

## Der Transportfaktor

### MOTIVATION:

Wärmemengenzähler („WMZ“) ermitteln über drei Messfühler die im Heizkreis umgesetzte Wärmemenge (meist in kWh oder MWh). Zwei Temperaturfühler messen die Vor- und Rücklauftemperaturen eines Heizkreises, weiterhin wird (meist am Rücklauf) der Volumenstrom (meist in m<sup>3</sup>/h) des durch den Heizkreis fließenden Wassers gemessen. Diese drei Messwerte werden – wie später noch gezeigt werden wird – mathematisch verknüpft, das Ergebnis ist die im Heizkreis umgesetzte Wärmeleistung, deren

Zeitintegral die Wärmemenge (Wärmeenergie) ergibt. Sinnvollerweise sollten die Zähler zumindest monatlich abgelesen und die Daten in eine Tabelle aufgenommen werden. Dies dient dazu, Fehler in der Heizungsanlage möglichst frühzeitig in Erfahrung zu bringen<sup>1</sup>. Leider werden die Zähler jedoch in aller Regel nur jährlich abgelesen und es wird üblicherweise nur die verbrauchte Energiemenge (kWh oder MWh) notiert, nicht jedoch die durch den Heizkreis geflossene Wassermenge. Beide Zählerstände sind an jedem Wärmemengenzähler abrufbar!

**Frage:** Warum macht es Sinn, am Wärmemengenzähler nicht nur die verbrauchte Energiemenge abzulesen, sondern auch die durch den Heizkreis beförderte Wassermenge?

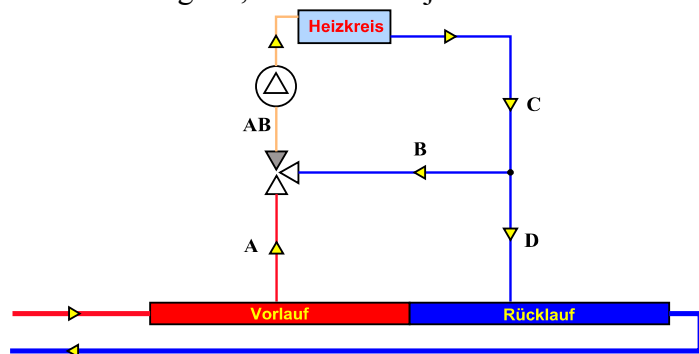
**Antwort:** Das Verhältnis zwischen beförderter Wassermenge und verbrauchter Energiemenge führt zu einer, hier als *Transportfaktor* bezeichneten Größe, die Erkenntnisse hinsichtlich der Hydraulik liefert.

Anhand des Transportfaktors kann nach jeder Zählerablesung ein Urteil über die Effektivität des Energietransportes vom Erzeuger zum Verbraucher gefällt werden. Der Transportfaktor ist eine integrale Größe, er gibt Auskunft über das Verhalten der Anlage seit der letzten Ablesung. Sollten sich Fehler innerhalb der Anlage eingeschlichen haben (defekter Mischer, geänderte Pumpenleistung, Beeinflussung durch benachbarte Heizkreise, ...), so gibt der Transportfaktor Auskunft darüber, wo der Fehler gesucht werden kann. Bei größeren Anlagen mit mehreren Heizkreisen ist es mit Hilfe des Transportfaktors auch möglich, die Heizkreise hydraulisch aufeinander abzustimmen.

<sup>1</sup> Fehler in der Heizungsanlage, die für kalte Räume verantwortlich sind, werden in kürzester Zeit festgestellt, Übertemperaturen (z.B. durch einen defekten Mischer) werden jedoch oft erst nach Monaten bemerkt.

## DER ANBRINGSORT VON WÄRMEMENGENZÄHLERN:

Leider werden vereinzelt die oben genannten drei Sensoren an Stellen angebracht, die sich nur theoretisch eignen, in der Praxis jedoch z.T. zu recht fehlerhaften Messergebnissen führen.



Nebenstehende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau eines Heizkreises. Heißes Kesselwasser wird dem zentralen Vorlauf zur Verfügung gestellt und gelangt über einen Mischer und eine Umwälzpumpe in den Heizkreisvorlauf (Weg A → AB). Der Heizkreisrücklauf (C) wird anteilig (B) dem Vorlaufwasser beigemischt, der Rest (D) gelangt in den zentralen

Rücklauf und fließt letztendlich an den Kessel zurück.

