

Optimierung von Fernwärmenetzen

Stefan Thalmann¹, Andres Jenni², Thomas Nussbaumer¹

¹Verenum, Zürich, ²Ardens GmbH, Liestal

Zusammenfassung

Die im Beitrag vorgestellte Methode zur Analyse der Wärmeabnehmer von Fernwärmenetzen basiert auf physikalischen Zusammenhängen und ist von früheren Anwendungen bekannt. Mit der Methode können die qualitative Güte der Wärmeübertragung der einzelnen Wärmeabnehmer beurteilt und daraus Aussagen zum Optimierungspotenzial abgeleitet werden. Die Methode und das Vorgehen werden beschrieben und können von Fernwärmenetzbetreibern bei notwendigen Vorkenntnissen selbst oder andernfalls mit Unterstützung durch eine Fachperson angewendet werden. Eine ökonomische Betrachtung zeigt das wirtschaftliche Potenzial auf, falls konkrete Optimierungsmassnahmen umgesetzt werden.

Eine Analyse der Wärmeabnehmer wird exemplarisch an zwei Fernwärmenetzen durchgeführt. In beiden Fällen wurde je ein Wärmeabnehmer identifiziert, der die Effizienz des Fernwärmenetzes in starkem Mass negativ beeinflusste und somit ein grosses Verbesserungspotenzial versprach. Eine Begutachtung vor Ort bestätigte in beiden Fällen das Optimierungspotenzial. Auf Basis dieser Ist-Situation wurden Optimierungsmassnahmen abgeleitet, die auch zu einem grossen Teil umgesetzt und begleitet wurden.

Mit den umgesetzten Massnahmen konnte bei beiden Fernwärmenetzen die gesamte primäre Rücklauftemperatur um 1.5 K bzw. um 1.2 K abgesenkt werden. Eine ökonomische Betrachtung ergibt für den Fall, dass lediglich der Effekt der grösseren Temperaturspreizung bewertet wird, eine Amortisationszeit für die Investitionen von 2.33 bzw. 3.85 Jahren bei einer Verbesserung der Kapitalrendite um 22 % bzw. 3.5 %. Diese Massnahmen wurden bei beiden Anlagen bereits umgesetzt.

Da die vergrösserte Temperaturspreizung zudem eine Kapazitätserhöhung der Anschlussleistung ermöglicht, besteht durch die Optimierung der Wärmeabnehmer zusätzlich die Möglichkeit zum Anschluss weiterer Wärmeabnehmer. Wenn dieses Erweiterungspotenzial ausgeschöpft wird, resultieren für die untersuchten Optimierungsmassnahmen Amortisationszeiten von 14.4 bzw. 6.11 Jahren, während sich die Kapitalrenditen um 121 % bzw. um 32 % erhöhen. Die Kapazitätserhöhung wirkt sich somit in beiden Fällen besonders stark auf die Rendite aus.

1 Einleitung

Fernwärmenetze ermöglichen eine Erweiterung der Nutzungsmöglichkeiten von Abwärme und von erneuerbaren Energieträgern wie Holz oder Umgebungswärme und wurden deshalb in den letzten Jahrzehnten in vielen Ländern in Europa realisiert [1]. Zusätzlich kann der Einsatz einzelner grosser Wärmeerzeuger im Vergleich zu dezentralen Kleinanlagen Vorteile in Bezug auf Komfort und Luftreinhaltung bieten.

Den Vorteilen der Fernwärme stehen die zusätzlichen Kosten für das Fernwärmenetz und die Wärmeverluste des Netzbetriebs gegenüber. Ergebnisse von früheren Untersuchungen zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit von Fernwärmenetzen durch Auslegung und Betriebsweise des Netzes beeinflusst wird, wobei folgende Parameter am wichtigsten sind ([2], [3]):

1. Die Effizienz der Wärmeerzeugung wird vor allem durch die **Temperaturspreizung** sowie das absolute **Temperaturniveau** beeinflusst.
2. Die Investitionskosten und die Netzverluste werden vor allem durch die **Durchmesser** der Verteilrohre (also die Dimensionierung des Wärmeverteilnetzes) beeinflusst.

Wie eine Praxiserhebung an 52 Fernwärmenetzen zeigt, weisen zahlreiche Netze erhöhte Rücklauftemperaturen auf [4]. Dies erhöht den Endenergieverbrauch der Wärmeerzeugung und es reduziert zudem die Kapazität des Fernwärmenetzes. Durch Erhöhung der Temperaturspreizung können somit die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit entsprechender Fernwärmenetze deutlich verbessert werden. Dadurch kann die Anschlussleistung erhöht werden oder bei gleicher Anschlussleistung sinken der Pumpaufwand und die Wärmeverluste.

2 Zielsetzung

Mit dem Ziel, die primäre Rücklauftemperatur zu senken, soll das im vorliegenden Bericht vorgestellte Verfahren zur Analyse der Wärmeabnehmer an ausgewählten Fernwärmenetzen exemplarisch angewendet werden.

Mit einer Erfolgskontrolle soll die technische Umsetzung bewertet und mit einer wirtschaftlichen Betrachtung anhand der Annuitätenmethode sollen die ökonomischen Auswirkungen abgeschätzt werden.

Das Verfahren soll für die Anwendung durch Fernwärmenetzbetreiber, Contractor oder externe Fachpersonen ausführlich und verständlich dokumentiert werden.

3 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 werden kann. 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 werden. Als methodischer Ansatz wird deshalb das übertragene Wasservolumen der Wärmeabnehmer untersucht und eine Bewertung der einzelnen Abnehmer erstellt. Dieses Vorgehen wurde von einem schwedischen Planungsbüro an zahlreichen Fernwärmenetzen eingesetzt [5] und unter anderem auch in der Schweiz angewendet [6]. Auf Basis einer Bewertung der einzelnen Wärmeabnehmer können in der Folge Massnahmen abgeleitet werden, um durch Optimierung des oder der schlechtesten Wärmeabnehmer die Kapazität des Netzes zu erhöhen und die Effizienz des Systems zu verbessern.

