Teillastverhalten von Heizkörpern

Die Heizkörperleistung ist abhängig von:

1. der Heizkörperfläche A
2. der mittleren Übertemperatur Δt_m
3. dem Heizkörperexponenten n

$$\dot{Q}_{HK} = f(A, \Delta t_m, n)$$

Die mittlere Übertemperatur Δt_m wird bestimmt durch:

1. die Vorlauftemperatur t_V
2. die Rücklauftemperatur t_R
3. die Innentemperatur t_i bzw. t_L

$$\Delta t_m = f(t_V, t_R, t_i)$$

Im praktischen Betrieb sind t_V und t_L über einen gewissen Zeitraum annähernd konstant, t_R ändert sich z.B. durch eine Hubverkleinerung im Thermostatventil. D. h. die Heizkörperleistung wird in diesem Fall durch eine Änderung des Heizmittelmassenstroms beeinflußt.

$$t_R = f(\dot{m}) \qquad t_V, t_L = \text{const.}$$

Allgemein ergeben sich zur Beeinflussung der Heizleistung eines Heizkörpers folgende theoretische Regelmöglichkeiten: Veränderung von $t_V, \dot{m}, A$

$$\dot{Q}_{HK} = f(t_V, \dot{m}, A)$$

Da eine kontinuierliche Veränderung der Heizkörperfläche während des Betriebes nicht in Frage kommt, gibt es folgende praktische Regelmöglichkeiten:

- Vorlauftemperaturregelung
- Massenstromregelung

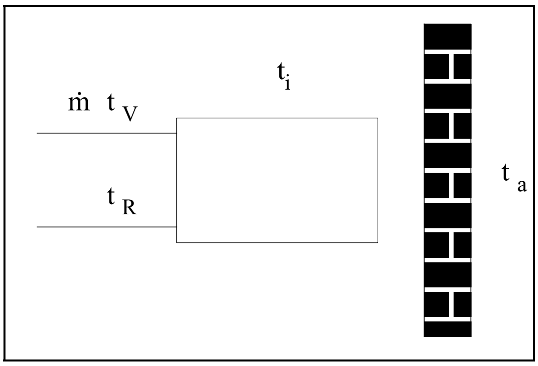

Bild 1: Abhängigkeiten der Heizkörperleistung

Im folgenden wird die Abhängigkeit der Heizkörperleistung von t_V und $\dot{m}$ gezeigt. Da die erforderliche Heizkörperleistung hauptsächlich von der Außentemperatur t_a abhängt, wird letztlich die Abhängigkeit von t_v und $\dot{m}$ von t_a hergeleitet.

Da die Verhältnisse allgemein gültig dargestellt werden sollen, wird mit bezogenen Gleichungen gearbeitet. Bezogen wird auf Auslegungszustand **Index A**. Betrachtet man den Wärmeübergang vom Heizwasser über den Heizkörper an die Raumluft und von der Raumluft über die Außenwand nach draußen, so gelten bei stationärem Betrieb folgende Gleichungen:

❶ Wärmeabgabe des Wassers:

$$\varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (t_V - t_R)}{\dot{m}_A \cdot c_{pA} \cdot (t_V - t_R)_A} = \frac{\dot{m} \cdot (t_V - t_R)}{\dot{m}_A \cdot (t_V - t_R)_A}$$

❷ Wärmeabgabe des Heizkörpers an die Raumluft:

$$\varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{A_{HK} \cdot \Delta t_m{}^n}{A_{HKA} \cdot \Delta t_{mA}{}^n}$$

❸ Wärmeabgabe des Raumes an die Außenluft:

$$\varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{k \cdot A \cdot (t_i - t_a)}{k_A \cdot A_A \cdot (t_i - t_a)_A} = \frac{(t_i - t_a)}{(t_i - t_a)_A}$$

mit $c_p \approx c_{p\,A}$ Wärmekapazität des Wassers

$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \varphi$ Belastungsverhältnis

Die Gleichung 3 stimmt nur dann exakt, wenn der Wärmebedarf eines Raumes ausschließlich vom Transmissionswärmebedarf bestimmt wird. Es wird vorausgesetzt, dass der Wärmedurchgang (k) und die Außenfläche des berechteten Raumes (A) konstant bleiben.

