     |
| 40                 | 329          | 100           | 200     | 429          | 529     |
| 50                 | 354          | 130           | 245     | 484          | 599     |
| 65                 | 405          | 130           | 245     | 535          | 650     |
| 80                 | 455          | 150           | 290     | 605          | 745     |
| 100                | 610          | 170           | 310     | 780          | 920     |
| 125                | 775          | 190           | 330     | 965          | 1105    |
| 150                | 957          | 200           | 375     | 1157         | 1332    |
| 200                | 1161         | 220           | 425     | 1381         | 1586    |
| 250                | 1649         | 250           | 475     | 1899         | 2124    |

netz und eine Grosszahl verteilter Wärmekunden, die durch Strahlen-, Ring- und Maschennetze versorgt werden. Um einzelne Parameter zu untersuchen, wird zuerst die Wirkung auf ein Fernwärmenetz untersucht, das nur einen Wärmekunden umfasst. Da dabei der gesamte Wärmeverbrauch am Ende der Leitung anfällt, verursacht dies höhere Investitionskosten und Verluste als ein Netz mit verteilten Wärmekunden und abnehmendem Rohrdurchmesser. In einem zweiten Schritt wird deshalb der Effekt der Netzstruktur mit gleichmässig über die Netzlänge verteilten Wärmeverbrauchern und schrittweise reduziertem Rohrdurchmesser untersucht. Für den in Tabelle 4 definierten Referenzfall wird eine Anschlussdichte von

2 MWh pro Jahr und Trassenmeter angenommen, wobei hier methodisch bedingt der Netzeingang als Bilanzgrenze dient. Wenn die Anschlussdichte auf die gelieferte Wärme bezogen wird und 10% Wärmeverluste auftreten, entspricht dies einer Anschlussdichte von 1.8 MWh/(a m), was mit dem nach QM Holzheizwerke [4] empfohlenen Mindestwert für Fernwärmenetze im Ganzjahresbetrieb (Raumwärme und Warmwasser) mit Vorlauftemperaturen von 70°C bis 90°C übereinstimmt.

### 3 Resultate

#### 3.1 Wärmeverteilerluste

Als Basis für die Betriebskosten werden die Wärmeverteilerluste berechnet und für den Referenzfall mit Dämmstärke DS 2 mit 10,5% ausgewiesen, während, DS 1 zu 13,0% und DS 3 zu 9,0% Verlusten führt [2].

#### 3.2 Wärmeverteilkosten

Bild 3 zeigt die Kapital-, Brennstoff- und Stromkosten in Funktion des Nenn-

**Tabelle 2: Annahmen für Wärme- und Strömungsverluste.**  
Für den Referenzfall dient Dämmstärke DS 2.

|   |               |
|---|---------------|
| Wärmeleitfähigkeit Dämmmaterial           | 0.026 W/(m K) |
| Dämmdicke für Dämmstärken DS 1 bis DS 3   | 30–110 mm     |
| Bodentemperatur                           | 10 °C         |
| Wärmeleitfähigkeit Boden                  | 1.2 W/(m K)   |
| Überdeckungshöhe                          | 0.6 m         |
| Wandrauigkeit Rohr                        | 0.01 mm       |
| Pumpwirkungsgrad für Strömung und Antrieb | 80 % und 90 % |

durchmessers. Für die Gesamtkosten ergibt sich ein Minimum von 2.61 Rp./kWh, das dem kleinsten noch zulässigen Nenn-durchmesser DN 80 entspricht. Der nächstkleinere Durchmesser führt mit der pessimistischen Pumpleistung zu geringfügig höheren Gesamtkosten, mit dank Regelung reduziertem Stromverbrauch verursacht er vergleichbare Kosten wie DN 80, jedoch wird dabei die zulässige Strömungsgeschwindigkeit überschritten. Der zweitkleinste zulässige Durchmesser verursacht rund 9% und der drittkleinste bereits 30% höhere Gesamtkosten als der kleinste zulässige Durchmesser.