Die Durchflüsse<sup>2</sup> an folgenden Punkten sind unter Normalbedingungen stets gleich:

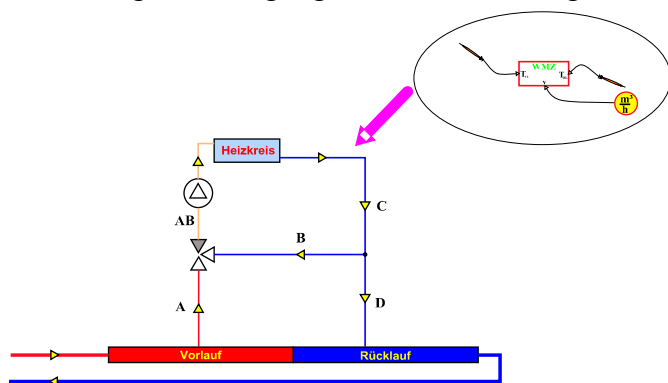
$$v(A) = v(D) \text{ und } v(AB) = v(C).$$

Weiterhin gilt:

$$v(AB) = v(A) + v(B) \text{ und } v(C) = v(B) + v(D).$$

Der Mischer ändert über die Beimischleitung (B) die Temperatur an (AB), jedoch nicht den Durchfluss durch den Heizkreis. Der Durchfluss über den Heizkreis ist von der Mischerstellung unabhängig, der Durchfluss über den Kesselkreis ist jedoch von der Mischerstellung abhängig; je mehr Wasser über die Beimischleitung fließt, desto kleiner wird der Durchfluss an (A).

Die richtige Anbringung eines Wärmemengenzählers zeigt folgendes Bild: Ein Temperatur-



sensor misst die Vorlauftemperatur des Heizkreises, ein zweiter die Rücklauftemperatur des Heizkreises, der Volumenstromsensor wird im Rücklauf des Heizkreises angebracht. Dies mag vielleicht selbstverständlich erscheinen, dennoch sieht man immer wieder Anordnungen, bei denen der Vorlaufsensor an (A) angebracht ist, der Rücklaufsensor und der Volumenstromsensor an (D). Diese Anordnung wäre zwar prinzipiell auch

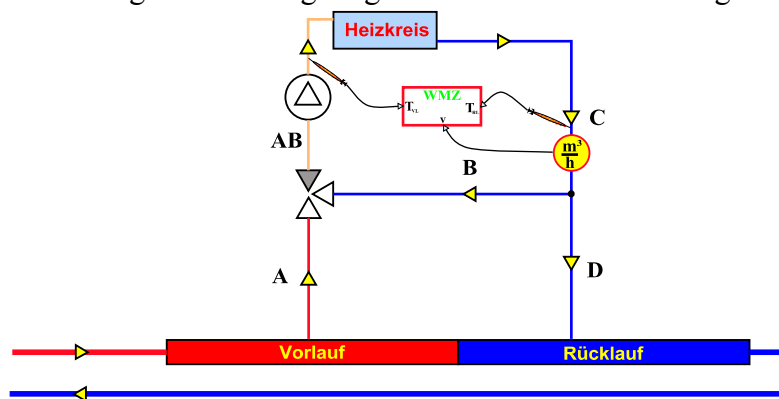
denkbar, sie zeigt jedoch zweierlei Nachteile:

- Der Durchfluss (auch Volumenstrom genannt) wird üblicherweise in m<sup>3</sup>/h angegeben und wird hier mit v abgekürzt.

a) Die Durchflüsse an (A) und (D) sind nicht konstant, sondern von der Mischerstellung abhängig. Bei zu kleinem oder zu großem Durchfluss wächst jedoch der Messfehler des Volumenstromsensors.

b) Ist zwischen dem Kessel und dem Heizkreisverteiler eine Zubringerpumpe angebracht, so treten bei nicht richtig abgestimmter Hydraulik bereichsweise Mischprobleme auf, die den Heizkreis letztendlich zu einer Temperaturschwingung veranlassen. Das eigentliche Mischventil arbeitet hier zeitweise als Verteilerventil und befördert einen Teil des heißen Kesselwassers über den Weg  $A \rightarrow B \rightarrow D$  zurück zum Kessel. Dies verringert die Temperaturdifferenz zwischen den Punkten (A) und (D), was wiederum den Messfehler beachtlich erhöht.