Um zu bestimmen, welche Übergabestationen den grössten Einfluss auf die gesamte primäre Rücklauftemperatur im Netz haben, kann bei bestehenden Fernwärmenetzen mit einer Analyse der Wärmeabnehmer der Mehrverbrauch ausgewiesen werden. Der Mehrverbrauch ist ein Mass für die Wassermenge, die im Vergleich zu derjenigen bei Referenz-Temperaturspreizung zusätzlich durch die Übergabestation fliesst. Der Einfluss jedes einzelnen Wärmeabnehmers auf die Rücklauftemperatur zeigt auf, um wie viel die gesamte primäre Rücklauftemperatur gesenkt werden kann, wenn dieser einzelne Wärmeabnehmer mit Referenz-Temperaturspreizung betrieben wird. Der Wärmeabnehmer mit dem grössten Mehrverbrauch hat den grössten Einfluss auf die primäre Rücklauftemperatur, sodass Massnahmen bei diesem schlechtesten Wärmeabnehmer am effektivsten sind. Als Resultat der Analyse werden mit dieser einfachen Methode in einem ersten Schritt die Wärmeabnehmer in einem Fernwärmenetz bewertet und klassifiziert und die schlechtesten identifiziert. In einem zweiten Schritt werden die schlechten Wärmeabnehmer vor Ort begutachtet, um Optimierungsmassnahmen abzuleiten.

Bei einer deutlichen Unterschreitung der Referenz-Temperaturspreizung kann bereits ein einzelner Wärmeabnehmer das gesamte Netz relevant verschlechtern, auch wenn dieser nur eine kleine Leistung aufweist. Obwohl grosse Wärmeabnehmer für die Wirtschaftlichkeit eines Fernwärmenetzes grundsätzlich wichtiger sind als kleine, sind für die Analyse der Netzqualität deshalb sämtliche Wärmeabnehmer zu berücksichtigen.

3.1 Grundlagen

Basis für die Berechnung des Mehrverbrauches und des Einflusses auf die Rücklauftemperatur bildet die Gleichung für den Wärmestrom (Wärmebedarf pro Leistung). Wenn die Dichte und die spezifische Wärmekapazität des Wassers im betrachteten Temperaturbereich als konstant angenommen werden, ist der Wärmestrom allein vom Volumenstrom und der Temperaturspreizung abhängig. Mit Bezeichnungen nach Tabelle 1 und Tabelle 2 gilt :

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T = \dot{V} \rho c_p \Delta T \quad (1)$$

Anhand von Wärmezählerdaten kann die Güte der Übergabestationen bewertet werden. Dazu sind für einen bestimmten Zeitraum folgende Werte von den einzelnen Wärmezählern der Wärmeabnehmer und vom Hauptwärmezähler der Wärmeverteilung in der Wärmezentrale aufzuzeichnen (Bild 1):

- Wärmemenge Q in MWh im Betrachtungszeitraum
- Wasservolumen V in m³ im Betrachtungszeitraum.

Für eine Beurteilung der Wärmeabnehmer sollte die Datenaufzeichnung mindestens über ein Quartal in der Heizperiode erfolgen. Noch besser ist eine kontinuierliche Beurteilung mit einer monatlichen Auswertung über das ganze Jahr.

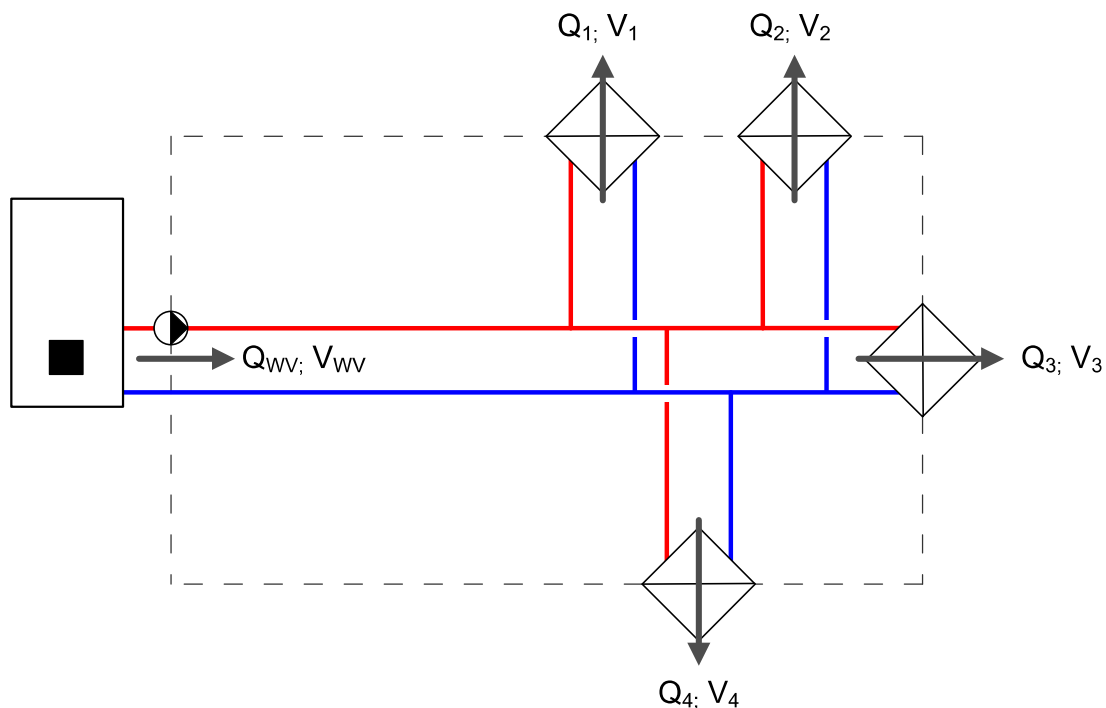


Bild 1 Darstellung der Kennwerte für die Aufzeichnung der Wärmezählerdaten für ein Fernwärmenetz mit einem Wärmeerzeuger mit Hauptgruppe für die Wärmeverteilung (WV) und vier Wärmekunden.