1. Massenstromregelung (Drossel- oder Mengenregelung)

Mögliche Schaltungen:

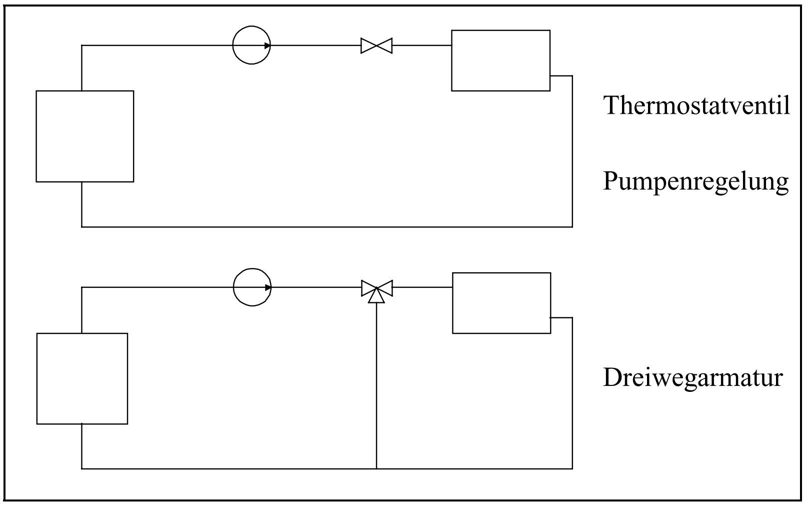

Bild 2: Schaltungen zur Massenstromregelung

Die Heizkörpergleichungen lauten z.B. für folgenden Auslegungszustand:

- t_{VA} = 75 °C
- t_{RA} = 65 °C
- t_{iA} = 20 °C
- t_{aA} = -14 °C
- bei der geforderten Raumtemperatur t_i = 20 °C
- n = 1,3

Reine Massenstromregelung bedeutet, dass im Betrieb $t_V = t_{VA}$ gefahren wird.

❶ $$\varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_A} \cdot \frac{t_V - t_R}{t_{VA} - t_{RA}} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_A} \cdot \frac{75°C - t_R}{10K}$$

❷ $$\varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \left(\frac{\dfrac{t_{VA} - t_R}{\ln \dfrac{t_{VA} - t_i}{t_R - t_i}}}{\dfrac{t_{VA} - t_{RA}}{\ln \dfrac{t_{VA} - t_{iA}}{t_{RA} - t_{iA}}}} \right)^{1,3} = \left(\frac{\dfrac{75°C - t_R}{\ln \dfrac{75°C - 20°C}{t_R - 20°C}}}{\dfrac{75°C - 65°C}{\ln \dfrac{75°C - 20°C}{65°C - 20°C}}} \right)^{1,3} = \left(\frac{\dfrac{75°C - t_R}{\ln \dfrac{55\,K}{t_R - 20°C}}}{49{,}83\,K} \right)^{1,3}$$

❸ $$\varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{t_i - t_a}{t_{iA} - t_{aA}} = \frac{20°C - t_a}{20°C - (-14°C)}$$