Die richtige Anordnung zeigt untenstehende Abbildung. Fatal wären folgende Anbringungs-



fehler:

a) Rücklauf- und Volumenstromsensor an (D), aber Vorlaufsensor wie abgebildet → Der Wärmemengenzähler würde einen zu niedrigen Wert anzeigen, da der Volumenstrom zu klein gemessen wird.

b) Vorlaufsensor an (A), aber Rücklauf- und Volumenstromsensor wie abgebildet → Der

Wärmemengenzähler würde einen zu hohen Wert anzeigen, da die Differenztemperatur zu hoch gemessen wird.

## MATHEMATISCHE ABLEITUNG DES TRANSPORTFAKTORS:

Ein Wärmemengenzähler misst in periodischen Abständen zeitgleich den Durchfluss  $v$ , die Vorlauftemperatur  $T_{VL}$  und die Rücklauftemperatur  $T_{RL}$ . Um hieraus die Wärmeleistung zu berechnen, benötigt man noch die spezifische Wärmekapazität und die Dichte von Wasser.

Die Wärmeleistung zum Zeitpunkt  $t$  ergibt sich zu:

$$P(t) = v(t) \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot [T_{VL}(t) - T_{RL}(t)] \quad \text{mit den Größen}$$

- P(t) → Wärmeleistung [kW]
- v(t) → Volumenstrom [m<sup>3</sup>/h]
- ρ<sub>w</sub> → Dichte von Wasser [kg/m<sup>3</sup>]
- c<sub>w</sub> → spezifische Wärmekapazität von Wasser [kWh/(kg·K)]
- T<sub>VL</sub>(t) → Vorlauftemperatur [K]
- T<sub>RL</sub>(t) → Rücklauftemperatur [K]

Inwiefern die Wärmeleistung vom Wärmemengenzähler angezeigt wird, hängt vom jeweiligen Gerät ab. Jeder Wärmemengenzähler jedoch multipliziert den jeweiligen Wärmeleistungswert mit der Abtastzeit (Zeit zwischen zwei Messungen) und summiert diese Werte auf<sup>3</sup>. Die aktuelle Summe wird als Zählerwert ausgegeben und ergibt die Wärmemenge, die seit Einbau des Zählers verbraucht wurde. Diese spezielle Summenbildung ist mathematisch nichts anderes als das Zeitintegral der Wärmeleistung.

Bezeichnet man mit τ den Zeitpunkt der Zählerablesung und mit t=0 den Zeitpunkt des Zählereinbaus, so berechnet sich die seit dem Einbau verbrauchte Wärmemenge Q zu:

$$Q(\tau) = \int_{t=0}^{\tau} v(t) \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot [T_{VL}(t) - T_{RL}(t)] dt \quad \text{mit } Q(\tau) \rightarrow \text{Wärmeenergie [kWh]}$$

Genau dies wird vom Wärmemengenzähler als verbrauchte Energiemenge angegeben und meist wird auch nur diese eine Zahl jährlich einmal notiert. Da der Volumenstrom permanent gemessen werden muss, wird auch die seit dem Einbau des Zählers durch den Heizkreis geflossene Wassermenge vom Wärmemengenzähler angegeben, jedoch leider so gut wie nie notiert. Die gesamte durch den Heizkreis seit Einbau des Zählers geflossene Wassermenge ist ebenfalls ein Zeitintegral – hier über den Volumenstrom:

$$V(\tau) = \int_{t=0}^{\tau} v(t) dt \quad \text{mit } V(\tau) \rightarrow \text{gesamte Wassermenge [m}^3\text{], die zwischen dem Zählereinbau und dem Zeitpunkt } \tau \text{ über den Heizkreis geflossen ist.}$$

Bildet man das Verhältnis zwischen V und Q zum Ableszeitpunkt τ und wendet man auf die Temperaturdifferenz im Integral des Nenners den Mittelwertsatz der Integralrechnung an, so erhält man:

3 Es gibt auch Systeme, die nicht mit konstanter Abtastzeit arbeiten, sondern mit einer konstant bleibenden differentiellen Flüssigkeitsmenge, was die Abtastzeit variabel macht. Allen Systemen ist jedoch gemeinsam, dass kleine, elementare Leistungsanteile zu einem Energieanteil aufsummiert werden.