3.2 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 aus der Differenz des gemessenen Volumens und dem Volumen bezogen auf eine Referenz-Temperaturspreizung wie folgt:

$$\begin{aligned} V_{i,MV} &= \Delta V_{i,WZ} - V_{i,REF} \\ \text{Mehrverbrauch} &= \text{WZ-Daten} - \text{Referenz Wert} \end{aligned} \quad (2)$$

Die gemessene Volumendifferenz für den Wärmeabnehmer i im betrachteten Zeitraum (Bild 2) berechnet sich aus dem Stand des Wärmezählers zum End-Zeitpunkt (t_1) abzüglich dem Stand zum Start-Zeitpunkt (t_0) wie folgt:

$$\Delta V_{i,WZ} = V_{i,WZ}(t_1) - V_{i,WZ}(t_0) \quad (3)$$

Das ideale Volumen für den Wärmeabnehmer i im betrachteten Zeitraum bei der Referenz-Temperaturspreizung berechnet sich aus dem Verhältnis der gemessenen Wärmemengendifferenz für den Wärmeabnehmer i im betrachteten Zeitraum zu der Dichte des Wassers, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der Referenz-Temperaturspreizung:

$$V_{i,REF} = \frac{\Delta Q_{i,WZ}}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T_{REF}} \quad (4)$$

Die gemessene Wärmemengendifferenz 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:

$$\Delta Q_{i,WZ} = Q_{i,WZ}(t_1) - Q_{i,WZ}(t_0) \quad (5)$$

Die Referenz-Temperaturspreizung sollte auf der maximalen Temperaturspreizung der Temperaturangaben von Vor- und Rücklauf der Technischen Anschlussvorschriften (TAV) beruhen. Sind keine TAV vorhanden, kann als Referenz-Temperaturspreizung ein hoher, technisch machbarer Wert als Referenz gewählt werden.

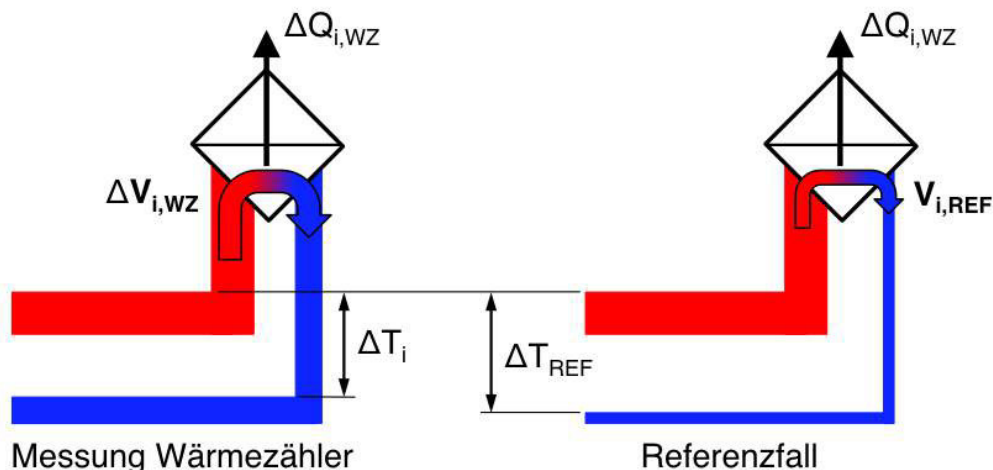


Bild 2 Darstellung des Mehrverbrauchs für einen Wärmeabnehmer durch den Vergleich der Wasservolumen aus den Wärmezählerdaten und bei einer Referenz-Temperaturspreizung.

3.3 Einfluss auf die Rücklauftemperatur

Eine alleinige Bewertung des Mehrverbrauchs genügt nicht zur Beurteilung der Notwendigkeit einer Optimierung. Von besonderem Interesse ist daneben der Einfluss, den die Optimierung einer einzelnen Übergabestation auf die Temperatur des gesamten primären Rücklaufs hat. Der Einfluss auf die Rücklauftemperatur wird dazu für jeden Wärmeabnehmer durch eine Temperaturdifferenz dargestellt, die beschreibt, um wieviel die Temperatur des gesamten primären Rücklaufes sinkt, wenn dieser Wärmeabnehmer auf die Referenz-Temperaturspreizung optimiert wird. Diese Temperaturdifferenz berechnet sich aus der Differenz der mittleren Temperaturspreizung aus den Wärmezählerdaten des Hauptzählers und der mittleren Temperaturspreizung mit optimierter Übergabestation des Wärmeabnehmers wie folgt (Bild 3):

$$\Delta T_{RL} = \Delta T_{IST} - \Delta T_{i,REF} \quad (6)$$

Die mittlere Temperaturspreizung aus den Wärmezählerdaten des Hauptzählers berechnet sich aus dem Verhältnis der gemessenen Wärmemengen-Differenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum zu der Dichte des Wassers, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der gemessenen Volumendifferenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum wie folgt:

$$\Delta T_{IST} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho \cdot c_P \cdot \Delta V_{WV,WZ}} \quad (7)$$

Die mittlere Temperaturspreizung mit optimierter Übergabestation berechnet sich aus dem Verhältnis der gemessenen Wärmemengen-Differenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum zu der Dichte des Wassers, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der Differenz der gemessenen Volumendifferenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum abzüglich dem Mehrverbrauch für den Wärmeabnehmer i wie folgt:

$$\Delta T_{i,REF} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho \cdot c_P \cdot (\Delta V_{WV,WZ} - V_{i,MV})} \quad (8)$$

Die gemessene 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:

$$\Delta Q_{WV,WZ} = Q_{WV,WZ}(t_1) - Q_{WV,WZ}(t_0) \quad (9)$$

Die gemessene Volumendifferenz 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:

$$\Delta V_{WV,WZ} = V_{WV,WZ}(t_1) - V_{WV,WZ}(t_0) \quad (10)$$

Vereinfacht ergibt sich für den Einfluss auf die Rücklauftemperatur folgende Gleichung:

$$\Delta T_{RL} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho \cdot c_P} \left(\frac{1}{\Delta V_{WV,WZ}} - \frac{1}{(\Delta V_{WV,WZ} - V_{i,MV})} \right) \quad (11)$$