Im Referenzfall machen die Kapitalkosten mit 62% der Gesamtkosten den dominierenden Anteil aus, gefolgt von den Brennstoffkosten mit 24% und den Stromkosten mit 14%. Bei geregelter Netzbetrieb mit 2000 Vollbetriebsstunden für die Pumpleistung werden die Stromkosten von 0.36 Rp./kWh auf knapp 0.09 Rp./kWh reduziert [2]. Die Gesamtkosten sinken dabei um rund 10% auf 2.32 Rp./kWh und der Anteil der Stromkosten auf 4%. Die Notwendigkeit zum Einsatz des kleinstmöglichen Durchmessers wird damit für geregelte Netze noch deutlich wichtiger,

# NOL

**NEUROBAT**  
INTERIOR CLIMATE TECHNOLOGIES

## Unschlagbare Effizienz für kommerzielle Liegenschaften



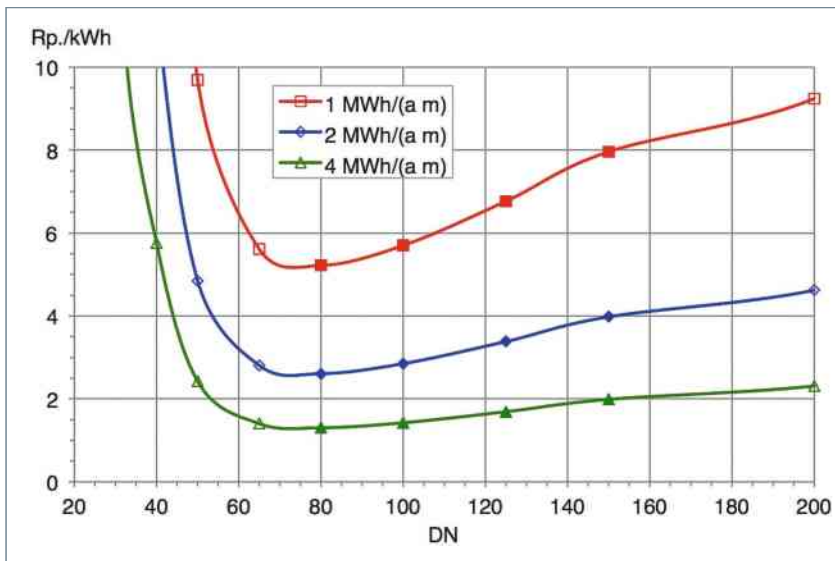
Bis zu 28% weniger Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Massiv Heizkosten sparen. NOL ist das effiziente Produkt zur professionellen Anwendung in kommerziellen Liegenschaften, Büro- und Verwaltungsgebäuden. Spielend leicht zu installieren in bestehende Heizsysteme.

[www.neurobat.net](http://www.neurobat.net)



Neurobat AG, CH-5200 Brugg  
Tel. 056 552 33 01, [office@neurobat.net](mailto:office@neurobat.net)

Die Online-Energiesparlösung  
für kommerzielle Liegenschaften



**Bild 5:** Wärmeverteilungskosten in Funktion von DN für unterschiedliche Anschlussdichten für ein Netz von 1000 m Länge. Der Referenzfall mit 1 MW und 2000 h/a entspricht einer Anschlussdichte von 2 MWh/(a m). 1 MWh/(a m) entsprechen dem gleichen Netz mit 1000 h/a, 4 MWh/(a m) entsprechen 4000 h/a.

weshalb als Basis ein pessimistischer Stromverbrauch dient.

Geänderte Randbedingungen wie ein höherer Strompreis, ein höherer Brennstoffpreis, günstigeres Kapital oder eine Veränderung der Anschlussleistung führen zu einer Verschiebung des Kostenminimums. Eine Sensitivitätsanalyse für Anschlussleistungen von 0.5 MW bis 4 MW zeigt jedoch, dass der kleinstmögliche Durchmesser in einem grossen Bereich optimal bleibt [5]. Dies gilt etwa bei einer Verdopplung des Brennstoffpreises und im Fall eines geregelten

Netzes auch bei einer Verdopplung des Strompreises. Da die Kapitalkosten dominieren, hat der Annuitätsfaktor den grössten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Eine Verdopplung des Kapitalzinsatzes von 3 % auf 6 % p.a. bei 30 Jahren erhöht die Wärmeverteilungskosten um 20 %, während zinsloses Kapital die Gesamtkosten um 20 % reduziert [2]. Die Dämmstärke hat demgegenüber einen geringen Einfluss auf die Gesamtkosten, da eine erhöhte Dämmstärke die Kapitalkosten erhöht, während die Brennstoffkosten sinken. So können mit DS 3

die Wärmeverluste um 10 % reduziert werden, allerdings steigen dabei die Gesamtkosten geringfügig, d.h. um etwas weniger als 2 % [2].