$$\frac{V(\tau)}{Q(\tau)} = \frac{\int_{t=0}^{\tau} v(t) dt}{\int_{t=0}^{\tau} v(t) \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot [T_{VL}(t) - T_{RL}(t)] dt} = \frac{\int_{t=0}^{\tau} v(t) dt}{\int_{t=0}^{\tau} v(t) \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot \overline{\Delta T} dt} = \frac{\int_{t=0}^{\tau} v(t) dt}{\rho_w \cdot c_w \cdot \overline{\Delta T} \cdot \int_{t=0}^{\tau} v(t) dt}$$

mit einer „mittleren“ Temperaturdifferenz  $\overline{\Delta T}$  zwischen Vor- und Rücklauf des Heizkreises. Es sei hierbei ausdrücklich erwähnt, dass diese Größe nicht unbedingt der zeitliche Mittelwert sein muss! Der Mittelwertsatz sagt nur, dass es innerhalb des Zeitintervalls zwischen  $t=0$  und  $\tau$  eine bestimmte Temperaturdifferenz gibt, die diese Operation erlaubt. Weiterhin ist dieser Satz nur anwendbar, wenn der Volumenstrom  $v(t)$  immer das gleiche Vorzeichen hat, was hier natürlich der Fall ist.

Somit erhält man:

$$\frac{V(\tau)}{Q(\tau)} = \frac{1}{\rho_w \cdot c_w \cdot \overline{\Delta T}} \quad \text{bzw. aufgelöst nach } \overline{\Delta T} \rightarrow$$

$$\overline{\Delta T} = \frac{Q(\tau)}{V(\tau) \cdot \rho_w \cdot c_w} = \frac{Q(\tau)}{V(\tau)} \cdot \left[ \frac{kWh}{m^3} \right] \cdot 0,86 \left[ \frac{m^3 \cdot K}{kWh} \right]$$

Anzumerken ist hier, dass sowohl  $\rho_w$  als auch  $c_w$  temperaturabhängig sind. Diese Abhängigkeiten sind jedoch gegenläufig und heben sich bei den in Heizkreisen üblichen Temperaturen gerade auf. Der Faktor 0,86 in obiger Gleichung ist der Kehrwert des Produktes aus  $\rho_w$  und  $c_w$  mit  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$  und  $c_w = 4183 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)} = 1,16 \text{ Wh/(kg}\cdot\text{K)}$ .

Nun folgt ein Schritt, der zunächst etwas willkürlich erscheint, indem man für die „mittlere“ Temperaturdifferenz  $\overline{\Delta T}$  zwischen Vor- und Rücklauf des Heizkreises einen Wert von 8,7 K fordert. Diese Differenz wird auch als Temperaturspreizung bezeichnet. Diese Forderung hat Konsequenzen für den Quotienten aus Q und V:

$$\overline{\Delta T} \stackrel{!}{=} 8,7 [K] \rightarrow \frac{Q(\tau)}{V(\tau)} \stackrel{!}{=} 8,7 [K] \cdot 1,16 \left[ \frac{kWh}{m^3 \cdot K} \right]$$

Das Produkt aus 8,7 und 1,16 ergibt die Zahl 10,1 und ein  $m^3$  Erdgas besitzt gerade einen Heizwert von 10,1 kWh.

$$\frac{Q(\tau)}{V(\tau)} \stackrel{!}{=} 10,1 \left[ \frac{kWh}{m^3} \right] \simeq 1 \left[ \frac{m^3 \text{ Gas}}{m^3 \text{ Wasser}} \right]$$



Die Gleichung sagt folgendes aus: Bei einer mittleren Temperaturspreizung von 8,7 K benötigt man zum Wärmetransport von etwa 10 kWh (Heizwert von 1 m<sup>3</sup> Erdgas) tausend Liter Wasser<sup>4</sup>.