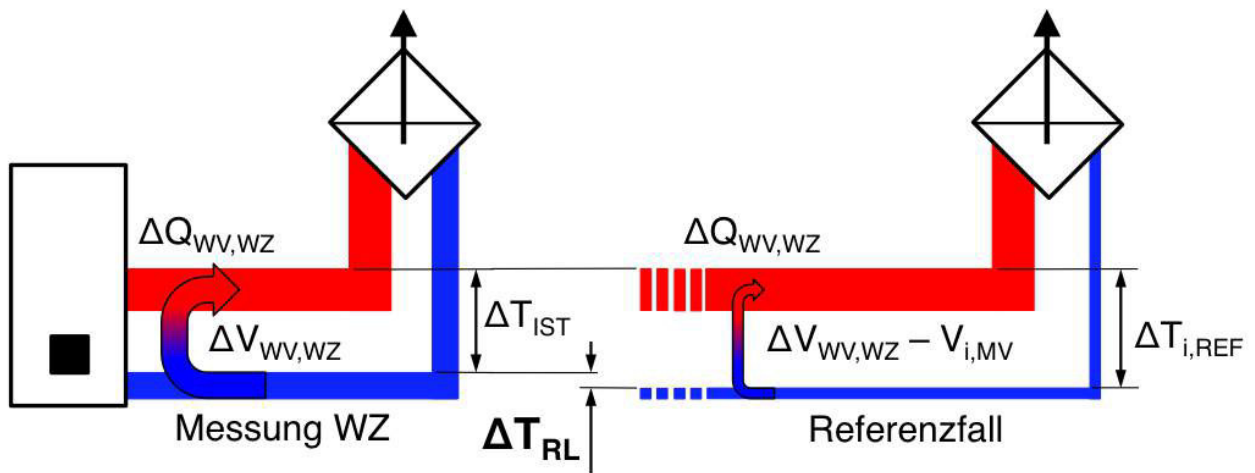


Bild 3 Darstellung der Temperaturspreizung und der Volumenströme vor Optimierung (links) und nach Optimierung (rechts) eines Wärmeabnehmers (Gleichungen 6 und 11).

Tabelle 1 Formelzeichen.

Zeichen	Bedeutung	Einheit
c_p	spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ}/(\text{kg K})$; $\text{J}/(\text{kg K})$
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
Q	Jährliche Wärmemenge	MWh/a , kWh/a
\dot{Q}	thermische Leistung	MW , kW
T	Temperatur; Teilstrang	$^{\circ}\text{C}$
t	Zeit	h
ΔT	Temperaturspreizung	K
V	Volumen	m^3 , m^3/a
ΔV	Volumenänderung (Expansionsvolumen)	m^3 , m^3/a
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s
ρ	Dichte	kg/m^3

Tabelle 2 Indizes.

Index	Bedeutung
i	Nummer Wärmeabnehmer
IST	Ist-Zustand
MV	Mehrverbrauch
P	Druck
REF	Referenz

Index	Bedeutung
RL	Rücklauf
WV	Wärmeverteilung
WZ	Wärmezähler
0	Anfang
1	Ende

4 Vorgehen

4.1 Datenerfassung und Auswertung

Datenerfassung. Die Ablesung der Wärmehzähler 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 Wärmehzählerdaten an einem zentralen Ort erfasst werden. Dies kann z.B. über einen Datenserver geschehen, der mindestens die Wärmehzählerdaten 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 Wärmehzählerdaten muss neben der Wärmemenge in kWh zwingend auch das Volumen in m³ erfasst werden. Ist kein Leitsystem oder ähnliches vorhanden, bieten sich folgende Möglichkeiten an: monatliches Ablesen der Wärmehzählerdaten vor Ort (aufwändig), quartalsweise oder saisonales Ablesen der Wärmehzählerdaten (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 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
- Ablesezeitraum Wärmehzähler Startdatum 31. Januar 2016
- Ablesezeitraum Wärmehzähler Enddatum 30. Mai 2016

Der zweite Teil umfasst einen Ausgabebereich (Bild 4) für **berechnete Größen** (blau), die aus den Eingabegrößen und den Wärmehzählerdaten bestimmt werden. Im Beispiel gilt:

- Ablesezeitraum t in Tagen 120 Tage
- Ablesezeitraum t Stunden 2880 h (relevant für die Berechnung)
- Mittlere Temperaturspreizung 25.4 K
- Gesamte Wärmemenge 1'848'043 kWh (für den Ablesezeitraum)
- Gesamte Wassermenge 63'853 m³ (für den Ablesezeitraum)
- Spezifische Wassermenge 22.2 m³/h
- Mittlere Leistung 641.7 kW (für den Ablesezeitraum)
- Mittlere freie Leistungskapazität pro K 25.3 kW/K (für den Ablesezeitraum)

Annahmen		
Referenz Temperaturspreizung	K	35
spez. Wärmekapazität	kJ/(kg K)	4.185
Dichte Wasser	kg/m ³	980
Ablesezeitraum	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 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 5). Aus diesen und den Eingabegrößen werden der Mehrverbrauch und der Einfluss auf die Rücklauftemperatur 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 3.2.
- **Einfluss auf Rücklauf:** Zeigt die Ergebnisse für den Einfluss auf die Rücklauftemperatur nach Kapitel 3.3. Zu beachten ist, dass die berechneten Werte des Einflusses auf die Rücklauftemperatur 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 Rücklauftemperatur 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	m3/t	h/t	m3/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 5 Excel-Datei zur Auswertung von Mehrverbrauch und Einfluss der Rücklauftemperatur. Abgebildet sind die zehn schlechtesten Wärmeabnehmer eines fiktiven Fernwärmenetzes.