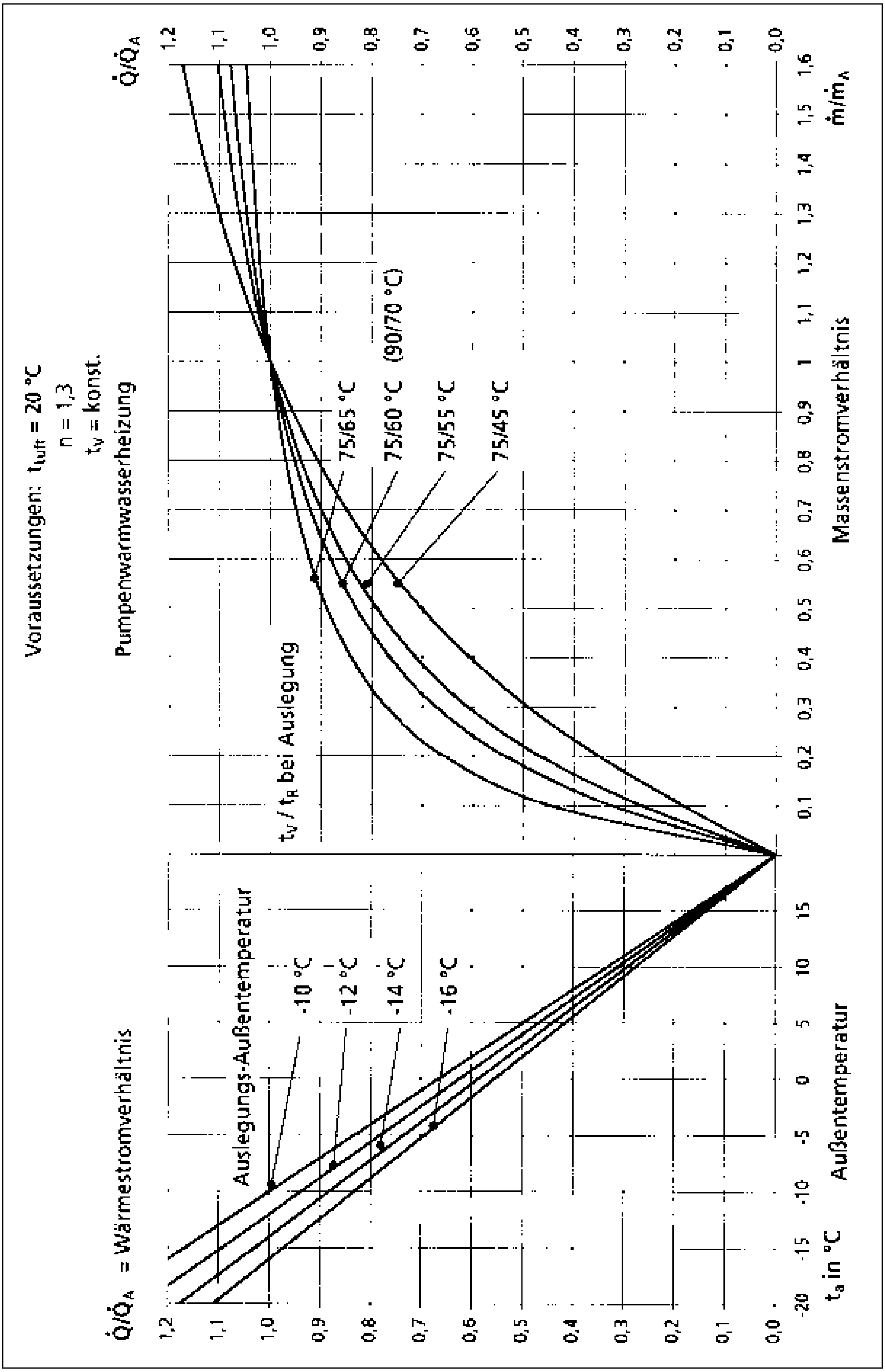

Bild 3 Teillastverhalten bei Massenstromregelung

Eine Gleichung $\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = f\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_A}\right)$ bzw. $\frac{\dot{m}}{\dot{m}_A} = f(t_a)$ ist nicht direkt lösbar. Sie kann nur durch Iteration gelöst werden bzw. mit Hilfe von Bild 3. Mit ❶ und ❷ kann der Funktionsverlauf im 1. Quadranten, mit ❸ im linken Quadranten bestimmt werden. Aus diesem Diagramm ist abzulesen, dass eine reine Drosselregelung in vielen Fällen praktisch nicht funktioniert.