Definiert man das Verhältnis zwischen transportierter Wassermenge (in m<sup>3</sup>) und verbrauchter Energie (in Äquivalenten eines m<sup>3</sup> Erdgases), so erhält man einen einheitenlosen Faktor, den wir als **Transportfaktor** bezeichnen, da er eben eine Aussage darüber macht, wie viel Wasser benötigt wird, um Wärmeenergie zu transportieren.

$$\alpha_T := \frac{V(\tau)}{Q(\tau)} \stackrel{!}{=} 1 \left[ \frac{\text{m}^3 \text{ Wasser}}{\text{m}^3 \text{ Gas}} \right] \quad \text{bzw.} \quad V(\tau) = Q(\tau) \cdot \alpha_T$$

Der Hintergrund für die oben eingesetzte Temperaturspreizung von 8,7 K bestand darin, auf einen leicht zu merkenden, einheitenlosen Faktor zu kommen. Darüber hinaus ist in normalen Heizkreisen diese Temperaturspreizung durchaus üblich.

In der Praxis wird der Transportfaktor  $\alpha_T$  aus den Daten des Wärmemengenzählers folgendermaßen berechnet:

$$\alpha_T := \frac{V(\tau)}{Q(\tau)} \stackrel{!}{=} \frac{\text{Wassermenge} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kWh}} \right] \cdot 10,1 \cdot \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right]}{\text{Energimenge}}$$

Über diesen so ermittelten Transportfaktor lässt sich auch eine mittlere Temperaturspreizung berechnen:

$$\overline{\Delta T} = \frac{0,86}{\alpha_T} \cdot 10,1 = \frac{8,7[K]}{\alpha_T} \quad \text{bzw.} \quad \overline{\Delta T} \cdot \alpha_T = 8,7[K]$$

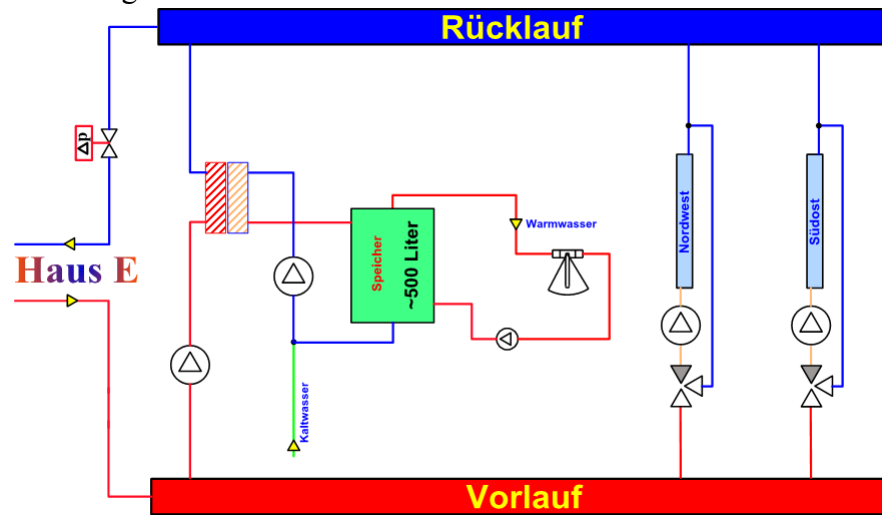
<sup>4</sup> Eselsbrücke: Um den Heizwert *eines* m<sup>3</sup> Erdgases zu befördern (10,1 kWh), benötigt man *einen* m<sup>3</sup> Wasser...

**BEISPIELE:**

**A) Unterstation**

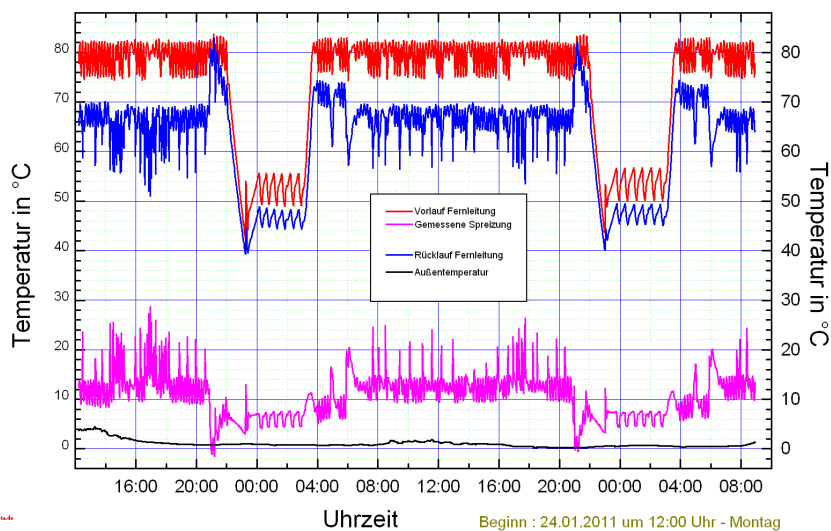
Datum	Uhrzeit	Energiezählerstand [kWh]	Volumenzählerstand [m³]	Energieverbrauch Q [kWh]	Wasserverbrauch V [m³]	Transportfaktor	Spreizung [K]
24.01.11	11:43	969.030	247.127	-	-	-	-
26.01.11	08:54	972.780	247.422	3.750	296	0,80	10,9