4.2 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 Rücklauftemperatur 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 Rücklauftemperatur von gut 3 K auf. Im Vergleich dazu weisen die weiteren Wärmeabnehmer nur noch einen geringen Einfluss auf die Rücklauftemperatur 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.

Für einen zu hohen Mehrverbrauch in einer Übergabestation kann es viele Gründe geben. Während der Installation oder Reparatur können defekte oder falsch ausgelegte Komponenten eingebaut worden sein, es können Defekte aufgrund von Alterung oder Verschleiss sowie Störungen durch ungeeignete Parametereinstellungen in der Mess- und Steuerungstechnik (MSR-Technik) auftreten. Fehlfunktionen durch Komponenten, Auslegung oder Betriebsbedingungen können in folgende drei Kategorien eingeteilt werden:

- sekundärseitige Wärmeverteilung
- Brauchwarmwassererwärmung
- Übergabestation (primär- und sekundärseitig).

Nach einer Untersuchung der Internationalen Energieagentur [5] konnten etwa 60 % der Störungen der sekundärseitigen Wärmeverteilung zugeschrieben werden. Rund 30 % waren die Folge von Mängeln bei der Brauchwarmwassererwärmung und die restlichen standen im Zusammenhang mit Fehlern in der Übergabestation. Die häufigsten Ursachen für Fehlfunktionen nach [5] decken sich mit denjenigen der hier untersuchten Abnehmer. Dies sind:

- defekte Ventilsteuerung oder undichtes Ventil
- falsche oder ungeeignete Regelparametereinstellungen (z.B. Sollwert sekundäre Vorlauftemperatur \geq Istwert primäre Vorlauftemperatur)
- fehlerhafte hydraulische Einbindung des Wärmeabnehmers (primär- und sekundärseitig), wobei auf folgende ungeeignete Einbauten zu achten ist:
 - 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.

4.3 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.

5 Ergebnisse aus der praktischen Umsetzung

5.1 Optimierungsmassnahmen und Ergebnisse

Die gezeigten Ergebnisse basieren auf der Begleitung von folgenden Anlagen im Zeitraum zwischen 2014 und 2016:

Anlage 1: AVARI AG, Wärmeverbund in Wilderswil / Interlaken (BE)

Anlage 2: EBL Wärme AG, Wärmeverbund in Saanen-Gstaad (BE)

Anlage 3: Heizverbund Untere Kniri AG, Wärmeverbund in Stans (NW).

Bei den Anlagen 1 und 3 konnte jeweils ein Wärmeabnehmer optimiert und die Wirkung bewertet werden. Die Ergebnisse sind im Bericht [7] detailliert beschrieben.

Bei der **Anlage 1** ist kein übergeordnetes Leitsystem vorhanden. Die Wärmezähler werden quartalsweise teils mit Funksendern und teils manuell abgelesen. Mit der Funkablesung ist es möglich auch die Volumenstände zu erfassen. In der Wärmezentrale gibt es für drei Teilnetze (Interlaken, Wilderswil und Flugplatz) einen Hauptwärmezähler, der von Hand abgelesen wird. Untersucht wird der Teilstrang Interlaken, da dieser der grösste ist und das grösste Ausbaupotenzial aufweist. Basierend auf der Auswertung des Mehrverbrauchs wurden zwei Wärmeabnehmer für eine Begehung ausgewählt. Weitere Grossverbraucher im Teilstrang Interlaken sind im betrachteten Zeitraum noch nicht mit Funksendern ausgerüstet, weshalb deren Einfluss in Folgearbeiten zu bewerten ist. Bei einem Wärmabnehmer wurden folgende Mängel festgestellt:

- sehr kleine Temperaturspreizung bei der Übergabestation (Sekundärseite 3 K und Primärseite 6 K)
- sekundärseitige Einbindung nicht gemäss aktuellem Prinzipschema umgesetzt
- die Regelventile im Primärkreis der Übergabestation funktionierten nicht zuverlässig
- eine Motor-Absperrklappe schloss nicht, so dass einer der beiden Plattenwärmeübertrager der Übergabestation sekundärseitig dauernd durchströmt wurde
- der sekundärseitige Magnetflussfilter für die Plattenwärmeübertrager der Übergabestation wurde nicht korrekt gewartet, sodass Verschmutzung und Verschlechterung der Wärmeübertragung auftraten.

Während dem Herbst/Winter 2015/16 wurden beim Wärmeabnehmer folgende Optimierungsmassnahmen und Reparaturen umgesetzt:

- sekundärseitige Dreiwegeinspritzventile mit Drosselblenden ausgerüstet
- sekundärseitige Warmwasser-Ladeleitung mit einem Motor-Durchgangsventil ausgerüstet
- Magnetflussfilter und Plattenwärmeübertrager gereinigt und Instand gesetzt. Ein Plattenwärmeübertrager konnte wegen starker Verschmutzung nicht einwandfrei gereinigt werden und muss ersetzt werden.
- beide primärseitigen Kombiventil-Antriebe ersetzt (1. Dezember 2015)
- zweiter Plattenwärmeübertrager ersetzt und in Betrieb genommen (11. Februar 2016).

Bei diesem Wärmeabnehmer wurden zwischen dem 10. September 2015 und dem 26. Juni 2016 wurden regelmässig Wärmezählerdaten (Energienmenge in MWh, Wassermenge in m³ und Durchfluss in m³/h) und Temperaturen der Übergabestation (primär- und sekundärseitige Vor- und Rücklauftemperaturen in °C) notiert. Bild 6 zeigt den Einfluss der Optimierungsmassnahmen deutlich. Insbesondere hat der Ersatz der beiden primärseitigen Kombiventil-Antriebe in der Übergabestation vom 1. Dezember 2015 einen erheblichen Einfluss auf die Temperaturspreizung und die primäre Rücklauftemperatur. Nach Ersatz der Kombiventil-Antriebe beträgt die mittlere Rücklauftemperatur nur noch 58.1°C statt 81.1°C. Die mittlere Temperaturspreizung wurde von 8.7 K auf 31.6 K mehr als verdreifacht (Faktor 3.6).