### 3.3 Einfluss der Temperaturspreizung

Die Temperaturspreizung beeinflusst die Gesamtkosten entscheidend, da sie den Massenstrom und damit den Nenn-Durchmesser bestimmt. Wie Bild 4 zeigt, ermöglicht eine Vergrösserung der Temperaturspreizung von 30 K auf 45 K die Wahl eines um einen Nenn-Durchmesser kleineren Rohres, wodurch die Kosten von 2.61 Rp./kWh auf 2.20 Rp./kWh oder um 15 % reduziert werden. Umgekehrt macht eine Halbierung von 30 K auf 15 K eine Stufe grössere Rohre erforderlich, was die Kosten auf 3.56 Rp./kWh oder um 36 % erhöht. Durch den grösseren Durchmesser werden zudem die Wärmeverluste von 10.5 % auf 13.5 % erhöht [2].

### 3.4 Einfluss der Betriebszeit und der Anschlussdichte

Für den Referenzfall werden für die Wärmeerzeugung 2000 Vollbetriebsstunden pro Jahr angenommen und das Netz 8760 Stunden pro Jahr betrieben. Da die absoluten Wärmeverluste unabhängig vom Wärmeverbrauch sind, führt eine Verdopplung der Vollbetriebsstunden der Wärmeerzeugung zu einer Halbierung der spezifischen Wärmeverluste. Bei sonst unveränderten Bedingungen ist zudem die Anschlussdichte proportional zur Vollbetriebsstundenzahl der Wärmeerzeugung. Entsprechend sind die Wärmeverteilungskosten umgekehrt proportional zur Anschlussdichte oder den Vollbetriebsstunden für die Wärmeerzeugung. Dies ist in Bild 5 dargestellt, wobei die Kosten für den Referenzfall sowie bei halbiertes und verdoppelter Anschlussdichte abgebildet sind.

### 3.5 Einfluss der Netzlänge

Wenn die Anschlussleistung durch Verlängerung des Netzes in eine Richtung bei gleicher Anschlussdichte vergrössert wird, muss auch der Rohrdurchmesser entsprechend vergrössert werden. Im Fall einer Verdopplung der Leistung auf 2 MW und 2000 m ist zum Beispiel von DN 80 auf DN 100 zu wechseln. Im pessimistischen Fall mit konstantem Durchmesser steigen dadurch die Wärmeverteilungskosten von 2.61 Rp./kWh auf 3.47 Rp./kWh oder um 32 % (Tabelle 5). Dies ist eine Folge der

**Tabelle 3:** Nenn-Durchmesser DN mit effektiven Durchmessern für KMR und maximale Fließgeschwindigkeiten nach ÖKL [3] für Haupt- und Zweigleitungen

| Nenn-Durchmesser | Innendurchmesser | maximale Fließgeschwindigkeit |
|------------------|------------------|-------------------------------|
| DN               | [mm]             | [m/s]                         |
| 20               | 21.6             | 0.6                           |
| 25               | 28.5             | 1.0                           |
| 32               | 37.2             | 1.1                           |
| 40               | 43.1             | 1.2                           |
| 50               | 54.5             | 1.4                           |
| 65               | 70.3             | 1.6                           |
| 80               | 82.5             | 1.8                           |
| 100              | 107.1            | 1.9                           |
| 125              | 132.5            | 2.0                           |
| 150              | 160.3            | 2.5                           |
| 200              | 210.1            | 3.3                           |
| 250              | 263.0            | 3.9                           |
| 300              | 312.7            | 4.3                           |
| 350              | 344.4            | 4.6                           |
| 400              | 393.8            | 5.0                           |

deutlich erhöhten Kapitalkosten und des knapp verdoppelten Stromverbrauchs, während die Wärmeverluste und somit die Brennstoffkosten nur geringfügig steigen. Demgegenüber verursacht eine Verkleinerung auf 0.5 MW und 500 m eine Kostenreduktion auf 2.14 Rp./kWh oder um 18 % gegenüber dem Referenzfall.

Die Werte nach Tabelle 5 gelten für ein Netz mit konstantem Durchmesser. Wenn die Wärmeverbraucher gleichmässig über die Netzlänge verteilt sind, kann der Durchmesser schrittweise reduziert werden. Die Wärmeverteilungskosten können dann von 2.61 Rp./kWh auf 2.41 Rp./kWh oder um 8 % reduziert werden [5].