Der Wärmemengenzähler für obige Tabelle war in einer kleinen Unterstation einer größeren Heizanlage installiert. Den Aufbau der Unterstation sehen Sie im unteren Bild. Wir haben die



Temperaturdaten des zentralen Vor- und Rücklaufes zwischen den beiden Tagen aufgezeichnet, so dass sich die über die Zählerdaten ermittelte mittlere Spreizung nachprüfen lässt. **Das Ergebnis dieser Überprüfung ist verblüffend genau:**

Die über den Wärmemengenzähler ermittelte mittlere Spreizung liegt bei 10,9 K (siehe obige Tabelle), die über eine Messung ermittelte mittlere Spreizung liegt bei 10,7 K.



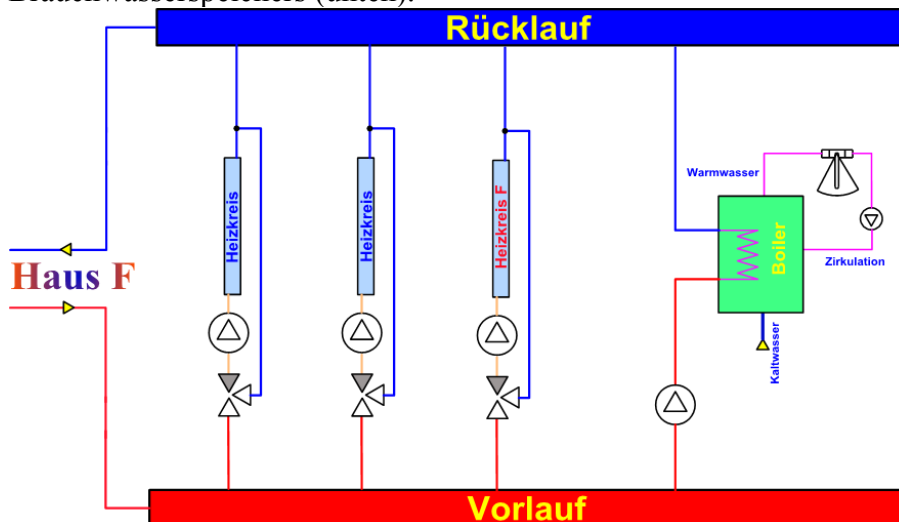
Ingenieurbüro ABAKUS  
Dr.-Ing. Josef Graf  
Inneberger Straße 20  
D-87743 Egg  
Tel.: 08333/932 17  
Fax: 08333/952 12  
Email: graf@simota.de  
Internet: www.simota.de

**BEISPIELE:**

**B1) Heizkreis F**

Datum	Uhrzeit	Energiezählerstand [kWh]	Volumenzählerstand [m³]	Energieverbrauch Q [kWh]	Wasserverbrauch V [m³]	Transportfaktor	Spreizung [K]
24.01.11	14:17	86.680	23.976	-	-	-	-
26.01.11	11:45	86.900	24.009	220	34	1,55	5,6

Den Aufbau einer weiteren Unterstation, die von derselben Heizungsanlage versorgt wird, sehen Sie im unteren Bild. Alle Kreise sind hier mit Wärmemengenzählern ausgestattet. Beispielhaft zeigen wir Ihnen die Daten von Heizkreis F (oben) und diejenigen des Brauchwasserspeichers (unten).