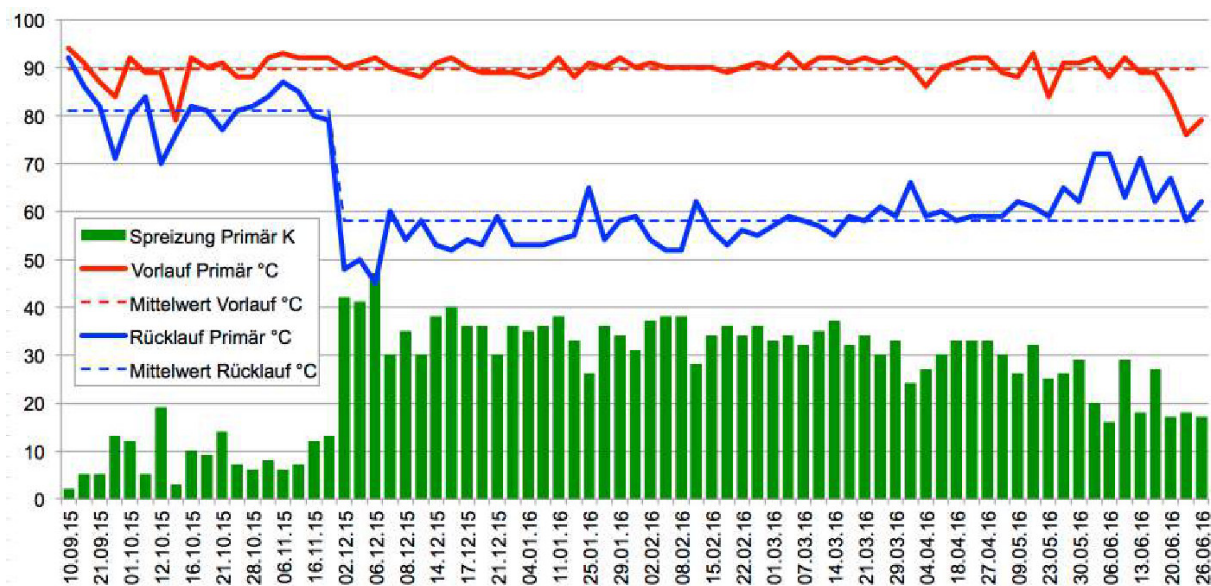


Bild 6 Wärmezählerdaten und Temperaturen der Übergabestation für den Zeitraum vom 10. September 2015 bis 26. Juni 2016.

Bei der **Anlage 3** konnten dank dem übergeordneten Leitsystem die benötigten Daten rückwirkend ausgelesen werden. Basierend auf der Auswertung des Mehrverbrauchs wurden für eine Begehung vor Ort drei Wärmeabnehmer im West-Strang und zwei Wärmeabnehmer im Ost-Strang ausgewählt. Die folgenden Ausführungen zeigen die Ergebnisse für den West-Strang, da in diesem ein Wärmeabnehmer optimiert werden konnte, der im betrachteten Zeitraum eine mittlere Temperaturspreizung von lediglich 5.5 K aufwies. Ein defekter Stellmotor des primären Regelventils hatte zur Folge, dass praktisch konstant primäres Vorlaufwasser ungekühlt in den Rücklauf geflossen ist. Mit dem Ersatz des Stellmotors konnte die Temperaturspreizung umgehend verbessert werden. Im Zeitraum vom 31. Dezember 2015 – 26. April 2016 betrug die mittlere primäre Temperaturspreizung 24.2 K. Der Wert hat sich gegenüber der ersten Beurteilung somit mehr als vervierfacht (Faktor 4.4).

Die Optimierungsmassnahmen zeigen, dass sich die primäre mittlere Temperaturspreizung des Fernwärmenetzes bei der Anlage 1 um ungefähr 1.5 K und bei der Anlage 3 um ungefähr 1.2 K verbessert hat. Daraus können folgende positive Auswirkungen abgeleitet werden:

- Bei gleicher Abnahmeleistung reduziert sich der Volumenstrom und daraus ergibt sich ein **geringerer Strombedarf** für die Netzpumpen.
- Bei gleicher Abnahmeleistung resultieren aus der verbesserten Temperaturspreizung geringfügig reduzierte Wärmeverluste und daraus ein **geringerer Brennstoffeinsatz**.
- Durch Absenkung der primären Rücklauftemperatur kann der **Nutzungsgrad** einer **Abgaskondensation erhöht** werden (betrifft Anlage 3). Wenn die Anlage bereits im Kondensationsbereich arbeitet, steigt der Nutzungsgrad nach [8] pro Kelvin Temperaturabsenkung um rund 0.75 %.
- Mit einer vergrösserten Temperaturspreizung wird die **übertragbare Wärmeleistung des Netzes erhöht**. Bei der Anlage 1 erhöht sich die im Auslegepunkt freie Leistungskapazität um knapp 900 kW und bei der Anlage 3 erhöht sich die im Auslegepunkt freie Leistungskapazität um knapp 100 kW.

5.2 Wirtschaftliche Betrachtung

Die Bewertung des ökonomischen Effekts der Optimierungsmassnahmen erfolgt anhand der Annuitäten-Methode. Als Basis wird eine Ist-Situation (IST) vor Optimierung angenommen. Diese wird mit dem unveränderten Fernwärmenetz verglichen, das mit vergrösserter Temperaturspreizung und tieferer Rücklauftemperatur betrieben und als „Neu A“ bezeichnet wird. Zusätzlich wird die Situation betrachtet, bei der das Netz um die durch die Optimierung erzielte Kapazitätserhöhung erweitert wird, was als „Neu B“ bezeichnet wird. Tabelle 3 zeigt die Annahmen für die Betrachtung bei Anlage 1 und Anlage 3.

