

# Bemessung eines Pufferspeichers und Kombination mit hydraulischer Weiche

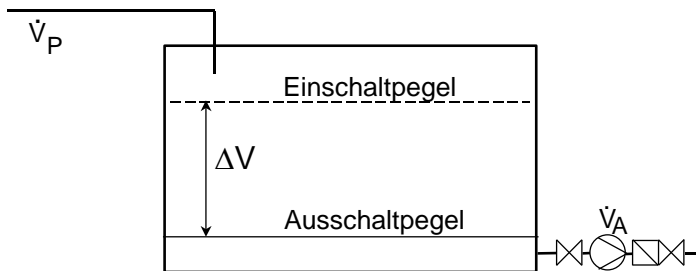
Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück

Angeregt vom Beitrag [1] soll die Festlegung der Größe eines Pufferspeichers umfassend dargestellt werden. Das Problem ist schon häufig besprochen worden, so beispielsweise auch in [2, 3]. Es gilt gleichermaßen für Sammelbehälter mit diskontinuierlichem Zu- oder Abfluss, wie für Pufferspeicher zum Ausgleich intermittierend arbeitender Wärmeleistungsstufen. Letzteres enthält natürlich auch den Fall für Pufferspeicher in Kältebereitstellungsanlagen, die gleichzeitig auch die Funktion einer hydraulischen Weiche übernehmen. Aus didaktischen Gründen sei das Problem des Pufferspeichers zum Ausgleich der diskontinuierlichen Zu- und Abflüsse vorangestellt.

## 1. Sammelbehälter mit einer Förderstufe

Werden diskontinuierliche Zuflüsse in einem Behälter gesammelt und in Intervallen durch eine Pumpe weitergeleitet (Bild 1), so gelten die Forderungen:

- möglichst kleines Volumen des Sammelbehälters
- kein Überschreiten der maximal zulässigen Schalthäufigkeit.



**Bild 1** Speicherbehälter mit diskontinuierlich arbeitender, einstufiger Förderung (Förderstrom  $\equiv$  Aktivstrom  $\dot{V}_A$ ; Zuflussstrom  $\equiv$  Passivstrom  $\dot{V}_P$ ).

Es handelt sich hierbei um ein Randoptimum, denn unter Ausnutzung der maximal zulässigen Schalthäufigkeit ( $n_{\max}$  in  $h^{-1}$ ) ergibt sich das kleinste notwendige Speichervolumen ( $\Delta V_{\min}$  in  $m^3$ ).

Die Zeitdifferenz ( $\Delta\tau$ ) zwischen zwei Einschaltungen der Pumpe ergibt sich als Summe aus der Förderzeit der Pumpe - Aktivzeit  $\tau_A$  - und der Füllzeit durch den Zufluss - Passivzeit  $\tau_P$ . Nach dem Einschalten der Pumpe ist das Speichervolumen und der während des Pumpenbetriebs anfallende Zufluss von der Pumpe zu fördern.

Damit gilt:

$$\tau_A = \frac{\Delta V}{\dot{V}_A - \dot{V}_P}. \quad (1)$$

Die sich daran anschließende Füllzeit bei Pumpenstillstand ergibt sich in einfacher Weise zu

$$\tau_P = \frac{\Delta V}{\dot{V}_P}, \quad (2)$$

woraus

$$\Delta\tau = \tau_A + \tau_P = \frac{\Delta V}{\dot{V}_A - \dot{V}_P} + \frac{\Delta V}{\dot{V}_P}. \quad (3)$$

folgt. Dabei bedeuten:

$\dot{V}_A$  Förderstrom (Aktivstrom)

$\dot{V}_P$  Zuflussstrom (Passivstrom).

Unter Beachtung, dass die stündliche Zahl der Schaltungen sich aus  $n = 1 / \Delta\tau$  errechnet, kann Gl.