Begründung:

Auslegungsdaten seien z.B. 75/65/20 °C bei t_a = -14 °C. Bei t_a = 5 °C (≈ mittlere Heizperiodentemperatur) folgt:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_A} = 0{,}125$$

d.h. das Drosselorgan müsste in der Übergangszeit nur 12,5 % des Auslegungsmassenstroms durchlassen und somit fast im geschlossenen Zustand arbeiten.

2. Vorlauftemperaturregelung

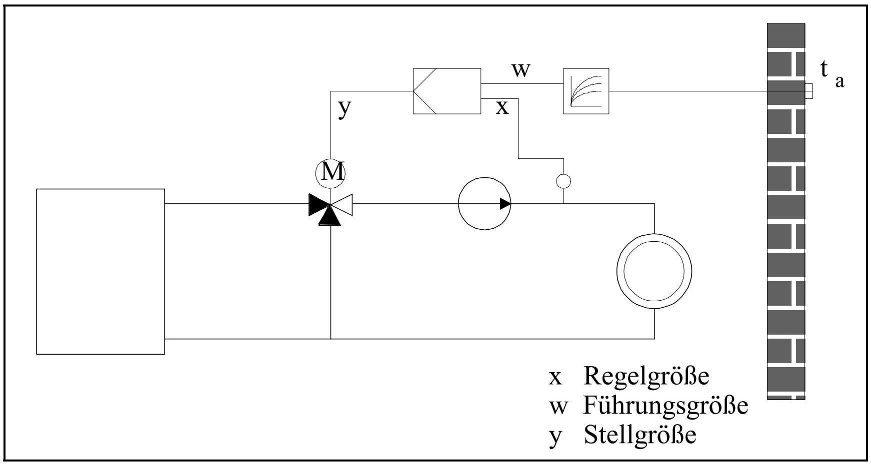

Bild 4: Vorlauftemperaturregelung mit 3-Weg-Ventil

Annahme bei der Vorlauftemperaturregelung: $\dot{m}_{Heizkreis} = \text{konst.}$ (keine Thermostatventile). In der Praxis wird es daher immer eine Kombination zwischen Vorlauftemperatur- und Massenstromregelung geben.

Gleichung für die reine Vorlauftemperaturregelung in Abhängigkeit von der Belastung φ:

❶ $$\varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_A} \cdot \frac{t_V - t_R}{t_{VA} - t_{RA}} = \frac{t_V - t_R}{\Delta t_A} \quad \text{bei} \quad \frac{\dot{m}}{\dot{m}_A} = 1$$

mit: Δt_A = Auslegungsspreizung = t_{VA} - t_{RA}

❷ $$\varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \left(\frac{\dfrac{t_V - t_R}{\ln \dfrac{t_V - t_i}{t_R - t_i}}}{\dfrac{t_{VA} - t_{RA}}{\ln \dfrac{t_{VA} - t_{iA}}{t_{RA} - t_{iA}}}} \right)^n = \left(\frac{\dfrac{t_V - t_R}{\ln \dfrac{t_V - t_i}{t_R - t_i}}}{\Delta t_{mA}} \right)^n$$

mit: Δt_{mA} = Auslegungs-Übertemperatur

❸ $$\varphi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{t_i - t_a}{t_{iA} - t_{aA}}$$

Gesucht ist die Vorlauftemperatur $t_V = f\ (t_a \ldots)$ als Funktion der Außentemperatur.

- aus ❶ folgt: $t_V - t_R = \varphi \cdot \Delta t_A$
- in ❷ einsetzen und umstellen: $\varphi = \left(\frac{\dfrac{\varphi \cdot \Delta t_A}{\ln \dfrac{t_V - t_i}{t_R - t_i}}}{\Delta t_{mA}} \right)^n \rightarrow \varphi^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{\varphi \cdot \dfrac{(t_V - t_R)}{\ln \dfrac{t_V - t_i}{t_R - t_i}}}{\Delta t_{mA}} \right)$
- umstellen: $\ln \frac{t_V - t_i}{t_R - t_i} = \frac{\varphi}{\varphi^{1/n}} \cdot \frac{\Delta t_A}{\Delta t_{mA}} = \frac{\Delta t_A}{\Delta t_{mA}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}$
- delogarithmieren: $\frac{t_V - t_i}{t_R - t_i} = e^{\frac{\Delta t_A}{\Delta t_{mA}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}}$
- umstellen: $t_V - t_i = (t_R - t_i) e^{\frac{\Delta t_A}{\Delta t_{mA}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}}$