Zur Beurteilung des ökonomischen Effekts interessieren die Entwicklung des Geschäftsergebnisses, die Kapitalrendite und die Rückzahldauer (Return on Investment, RoI) der getätigten Investitionen. Ein positives Geschäftsergebnis ergibt sich, wenn die jährlichen Erträge grösser sind als die jährlichen Kosten. Die Kapitalrendite ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Geschäftsergebnis und den gesamten Investitionskosten und wird in Prozent pro Jahr angegeben. Die Rückzahldauer in Jahren wird bestimmt, indem die Veränderung des Geschäftsergebnisses ins Verhältnis zu den getätigten Investitionen der Optimierungsmassnahme gesetzt wird, sofern im optimierten Zustand ein besseres Geschäftsergebnis als in der Ist-Situation erzielt wird. Für die Kapazitätserweiterung im Fall „Neu B“ wird der Fall betrachtet, dass der Anschluss neuer Wärmekunden ab der bestehenden Stammleitung erfolgt bzw. nur Hausanschlussleitungen gebaut werden müssen. Die detaillierten Berechnungen sind in [7] beschrieben.

Tabelle 3 Annahmen für die wirtschaftliche Betrachtung. BG = Bezugsgrösse.

¹ Anschlussgebühr, Grund- und Wärmepreis gemäss [4]

² inkl. Economizer

Parameter	Einheit	Anlage 1	Anlage 3
Vollbetriebsstundenzahl Wärmeabnehmer	h/a	2'000	2'200
Gleichzeitigkeitsfaktor	–	0.85	0.85
Spezifische Wärmebezugskosten (Anschlussgebühr, Grund- und Wärmepreis)	Rp./kWh	10.4	16.4 ¹
Spezifische Investitionskosten Wärmeerzeugung (BG: Wärmeleistungsbedarf)	CHF/kW	440	800
Investitionskosten Abgaskondensationsanlage	CHF	–	500'000
Spezifische Investitionskosten Wärmeverteilung	CHF/m	900	1000
Annuitätsfaktor Wärmeerzeugung (25 Jahre, 3% Zins)	1/a	0.057	0.057
Annuitätsfaktor Wärmeverteilung (40 Jahre, 3% Zins)	1/a	0.043	0.043
Annuitätsfaktor Optimierungsmassnahmen (20 Jahre, 3% Zins)	1/a	0.067	0.067
Wärmeverteilverluste Netz	%	10.0%	9.0%
Jahresnutzungsgrad Wärmeerzeugung	%	90% ²	85%
Jahresnutzungsgrad Anteil Abgaskondensation	%	–	8%
Zusätzlicher Anteil Abgaskondensation bei verbessertem ΔT	%/K	–	0.75%
Wassergehalt Brennstoff (Holz)	% (kg/kg)	35%	40%
Brennstoffpreis	CHF/t	80	110
Strompreis	Rp./kWh	20	20
Pumpenwirkungsgrad (hydraulisch und elektrisch)	%	72%	72%
Wartungs-, Unterhalts-, Verwaltungs- und Versicherungskosten (BG: Investitionskosten Gesamt)	%	3.5%	5.0%
Hilfsenergie (Strom) Wärmeerzeugung (BG: erzeugte Wärme)	%	2.0%	3.0%
Personalkosten (BG: Investitionskosten WE)	%	1.5%	1.5%

Tabelle 4 Resultate der wirtschaftlichen Betrachtung bei Anlage 1 und Anlage 3. Die Resultate zeigen für die Situation Ist, Neu A und Neu B das Geschäftsergebnis, die Kapitalrendite, die Veränderung von Ist/Neu und die Rückzahldauer ROI.

		Anlage 1			Anlage 3		
		IST	Neu		IST	Neu	
			A	B		A	B
Geschäftsergebnis	CHF/a	44'765	54'779	102'394	51'692	53'557	69'230
Kapitalrendite	%/a	0.186%	0.227%	0.411%	0.842%	0.872%	1.109%
Veränderung gegenüber Ist (Neu-Ist)	CHF/a	–	10'015	57'629	–	1'865	17'538
Rückzahldauer (ROI)	a	–	2.33	14.4	–	3.85	6.11

Die Ausführungen zum ökonomischen Effekt der Optimierungsmassnahmen bei Anlage 1 basieren auf der Ist-Situation (IST) vor Optimierung (8. Oktober 2014 bis 31. Dezember 2014). Die Resultate in Tabelle 4 zeigen, dass die Ist-Situation ein Geschäftsergebnis von 44 765 CHF/a und eine Kapitalrendite von 0.186 %/a ergibt. Die Situation Neu A verbessert das Geschäftsergebnis um 10 015 CHF/a. Die Kapitalrendite steigt von 0.186 %/a auf 0.227 %/a, also um 0.041 %/a, was einer prozentualen Verbesserung um 22 % entspricht. Die Investitionen werden nach 2.33 Jahren amortisiert. Durch zusätzliche Ausschöpfung der Kapazitätssteigerung (Neu B) wird das Geschäftsergebnis um 57 629 CHF/a verbessert. Die Kapitalrendite steigt von 0.186 %/a auf 0.411 %/a, also um 0.225 %/a, was mehr als einer Verdopplung entspricht. Die Investitionen werden in diesem Fall in 14.41 Jahren amortisiert.

Die Ausführungen zum ökonomischen Effekt der Optimierungsmassnahmen bei Anlage 3 basieren auf der Ist-Situation (IST) vor Optimierung (31. Januar 2014 bis 31. Januar 2015). Tabelle 4 zeigt, dass die Ist-Situation ein Geschäftsergebnis von 51 692 CHF/a bei einer Kapitalrendite von 0.842 %/a ergibt. Die Situation Neu A verbessert das Geschäftsergebnis um 1865 CHF/a. Die Kapitalrendite steigt von 0.842 %/a auf 0.872 %/a, also um 0.03 %/a, was einer prozentualen Verbesserung um 3.5 % entspricht. Die Investitionen werden für diesen Fall nach 3.85 Jahren amortisiert. Durch zusätzliche Ausschöpfung der Kapazitätssteigerung (Neu B) wird das Geschäftsergebnis um 17 538 CHF/a verbessert. Die Kapitalrendite steigt von 0.842 %/a auf 1.109 %/a, also um 0.276 %/a, was einer prozentualen Verbesserung um knapp 35 % entspricht. Die Investitionen werden in diesem Fall in 6.11 Jahren amortisiert.