(3) nach kurzer Umformung

$$n = \frac{\left(1 - \frac{\dot{V}_P}{\dot{V}_A}\right) \frac{\dot{V}_P}{\dot{V}_A}}{\frac{\Delta V}{\dot{V}_A}} \quad (4)$$

geschrieben werden. Es ist interessant zu wissen, bei welchem Verhältnis  $(\dot{V}_P / \dot{V}_A)$  die maximale Schalthäufigkeit auftritt. Es wird deshalb der erste Differentialquotient gebildet und gleich Null gesetzt

$$\frac{dn}{d(\dot{V}_P / \dot{V}_A)} = \frac{\dot{V}_A}{\Delta V} \left[ 1 - \frac{\dot{V}_P}{\dot{V}_A} - \frac{\dot{V}_P}{\dot{V}_A} \right] = 0, \quad (5)$$

woraus

$$\frac{\dot{V}_P}{\dot{V}_A} = \frac{1}{2} \quad (6)$$

folgt. Dies bedeutet, dass die größte Schalthäufigkeit dann vorliegt, wenn der Zufluss  $\dot{V}_P$  halb so groß ist wie der Pumpenförderstrom  $\dot{V}_A$ . Durch Einsetzen dieses Ergebnisses in Gl. (4) ergibt sich die maximale Anzahl der stündlichen Schaltungen zu

$$n_{\max} = \frac{\dot{V}_A}{4 \Delta V_{\min}}. \quad (7)$$

Dass es sich dabei um ein Maximum handelt, kann man sich anschaulich erklären und durch die Bildung des zweiten Differentialquotienten auch beweisen.

Zur Bemessung eines Speichers ergibt sich somit folgendes einfaches Verfahren:

1. Die Pumpe und das Rohrleitungssystem sind für den maximalen Zufluss

$$\dot{V}_A = \dot{V}_{P,\max} \quad (8)$$

auszulegen. Man sollte stets versuchen, soweit als möglich diese Gleichung zu erfüllen, da ein größerer Pumpenförderstrom durch Einsatz einer größeren Pumpe stets größere Speichervolumina bei vorgegebenem  $n_{\max}$  erfordert. Stillschweigend gewährte "Sicherheitszuschläge" bei der Druckverlustberechnung führen im praktischen Betrieb zur Überschreitung der vorgegebenen Schalthäufigkeit.

2. Das Speichervolumen berechnet sich auf der Grundlage des Pumpenförderstromes und der zulässigen maximalen Schaltzahl

$$\Delta V = \frac{\dot{V}_A}{4 n_{\max}}. \quad (9)$$

Das Behältervolumen muss gegenüber dem nutzbaren Speichervolumen entsprechend den technischen Gegebenheiten größer gewählt werden, um Luftansaugen durch die Pumpe bzw. ein Überlaufen zu vermeiden.

## 2. Beispiel 1

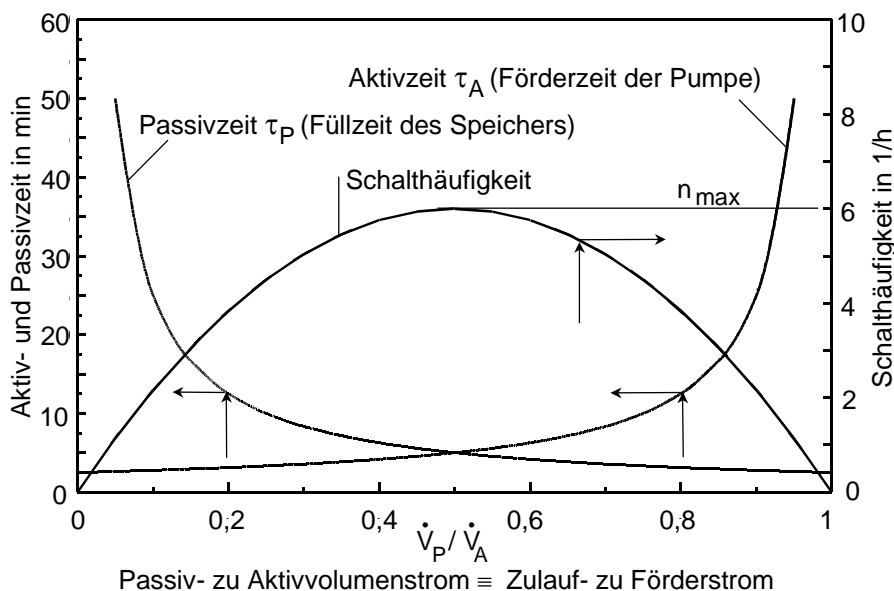
Die in einen Sammelbehälter strömende Zuflussmenge schwankt in einem Bereich von  $\dot{V}_P = 0 \dots 21,1 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die maximal zulässige Schalzhäufigkeit soll  $n_{\max} = 6 \text{ h}^{-1}$  betragen. Es wurde versucht, das Fördersystem (Pumpe - Rohrleitung) so auszulegen, dass der Betriebspunkt möglichst nahe an  $\dot{V}_A = \dot{V}_{P,\max}$  herankommt. Aufgrund der standardisierten Pumpenkennlinien und der gegebenen Rohrdurchmesser ist ein Betriebspunkt  $\dot{V}_A = 24 \text{ m}^3/\text{h}$  erreicht worden.