**B2) Brauchwasserspeicher**

Datum	Uhrzeit	Energiezählerstand [kWh]	Volumenzählerstand [m³]	Energieverbrauch Q [kWh]	Wasserverbrauch V [m³]	Transportfaktor	Spreizung [K]
24.01.11	14:17	461.730	131.883	-	-	-	-
26.01.11	11:45	462.080	132.003	350	120	3,47	2,5

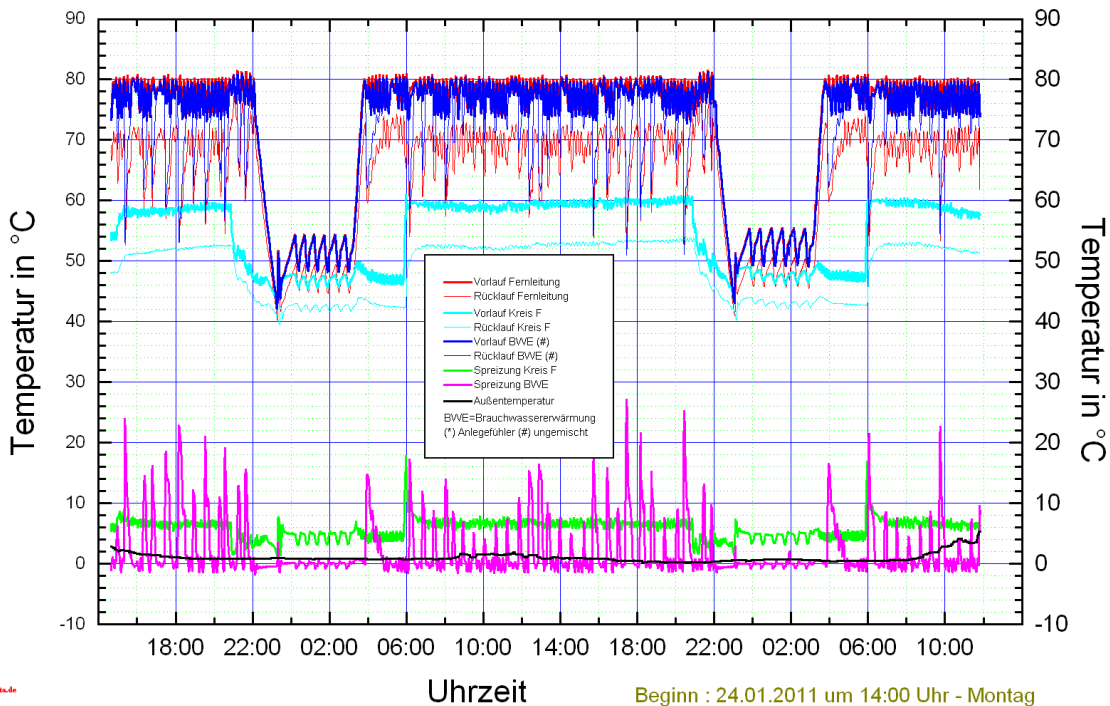
Beide Transportfaktoren sind mit 1,55 (Kreis F) bzw. 3,47 (Brauchwasserspeicher) deutlich zu hoch. Gegenüber der Unterstation von Haus E fällt auf, dass die Versorgung des Brauchwasserspeichers in Haus F nicht über einen Wärmetauscher stattfindet und Haus F ist ohne Differenzdruckregler ausgestattet.

Auch hier haben wir einen Vergleich der errechneten und gemessenen Temperaturspreizungen durchgeführt:

Heizkreis F:  $\overline{\Delta T}$  (errechnet) → 5,6 K       $\overline{\Delta T}$  (gemessen) → 5,8 K  
 Boiler:  $\overline{\Delta T}$  (errechnet) → 2,5 K       $\overline{\Delta T}$  (gemessen) → 2,1 K

Wieder stimmen die Ergebnisse hinreichend genau überein.





Ingenieurbüro Abakus  
 Dr.-Ing. Josef Graf  
 Inneberger Straße 20  
 D-87743 Egg  
 Tel.: 08333/932 17  
 Fax: 08333/952 12  
 E-mail: [graf@simota.de](mailto:graf@simota.de)  
 Internet: [www.simota.de](http://www.simota.de)

Der mit 3,47 sehr hoch liegende Transportfaktor bei der Brauchwassererwärmung sollte Anlass geben, die Anlage zu kontrollieren. Nun hat man jedoch in aller Regel nicht die aufgezeichneten Temperaturdaten – wie oben abgebildet - zur Hand. Diese zeigen jedoch deutlich den Fehler in der Anlage: Die Vorlauftemperatur zur Brauchwassererwärmung ist mit der Vorlauftemperatur der Fernleitung identisch und die Rücklauftemperatur liegt viel zu hoch. Die Ursache dieses Fehlverhaltens liegt darin begründet, dass die Zubringerpumpe zur Unterstation einen zu hohen Förderdruck aufweist, der das Vorlaufwasser auch bei abgeschalteter Brauchwassererwärmungspumpe durch den Speicher drückt (siehe Anlagenbild vorige Seite). Ein Differenzdruckregler wie bei der Unterstation E könnte diese Problematik zumindest deutlich mildern.