Gesucht ist $t_V = f\ (t_a \ldots)$ .Der Wert t_a ist in der Gleichung nicht direkt enthalten, jedoch indirekt über φ nach Heizkörpergleichung ❸. Daher muss t_R ersetzt werden durch bekannte Größen.

- aus ❶ folgt: $t_R = t_V - \varphi \cdot \Delta t_A$
- einsetzen: $t_V - t_i = (t_V - \varphi \cdot \Delta t_A - t_i) \cdot e^{\frac{\Delta t_A}{\Delta t_{mA}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}}$
- umstellen: $t_V \cdot \left(1 - e^{\frac{\Delta t_A}{\Delta t_{mA}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}} \right) = t_i \cdot \left(1 - e^{\frac{\Delta t_A}{\Delta t_{mA}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}} \right) - \varphi \cdot \Delta t_A \cdot e^{\frac{\Delta t_A}{\Delta t_{mA}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}}$
- vereinfachen: $t_V = t_i - \varphi \cdot \Delta t_A \cdot \frac{e^{\frac{\Delta t_A}{\Delta t_{mA}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}}}{1 - e^{\frac{\Delta t_A}{\Delta t_{mA}} \cdot \varphi^{\frac{n-1}{n}}}}$

Beispiel:

Die Auslegungsdaten einer Heizungsanlage sind 75/65/20/-14°C. Gesucht ist die Vorlauftemperatur bei einer Außentemperatur t_a = 3°C und einer Raumtemperatur t_i = 20 °C.

- Belastung nach Gleichung ❸: $\varphi = \frac{t_i - t_a}{t_{iA} - t_{aA}} = \frac{20°C - 3°C}{20°C - (-14°C)} = 0{,}5$
- Auslegungsspreizung: $\Delta t_A = 75°C - 65°C = 10\,K$
- Auslegungsübertemperatur: $\Delta t_{mA} = 49{,}83\,K$

- Vorlauftemperatur: $t_V = 20°C - 0{,}5 \cdot 10\,K \cdot \frac{e^{\frac{10K}{49{,}83K} \cdot 0{,}5^{\frac{0{,}3}{1{,}3}}}}{1 - e^{\frac{10K}{49{,}83K} \cdot 0{,}5^{\frac{0{,}3}{1{,}3}}}} = 51{,}81°C$
- Rücklauftemperatur: $t_R = t_V - \varphi \cdot \Delta t_{A\,R} = 51{,}81°C - 0{,}5 \cdot 10\,K = 46{,}81°C$

3. *Die Heizkurve*

Wird die benötigte Vorlauftemperatur direkt über der Außentemperatur aufgetragen, so erhält man die Heizkurve $t_V = f\,(t_a)$.

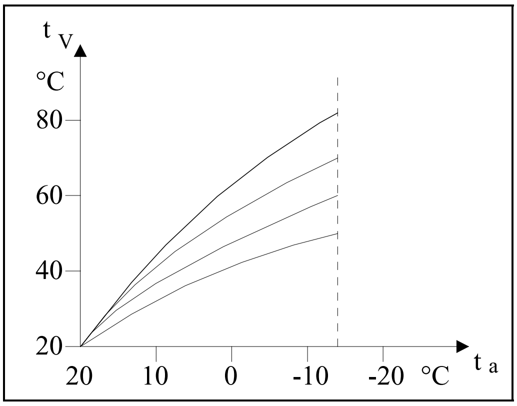

BILD 5; HEIZKURVE

Vorausgesetzt ist hierbei, dass der Wärmebedarf proportional zur Außentemperatur ist:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_A \cdot \frac{t_i - t_a}{t_{iA} - t_{aA}} = \text{konst.}$$

Dies ist strenggenommen nicht der Fall, da:
1. Sonnenschein und Wind auch eine Rolle spielen,
2. im allgemeinen auch Wärme zu oder von benachbarten Räumen fließt.