Das minimal notwendige Speichervolumen folgt aus Gl. (9) zu

$$\Delta V = \frac{24 \text{ m}^3/\text{h}}{4 \cdot 6 \text{ h}^{-1}} = 1 \text{ m}^3.$$

Wäre es gelungen, das Fördersystem genau auf  $\dot{V}_A = 21,1 \text{ m}^3/\text{h}$  auszulegen, so hätte ein Volumen von  $\Delta V = 0,88 \text{ m}^3$  genügt.

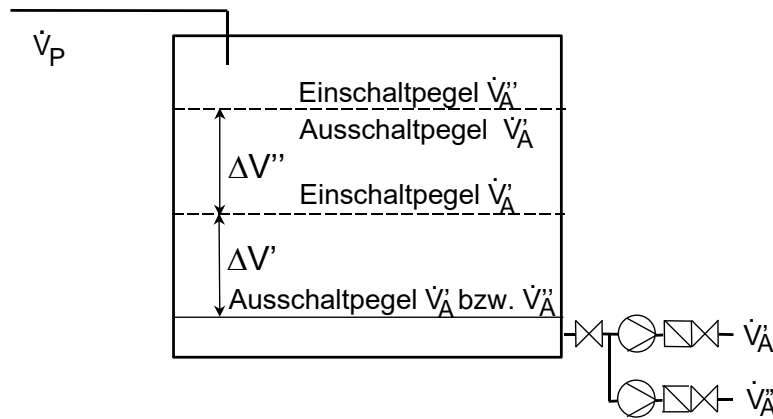
Im Bild 2 sind die Zusammenhänge Schalzhäufigkeit der Pumpe sowie Laufzeit der Pumpe und Füllzeit des Speichervolumens dargestellt. Selbstverständlich besteht ein Zusammenhang zwischen der Mindestlaufzeit der Fördereinrichtung und der maximalen Schalzhäufigkeit, welcher über die Gl. (1), (2), (4) und (7) gegeben ist. Auf diese Verknüpfung wurde in [1] leider nicht hingewiesen. Die dort gegebene Gleichung zur Berechnung des Speichervolumens beruht nicht auf der Schalzhäufigkeit wie eingangs im Text angekündigt, sondern auf der bedeutend einfacheren Forderung der Mindestlaufzeit. Damit besteht Identität zur Gl. (1) für  $\dot{V}_P = 0$ , d. h. ohne Zulaufstrom.



**Bild 2** Schalzhäufigkeit, Pumpenlaufzeit und Füllzeit in Abhängigkeit des Quotienten aus Zuflussstrom und Förderstrom ( $\dot{V}_P / \dot{V}_A$ ) mit den Daten aus Beispiel 1

## 3. Sammelbehälter mit zwei Förderstufen

Nach Bild 3 wird die Leerung des Speichervolumens  $\Delta V'$  zunächst mit Pumpe 1 mit dem Förderstrom  $\dot{V}'_A$  begonnen. Die maximal zulässige Schalzhäufigkeit beträgt  $n'_{\max}$ .