### 3.6 Einfluss der Netzstruktur

Für die in Tabelle 5 beschriebene Netzverlängerung steigen die Wärmeverteilungskosten mit zunehmender Netzgrösse. Diesem negativen Skaleneffekt steht der positive Skaleneffekt der Wärmeherzeugung gegenüber, der meist die Motivation zur Realisierung von Fernwärmenetzen bildet. Das Gesamtsystem weist ein theoretisches Grössenoptimum auf. Daneben ist allerdings zu beachten, dass anstelle einer linearen Netzverlängerung auch eine radiale oder sternförmige Netzerweiterung möglich ist, bei der die Wärmeverteilungskosten konstant bleiben. So weist etwa ein Netz von 2 MW, das aus zwei Strängen zu je 1 MW besteht, die Wärmeverteilungskosten des Referenzfalls von 2.61 Rp./kWh auf. Für dieses Beispiel ist also eine Anordnung der Wärmeherzeugung im Zentrum der Verbraucher vorteilhaft. Um dem negativen Skaleneffekt entgegenzuwirken, kommen für grössere Netze zudem auch Ringnetze sowie der Einsatz von Wärmeherzeugern an mehreren Standorten infrage.

## 4 Schlussfolgerungen

Für Fernwärmenetze im Leistungsreich von 0.5 MW bis 4 MW verursachen die Kapitalkosten den Hauptteil der Kosten gefolgt von den Brennstoffkosten zur Deckung der Wärmeverluste und den Stromkosten für den Netzbetrieb. Wenn die Strömungsgeschwindigkeit im Fernwärmenetz zur Vermeidung von Kavitation und Lärm begrenzt wird, zeigt sich, dass die Stromkosten für den kleinsten technisch zulässigen Durchmesser gering

**Tabelle 4: Annahmen für den Referenzfall**

| Eingabeparameter    | Anschlussleistung      | 1 MW          |
|---------------------|------------------------|---------------|
|                     | Trassenlänge           | 1000 m        |
|                     | Vollbetriebsstunden    | 2000 h/a      |
|                     | Betriebsstunden Netz   | 8760 h/a      |
|                     | Netz-Vorlauftemperatur | 80 °C         |
|                     | Temperaturspreizung    | 30 K          |
|                     | Bodentemperatur        | 10 °C         |
|                     | Dämmstärke             | DS 2          |
|                     | Strompreis             | 20 Rp./kWh    |
|                     | Brennstoffpreis        | 5.0 Rp./kWh   |
|                     | Kapitalzinssatz        | 3.0 %/a       |
|                     | Kalkulationsdauer      | 30 a          |
| Abgeleitete Grössen | Anschlussdichte        | 2.0 MWh/(a·m) |
|                     | Rücklauftemperatur     | 50 °C         |
|                     | Annuitätsfaktor        | 5.1 %/a       |
|                     | Wärmegestehungskosten  | 6.0 Rp./kWh   |

**Tabelle 5: Einfluss der Anschlussleistung und Netzlänge bei konstanter Betriebsdauer von 2000 h/a und Anschlussdichte von 2 MWh/(a·m) und optimalem DN [5]. \*Wert für Netz mit verteilten Verbrauchern und schrittweise reduziertem DN.**

| Fernwärmenetz                | 0.5 MW<br>500 m<br>DN 65 | 1 MW<br>1000 m<br>DN 80 | 2 MW<br>2000 m<br>DN 100 |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Kosten in Rp./kWh            |                          |                         |                          |
| Stromkosten                  | 0.11                     | 0.36                    | 0.72                     |
| Kapitalkosten                | 1.43                     | 1.62                    | 2.09                     |
| Brennstoffkosten             | 0.60                     | 0.63                    | 0.66                     |
| Wärmeverteilungskosten total | 2.14                     | 2.61 (2.41*)            | 3.47                     |

sind im Vergleich zu den Kapital- und Brennstoffkosten. Bei definierter Anschlussleistung und Netzlänge können die Gesamtkosten deshalb durch Wahl des kleinsten zulässigen Nenn-durchmessers minimiert werden. Für ein Fernwärmenetz von 1 MW Leistung, 1 km Trassenlänge und 2000 Vollbetriebsstunden pro Jahr, was einer Anschlussdichte von 2 MWh pro Jahr und Trassenmeter entspricht, ergeben sich Wärmeverteilungskosten von 2.61 Rp./kWh für einen konstanten Rohrdurchmesser und einen pessimistischen Stromverbrauch mit einer Pumpleistung mit 8760 Vollbetriebsstunden pro Jahr.

Für ein gegebenes Netz verhalten sich die Wärmeverteilungskosten umgekehrt proportional zur Anschlussdichte. Die Anschlussdichte ihrerseits ist proportional zur Vollbetriebsstundenzahl der Wärmeherzeugung. Gegenüber dem pessimistischen Referenzfall können die Kosten durch Regelung des Volumenstroms im Beispiel um rund 10 % und durch schrittweise Reduktion der Rohrdurchmesser um weitere 8 % reduziert werden. Demgegenüber wird

die an die Verbraucher zu liefernde Wärme noch um die Netzverluste reduziert. Diese betragen typischerweise um 10 %, sodass die zwei pessimistischen Annahmen durch die Netzverluste teilweise kompensiert werden.