Auch der mit 1,55 errechnete Transportfaktor von Heizkreis F liegt zu hoch, es wird zu viel Wasser befördert, um eine gewisse Wärmeenergie in den Heizkreis zu bringen. Dies zeigt in obiger Abbildung die recht niedrige Temperaturspreizung in diesem Kreis. Dies kann zum einen die Folge einer zu hoch eingestellten Heizkreispumpe sein, könnte jedoch auch durch den Förderdruck der Zubringerpumpe verursacht sein. Eine Abstimmung ist jedenfalls nötig.





## TABELLARISCHER ZUSAMMENHANG ZWISCHEN TRANSPORTFAKTOR UND MITTLERER TEMPERATURSPREIZUNG:

Transportfaktor	Mittlere Temperaturspreizung	Art
0,2	43,4	Wärme- erzeuger
0,3	29,0	
0,4	21,7	
0,5	17,4	Radiatoren- heizkreise
0,6	14,5	
0,7	12,4	
0,8	10,9	
0,9	9,7	
1,0	8,7	
1,1	7,9	Brauchwasser- speicher
1,2	7,2	
1,3	6,7	
1,4	6,2	
1,5	5,8	
1,6	5,4	
1,7	5,1	
1,8	4,8	
1,9	4,6	
2,0	4,3	Lüftungsanlagen und Fußbodenheizungen
2,1	4,1	
2,2	3,9	
2,3	3,8	
2,4	3,6	
2,5	3,5	
2,6	3,3	
2,7	3,2	
2,8	3,1	
2,9	3,0	
3,0	2,9	
3,1	2,8	
3,2	2,7	
3,3	2,6	
3,4	2,6	
3,5	2,5	
3,6	2,4	
3,7	2,3	
3,8	2,3	
3,9	2,2	
4,0	2,2	

Nebenstehende Tabelle zeigt den Zusammen-  
hang zwischen dem aus den Zählerdaten errech-  
neten Transportfaktor und der sich hieraus erge-  
benden mittleren Temperaturspreizung.

Der Transportfaktor berechnet sich zu:

$$\alpha_T := \frac{V(\tau)}{Q(\tau)} = \frac{\text{Wassermenge} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kWh}} \right] \cdot 10,1 \cdot \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right]}{\text{Energiemenge} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kWh}} \right]}$$

Die mittlere Temperaturspreizung ergibt sich  
aus der Beziehung:

$$\overline{\Delta T} = \frac{8,7[\text{K}]}{\alpha_T}$$

Die dritte Spalte gibt einen Hinweis auf zu  
erwartende Ergebnisse. So würde z.B. ein  
Transportfaktor von 2,2 bei einem Radiatoren-  
heizkreis darauf hinweisen, dass im Verhältnis  
zur Wärmeenergie deutlich zu viel Wasser  
transportiert wird. Dies kann zwar durchaus  
verschiedene Ursachen haben, Handlungsbedarf  
besteht jedoch auf jeden Fall.

Die Zuordnung in der dritten Spalte beruht auf  
Erfahrungswerten, die wir im Laufe der Jahre  
gesammelt haben. Für Radiatorenheizkreise und  
Wärmeerzeuger sind die Zuordnungen von  
sinnvollen Werten sicherlich gefestigt, für

Brauchwasserspeicher, Lüftungsanlagen und Fußbodenheizungen fehlen uns allerdings noch  
Erfahrungswerte.

### ZUSAMMENFASSUNG:

Die regelmäßige Ablesung von Wärmemengenzählern (Energie- **und** Wassermenge) gestattet  
über einfache mathematische Operationen eine Beurteilung der Effektivität des  
Wärmetransportes und eine Kontrolle der Hydraulik.

Der Transportfaktor  $\alpha_T$  sollte sich – je nach Anlagenart – innerhalb gewisser Grenzen  
bewegen (siehe Tabelle). Liegt er außerhalb, so bedarf die Anlage einer Überprüfung.