In Bild 4 sind verschiedene Heizkurven in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis dargestellt für n = 1,3 und t_i = 20 °C.

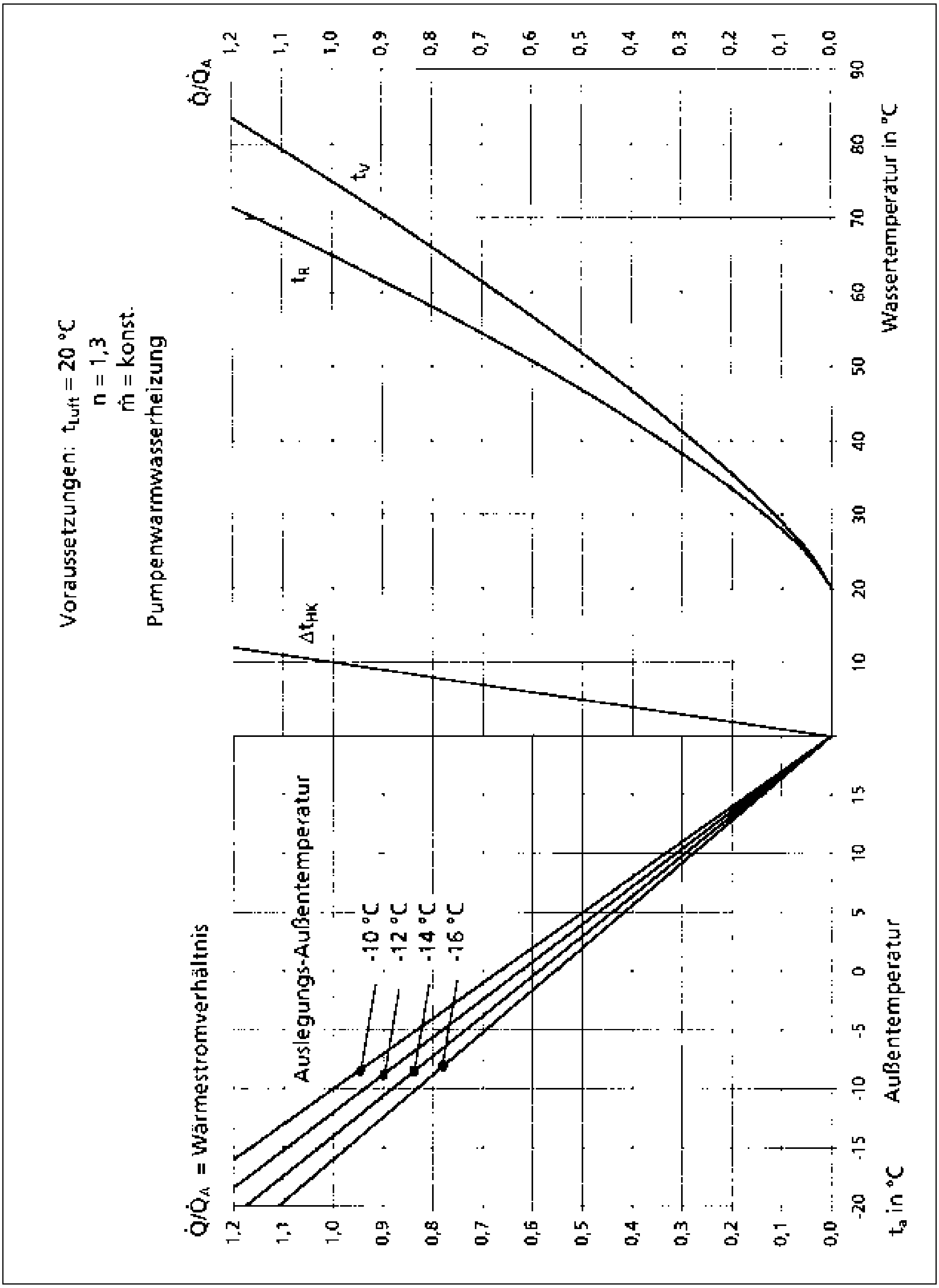

Bild 6 Teillastverhalten bei Vorlauftemperaturregelung

Damit ist es möglich bei bekannter Auslegungstemperatur für jede Außentemperatur φ zu ermitteln. Bei bekannter Auslegungsspreizung kann dann die Vorlauftemperatur bestimmt werden. Häufig ist bei Abschätzungen die Rechnung mit den Heizkörpergleichungen zu aufwendig, daher wurde versucht die Heizkurven durch Regressionsgleichungen anzunähern.

Damit die Heizungsregler universell verwendbar sind, sind mehrere Heizkurven, die sich durch ihre Steilheit unterscheiden, im Regler „eingebaut“ und einzustellen. Ferner können die dargestellten Kurven durch Einrichtungen um einen Punkt gedreht und parallel verschoben werden.

Dadurch kann die Heizkurve an die Belange des Heizbetriebes angepasst werden. Z.B. bei Nachtabsenkung wird - von der Schaltuhr gesteuert - die Tagesheizkurve um einige Grad „nach unten“ verschoben.

3.1. Beispiel zur Auslegung von Heizkörpern bei Einrohrheizungen

1. Es gibt keine überzeugenden Untersuchungen, die nachweisen, dass eine bestimmte Auslegung eine optimale Auslegung gewährleistet
2. Einsatz von Einrohr-Zwangsdurchlauf gering
3. Einrohr-Nebenschlussheizungen:3 Auslegungsstrategien werden angewendet:

I. Für alle Heizkörper gilt

$$0{,}3 \le \dot{m}_{HK} / \dot{m}_{ges} \le 0{,}5$$

Vorteil: Die Rohranschlüsse an allen Heizkörpern sind gleich.

II. Für alle Heizkörper gleiches Δt_m

Vorteil: Alle Heizkörper haben gleiches $\dot{q}$

Aber Δt_m ist nicht frei wählbar.

$$\Delta t_m = \frac{t_V - t_R}{\ln \frac{t_V - t_i}{t_R - t_i}}$$

Es muss sein:

- Massenstrom Heizkörper: $\dot{m}_{HK} \le \dot{m}_{ges}$
- umgestellt: $\frac{\dot{Q}_{HK}}{c_p \cdot \Delta t_{HK}} \le \frac{\sum \dot{Q}_{HK}}{c_p \cdot \Delta t_{ges}}$

$$\Delta t_{HK} \ge \Delta t_{ges} \cdot \frac{\dot{Q}_{HK}}{\sum \dot{Q}_{HK}}$$

- Spreizung: $\Delta t_{HK} = t_{VHK} - t_{RHK}$
- umgestellt und eingesetzt: $t_{RHK} = t_{VHK} - \Delta t_{HK} \le t_{VHK} - \Delta t_{ges} \cdot \frac{\dot{Q}_{HK}}{\sum \dot{Q}_{HK}}$

- Übertemperatur: $$\Delta t_m \le \frac{\Delta t_{ges}\cdot\frac{\dot{Q}_{HK}}{\sum\dot{Q}_{HK}}}{\ln\frac{t_{VHK}-t_i}{t_{VHK}-\Delta t_{ges}\cdot\frac{\dot{Q}_{HK}}{\sum\dot{Q}_{HK}}-t_i}}$$

Da die mittlere Übertemperatur Δt_m für alle Heizkörper gleich sein soll, muss der Grenzwert für jeden Heizkörper ermittelt werden, und mit dem kleinsten Wert gerechnet werden.

$\frac{\dot{m}_{HK}}{\dot{m}_{ges}}$ ist unbekannt $\Rightarrow$ ungünstigste Werte

$\Rightarrow$ Zwangsdurchlauf liefert größte Werte für Δt_m .