6 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 5 vorgestellte Vorgehen von Betreibern von Fernwärmenetzen selbst durchgeführt oder durch eine erfahrene Fachperson (Planer) ausgeführt werden.

Tabelle 5 Vorgehen zur Analyse und Optimierung der Wärmeabnehmer.

Was	Beschreibung	Wer
Datenerfassung und Auswertung (Kapitel 4.1)	Wärmezählerdaten erfassen	Betreiber / Planer
	Mehrverbrauch und Einfluss auf die Rücklauftemperatur ausweisen	Betreiber / Planer
	Rangierung der Wärmeabnehmer nach Mehrverbrauch	Betreiber / Planer
Beurteilung (Kapitel 0)	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 (Kapitel 4.3)	Zuständigkeiten klären	Betreiber / Wärmeabnehmer
	Güterabwägung der Kostenübernahme oder Kostenbeteiligung falls Optimierungsmassnahme die Sekundärseite betrifft (Zuständigkeit Wärmeabnehmer)	Betreiber
	Optimierungsmassnahmen umsetzen	Betreiber / Wärmeabnehmer
	Kontrolle der Optimierung	Betreiber / Planer

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 zwingend 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 Wärmegestellungskosten. 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.

7 Schlussfolgerungen

Mit den umgesetzten Massnahmen konnte bei zwei Fernwärmnetzen die gesamte primäre Rücklauftemperatur um 1.5 K bzw. 1.2 K abgesenkt werden. Eine ökonomische Betrachtung ergibt für den Fall, dass lediglich der Effekt der grösseren Temperaturspreizung bewertet wird, eine Amortisationszeit für die Investition von 2.33 bzw. 3.85 Jahren bei einer Verbesserung der Kapitalrendite um 22 % bzw. 3.5 %. Diese Massnahmen wurden umgesetzt.

Da die vergrösserte Temperaturspreizung eine Kapazitätserhöhung der Anschlussleistung ermöglicht, besteht durch Optimierung der Wärmeabnehmer die Option zum Anschluss zusätzlicher Wärmeabnehmer. Wenn dieses Erweiterungspotenzial ausgeschöpft wird, resultieren für die untersuchten Optimierungsmassnahmen Amortisationszeiten von 14.4 bzw. 6.11 Jahren, während sich die Kapitalrenditen um 121 % bzw. um 32 % erhöhen. Die Kapazitätserhöhung wirkt sich somit in beiden Fällen besonders stark auf die Kapitalrendite aus.

Die Analyse der Wärmeabnehmer anhand des Mehrverbrauches ist einfach umsetzbar und basiert auf Wärmezählerdaten der Wärmeabnehmer und Wärmeerzeuger. Voraussetzung zur Anwendung ist Grundlagenwissen in Thermodynamik und Erfahrung in der Gebäude- und Fernwärmetechnik. Das in Tabelle 5 beschriebene Vorgehen wird Betreibern von Fernwärmnetzen empfohlen. Je nach Stand der Technik und Know-how kann das Vorgehen von Betreibern selbst oder durch einen Planer ausgeführt werden.

Das Vorgehen soll die Netzbetreiber dabei unterstützen, in einer ersten Phase die Wärmeabnehmer zu analysieren und zu optimieren. In einer zweiten Phase bietet sich das Vorgehen für eine periodische Analyse der Wärmeabnehmer an, um die Qualität der Wärmeübertragung aufrechtzuhalten und im Bedarfsfall (z.B. bei Defekten) rasch und zielgerichtet eingreifen zu können. Bei Betreibern von Fernwärmnetzen ohne Leitsystem wird die periodische Analyse grundsätzlich empfohlen, da ausser der gesamten primären Rücklauftemperatur als integrale Grösse keine Informationen vorliegen und somit die Qualität der einzelnen Wärmeabnehmer nicht überwacht werden kann. Betreiber von Fernwärmnetzen mit Leitsystem sollten überprüfen, ob eine Überwachung mit dem vorhandenen Leitsystem möglich ist. Eine periodische Analyse der Wärmeabnehmer bietet in jedem Fall folgende Vorteile:

- eine Wertung der Wärmeabnehmer (Rangierung mit aufsteigendem Mehrverbrauch)
- die Identifikation von Fehlfunktionen und Defekten von Systemkomponenten
- eine rasche und zielgerichtete Umsetzung von Optimierungsmassnahmen im Bedarfsfall.

8 Literatur

- [1] Frederiksen, S.; Werner, S.: *District Heating and Cooling*, Studentlitteratur AB, Lund 2013, ISBN 978-91-44-08530-2
- [2] 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, 211–234
- [3] Nussbaumer, T.; Thalmann, S.: Influence of system design on heat distribution costs in district heating, *Energy* 101(2016) 496–505
- [4] Thalmann, S.; Nussbaumer, T.; Jenni, A.: Ist-Analyse von Fernwärmenetzen, 13. *Holzenergie-Symposium*, ETH Zürich 12.9.2014, Verenum Zürich 2014, ISBN 3-908705-25-8, 235–260
- [5] 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
- [6] Nussbaumer, T.; Thalmann, S.; Good, J.; Jenni, A.; Gabathuler, H.: *Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen – Vorstudie*, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, Bern 2012
- [7] Thalmann, S.; Nussbaumer, T.; Jenni, A.: *Umsetzung Optimierungsmassnahmen Fernwärme*, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, Bern 2016, in Vorbereitung
- [8] Neuenschwander, P.; Good, J.; Nussbaumer, T.: *Grundlagen der Abgaskondensation bei Holzfeuerungen*, Bundesamt für Energie, Bern 1998

Verdankung

Die vorgestellte Untersuchung entstand im Auftrag des Bundesamts für Energie (BfE) und unter Mitarbeit der Fernwärmenetzbetreiber von AVARI AG, Wilderswil, EBL Wärme AG, Liestal und Heizverbund Untere Kniri AG, Stans. Wir danken dem BfE und den beteiligten Unternehmen für die Unterstützung.