**Bild 3** Speicherbehälter mit diskontinuierlich arbeitender, zweistufiger Förderung  
 (Förderströme  $\equiv$  Aktivströme  $\dot{V}'_A$  und  $\dot{V}''_A$ ;  
 Zuflussstrom  $\equiv$  Passivstrom  $\dot{V}_P$ )

Ist der Zufluss  $\dot{V}_P < \dot{V}'_A$ , so wird sich der Speicher leeren und die Pumpe nach der Betriebszeit  $\tau'_A$  ausschalten, bei  $\dot{V}_P = \dot{V}'_A$  liegt Dauerbetrieb der Pumpe vor, und bei  $\dot{V}_P > \dot{V}'_A$  füllt sich der Behälter solange, bis das zusätzliche Volumen  $\Delta V''$  gespeichert ist. Bei Erreichen dieses Grenzwertes schaltet die kleine Pumpe ab, die größere mit dem Förderstrom  $\dot{V}''_A$  und der maximalen Schalzhäufigkeit  $n''_{\max}$  geht in Betrieb. Ist  $\dot{V}''_A > \dot{V}_P$ , schaltet die große Pumpe nach der Betriebszeit  $\tau''_A$  (Leeren von  $\Delta V'$  und  $\Delta V''$ ) ab, bei  $\dot{V}''_A = \dot{V}_P$  handelt es sich um Dauerbetrieb.

Während für das Fördersystem mit der kleinen Pumpe ( $\dot{V}'_A$ ,  $n'_{\max}$ ) und dem ersten Speicherabschnitt ( $\Delta V'$ ) die in Gl. (9) gezeigte Problematik gilt, ergeben sich für den Betriebszustand  $\dot{V}'_A < \dot{V}_P < \dot{V}''_A$ , bei dem die große Pumpe ( $\dot{V}''_A$ ,  $n''_{\max}$ ) und der zweite Speicherabschnitt  $\Delta V''$  zusätzlich eingeschaltet werden, kompliziertere Zusammenhänge. Die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pumpenschaltungen folgt aus der Summe von:

Füllzeit bis zum Einschalten der kleinen Pumpe

$$\tau'_P = \frac{\Delta V'}{\dot{V}_P} \quad (10)$$

Betriebszeit der kleinen Pumpe (Füllen des zweiten Speicherabschnittes)

$$\tau'_A = \frac{\Delta V''}{\dot{V}_P - \dot{V}'_A} \quad \text{bei } \dot{V}_P > \dot{V}'_A \quad (11)$$

Betriebszeit der großen Pumpe

$$\tau''_A = \frac{\Delta V' + \Delta V'' + \tau'_A \dot{V}_P}{\dot{V}''_A} \quad \text{bzw.} \quad \tau''_A = \frac{\Delta V' + \Delta V''}{\dot{V}''_A - \dot{V}_P} \quad (12)$$

mit dem Ergebnis

$$\Delta \tau = \tau'_P + \tau'_A + \tau''_A = \frac{\Delta V'}{\dot{V}_P} + \frac{\Delta V''}{\dot{V}_P - \dot{V}'_A} + \frac{\Delta V' + \Delta V''}{\dot{V}''_A - \dot{V}_P} \quad (13)$$

Die zulässige Schalzhäufigkeit ist bei großen Aggregaten niedriger als bei kleinen Aggregaten. Setzt man in Gl. (13)  $\Delta \tau = 1/n''$  und substituiert für  $\Delta V'$  Gl. (9) in modifizierter Schreibweise, so erhält man

$$\frac{1}{n''} = \frac{\dot{V}'_A}{4 n'} + \frac{\Delta V''}{\dot{V}_P - \dot{V}'_A} + \frac{\dot{V}'_A + \Delta V''}{\dot{V}''_A - \dot{V}_P} \quad (14)$$