Wie groß ist t_{VHK} für jeden Heizkörper?

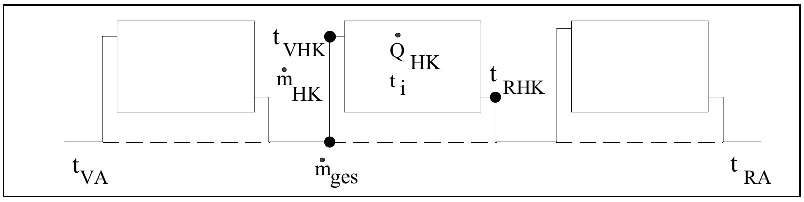

Bild 7: Einrohrheizung mit Nebenschluss

- Leistung gesamt: $\sum_{n=1}^{n}\dot{Q}_{HK} = \dot{m}_{ges}\cdot c_p\cdot\Delta t_{ges}$
- Temperatur gesamt: $\Delta t_{ges} = t_V - t_R$
- Massenstrom gesamt: $\dot{m}_{ges} = \frac{\sum\dot{Q}_{HK}}{c_p\cdot\Delta t_{ges}}$

- Leistung HK1: $$\dot{Q}_{HK1} = \dot{m}_{ges}\cdot c_p\cdot\left(t_{VHK1}-t_{VHK2}\right)$$
$$\dot{Q}_{HK1} = \frac{\sum\dot{Q}_{HK}}{c_p\cdot\Delta t_{ges}}\cdot c_p\cdot\left(t_{VHK1}-t_{VHK2}\right)$$

- Vorlauftemperatur für HK2:
$$t_{VHK2} = t_{VHK1}-\Delta t_{ges}\cdot\frac{\dot{Q}_{HK1}}{\sum_1^n\dot{Q}_{HK}} = t_{VA}-\Delta t_{ges}\cdot\frac{\dot{Q}_{HK1}}{\sum_1^n\dot{Q}_{HK}}$$

- Vorlauftemperatur für HK3:
$$t_{VHK3} = t_{VHK2}-\Delta t_{ges}\cdot\frac{\dot{Q}_{HK2}}{\sum_1^n\dot{Q}_{HK}} = t_{VA}-\Delta t_{ges}\cdot\frac{\dot{Q}_{HK1}}{\sum_1^n\dot{Q}_{HK}}-\Delta t_{ges}\cdot\frac{\dot{Q}_{HK2}}{\sum_1^n\dot{Q}_{HK}}$$

- allgemein: $t_{VHKz} = t_{VA} - \Delta t_{ges} \cdot \frac{\sum_{1}^{z-1} \dot{Q}_{HK1}}{\sum_{1}^{n} \dot{Q}_{HK}}$ z = 1, 2 ... n HK

III. Für alle Heizkörper gleiches Δt_{HK}
Vorteil: keiner
Aber: Δt_{HK} ist nicht beliebig wählbar

a) Es gilt: $\dot{m}_{HK} \leq \dot{m}_{ges} \rightarrow \frac{\dot{Q}_{HK}}{\Delta t_{HK}} \leq \frac{\sum \dot{Q}_{HK}}{\Delta t_{ges}}$

Heizkörperspreizung: $\Delta t_{HK} \geq \Delta t_{ges} \cdot \frac{\dot{Q}_{HK}}{\sum \dot{Q}_{HK}}$

b) Es gilt: $\Delta t_{HK} = t_{VHK} - t_{RHK} < t_{VHK} - t_i$

$$\Delta t_{ges} \cdot \frac{\dot{Q}_{HK}}{\sum \dot{Q}_{HK}} \leq \Delta t_{HK} < t_{VHK} - t_i$$

Da Δt_{HK} für die Heizkörper konstant ist, müssen die Grenzwerte für jeden Heizkörper ermittelt werden und dann das mögliche Δt_{HK} bestimmt werden.

Quelle: Datenpool IfHK, FH Wolfenbüttel