Während für die Kosten von Wärmeherzeugern ein positiver Skaleneffekt auftritt, ist eine lineare Netzerweiterung mit einem negativen Skaleneffekt verbunden. Für das Gesamtsystem existiert deshalb ein theoretisches Grössenoptimum. ■

### \*Zu den Autoren:

Prof. Dr. Thomas Nussbaumer ist Inhaber des Ingenieurbüros Verenum in Zürich und Professor für Erneuerbare Energien an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw

BSc Stefan Thalman ist BSc in Maschinentechnik und Projektleiter Fernwärme und Qualitätsbeauftragter Holzheizwerke im Ingenieurbüro Verenum in Zürich.



Die Studie wurde unterstützt vom Bundesamt für Energie, Bern.

#### Literatur

[1] Frederiksen, S.; Werner, S.: *District Heating and Cooling*, Studentlitteratur AB, Lund 2013

[2] Nussbaumer, T.; Thalmann, S.: *Einfluss von Auslegung und Betrieb auf die Wirtschaftlichkeit von Fernwärmenetzen*, 13. Holzenergie-Symposium, Zürich 12.9.2014, 211–234

[3] Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung: *ÖKL Merkblatt-Nr. 67, 3. Ausgabe*, Wien 2016

[4] QM Holzheizwerke: *Planungshandbuch*, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing, 2. Auflage 2008

[5] Nussbaumer, T.; Thalmann, S.: *Influence of system design on heat distribution costs in district heating*, *Energy*, 101(2016) 496–505

#### Basiskurs zur Planung von Fernwärmenetzen

Das Expertenteam QM Fernwärme bietet im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE im Frühling 2017 einen Basiskurs zur Planung von Fernwärmenetzen an. Der Kurs behandelt das Vorgehen zur Planung von Fernwärmenetzen auf Basis des 200-seitigen «Planungshandbuch Fernwärme». Das Handbuch wird an die Kursteilnehmer abgegeben und nach Durchführung der Kurse veröffentlicht. Geplant sind ein bis drei eintägige Basiskurse zwischen April 2017 und Juni 2017.

**Zielgruppe:** Heizungsingenieure und Heizungsplaner sowie Unternehmer und Betreiber, die mit der Planung von Fernwärmenetzen konfrontiert sind.

**Kursdauer:** 1 Tag.

#### Termine:

Do, 6. April 2017 in Bern (Kurs 1)

Do, 4. Mai 2017 in Aarau (Kurs 2)

Di, 6. Juni 2017 in Olten (Kurs 3)

Informationen zum Planungshandbuch sowie zu den bevorstehenden Kursen:  
[www.qmfernwaerme.ch](http://www.qmfernwaerme.ch) · Weiterbildung

QM Fernwärme

c/o Verenum, 8006 Zürich

Kontakt: Stefan Thalmann, Tel. 044 377 70 73

[info@qmfernwaerme.ch](mailto:info@qmfernwaerme.ch)

[www.qmfernwaerme.ch](http://www.qmfernwaerme.ch)

# «Das intelligente und energieeffiziente Gebäude» EXTRA 2017

Innovationen in der Energie- und Gebäudeautomation

## Gemeinschaftsausgabe von HK-Gebäudetechnik und Elektrotechnik ET

Unsere Leser sind die relevanten Entscheidungsträger in der Haus-, Gebäudetechnik- und Elektrotechnikbranche, Anwender und Installateure, Lieferanten und Hersteller, Ingenieure und Planer.

#### Inhalte / Themen:

- Energie: Wärme / Strom
- Lüftung-, Klima-, Kältetechnik
- Sanitärtechnik, Wohnen (Bad und Küche)
- Trends und Innovationen in der Gebäudeautomation
- Gebäudesteuerungen
- Spannende, aussagekräftige Anwenderberichte

#### Weitere Infos

Auflage: 16 000 Exemplare (14. Ausgabe)  
Anzeigenschluss: 22. Juni 2017 / Erscheinungstag: 7. Juli 2017  
Kontakt: Rolf Niederberger, Tel. 058 200 56 18,  
[rolf.niederberger@azmedien.ch](mailto:rolf.niederberger@azmedien.ch)



—hk gebäudetechnik

—ET  
ELEKTROTECHNIK