Während  $\dot{V}'_A$  entsprechend den Betriebsbedingungen gewählt werden sollte, muß  $\dot{V}''_A$  gleich dem maximal möglichen Zufluss  $\dot{V}_{P,\max}$  sein. Die zulässigen Schalthäufigkeiten  $n'$  und  $n''$  sind technische Vorgaben. Um das  $\Delta V''$  nach Gl. (14) zu bemessen, ist das  $\dot{V}_p$  zu ermitteln, bei welchem die größte Schalthäufigkeit auftritt. Letzteres führt durch Differentiation und Nullsetzen zu folgender Bestimmungsgleichung:

$$\frac{d(1/n'')}{d\dot{V}_p} = -\frac{\dot{V}'_A}{4n'} - \frac{\Delta V''}{(\dot{V}_p - \dot{V}'_A)^2} + \frac{\dot{V}'_A + \Delta V''}{(\dot{V}'_A - \dot{V}_p)^2} = 0. \quad (15)$$

Da die zweite Ableitung eindeutig auf ein Maximum von  $n''$  hinweist, stellen die Gl. (14) und (15) das zu lösende System dar, wobei  $n'$  und  $n''$  stets die Maximalwerte sind. Nach umfangreicher Zwischenrechnung folgt als technisch sinnvolle Lösung

$$x = \frac{8 \frac{n'}{n''} y^3 - 1}{8 \frac{n'}{n''} y^2 - 2} + \sqrt{\left( \frac{8 \frac{n'}{n''} y^3 - 1}{8 \frac{n'}{n''} y^2 - 2} \right)^2 + \frac{4 \frac{n'}{n''} y^2 - 8 \frac{n'}{n''} y^3}{4 \frac{n'}{n''} y^2 - 1}} \quad (16)$$

mit den Abkürzungen (Hilfsgrößen)

$$x = \frac{\dot{V}''_A}{\dot{V}'_A} \quad \text{und} \quad y = \frac{\dot{V}_p}{\dot{V}'_A}. \quad (17)$$

Die rechentechnisch aufwendige Lösung dieses Zusammenhangs ist im Bild 4 für verschiedene  $n'/n''$  angegeben. Zu jedem vorgegebenen  $x$  gehört ein bestimmtes  $y$ . Beide Werte in die modifizierte Gl. (14) eingesetzt, liefern die Größe des zweiten Speicherabschnittes

$$\Delta V'' = \Delta V' \frac{4 \frac{n'}{n''} - \frac{1}{y} - \frac{1}{x-y}}{\frac{1}{x-y} + \frac{1}{y-1}}. \quad (18)$$

Interessant ist noch zu wissen, unter welchen Bedingungen der Speicher ( $\Delta V' + \Delta V''$ ) das kleinste Volumen annimmt. Ausgehend von der Gleichung

$$\Delta V' + \Delta V'' = \Delta V' \left( 1 + \frac{4 \frac{n'}{n''} - \frac{1}{y} - \frac{1}{x-y}}{\frac{1}{x-y} + \frac{1}{y-1}} \right)$$

$$\Delta V' + \Delta V'' = \frac{\dot{V}''_A - \dot{V}_p}{4n'} \frac{4 \frac{n'}{n''} (\dot{V}_p - \dot{V}'_A) + \frac{\dot{V}'_A{}^2}{\dot{V}_p}}{\dot{V}''_A - \dot{V}'_A}. \quad (19)$$

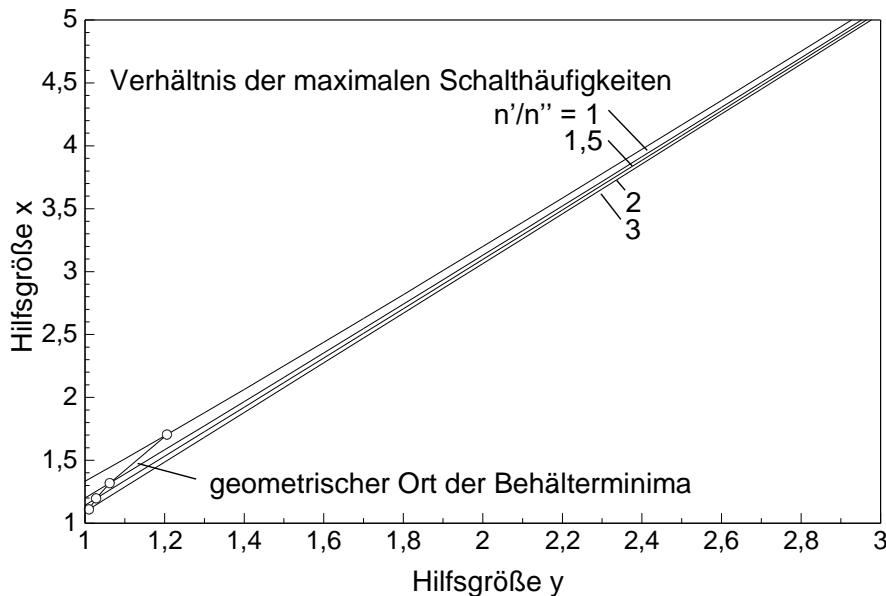
ergibt sich durch Differentiation

$$\frac{d(\Delta V' + \Delta V'')}{d\dot{V}'_A} = \frac{\dot{V}''_A - \dot{V}_p}{4n'} \frac{\left[ 4 \frac{n'}{n''} (\dot{V}_p - \dot{V}'_A) + \frac{\dot{V}'_A{}^2}{\dot{V}_p} \right] + (\dot{V}''_A - \dot{V}'_A) \left( -4 \frac{n'}{n''} + 2 \frac{\dot{V}'_A}{\dot{V}_p} \right)}{(\dot{V}''_A - \dot{V}'_A)^2} \quad (20)$$

und gleich Nullsetzen die Bestimmungsgleichung

$$x = \frac{4 \frac{n'}{n''} y^2 - 1}{4 \frac{n'}{n''} y - 2} \quad (21)$$

Im Bild 4 sind die geometrischen Orte, bei denen das Speichervolumen ein Minimum annimmt, eingezeichnet.



**Bild 4** Diagramm zur Auswertung der Gl. (16) mit den Hilfsgrößen  $x = \dot{V}_A'' / \dot{V}_A'$  und  $y = \dot{V}_P / \dot{V}_A'$

#### 4. Beispiel 2

Die in einem Sammelbehälter strömende Zuflussmenge schwankt im Bereich  $\dot{V}_P = 0 \dots 50 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die maximalen zulässigen Schalzhäufigkeiten betragen  $n' = 6 \text{ h}^{-1}$  und  $n'' = 4 \text{ h}^{-1}$ . Die Fördersysteme (Pumpe - Rohrleitung) wurden für  $\dot{V}_A' = 25 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $\dot{V}_A'' = 50 \text{ m}^3/\text{h}$  ausgelegt.

Das minimal notwendige Speichervolumen  $\Delta V'$  folgt aus Gl. (9) zu

$$\Delta V' = \frac{\dot{V}_A'}{4 n'} = \frac{25 \text{ m}^3/\text{h}}{4 \cdot 6 \text{ h}^{-1}} = 1,04 \text{ m}^3.$$

Für das Verhältnis  $x$  gilt nach Gl. (17)

$$x = \frac{\dot{V}_A''}{\dot{V}_A'} = \frac{50}{25} = 2,$$

wofür im Bild 4 ( $\frac{n'}{n''} = \frac{6}{4} = 1,5$ )

$$y = 1,42$$

abgelesen werden kann. Dies bedeutet, dass die maximale Schalzhäufigkeit bei einem Förderstrom von

$$\dot{V}_P = y \dot{V}_A' = 1,42 \cdot 25 \text{ m}^3/\text{h} = 35,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

auftritt. Das notwendige Speichervolumen  $\Delta V''$  ergibt sich nach Gl. (18) zu

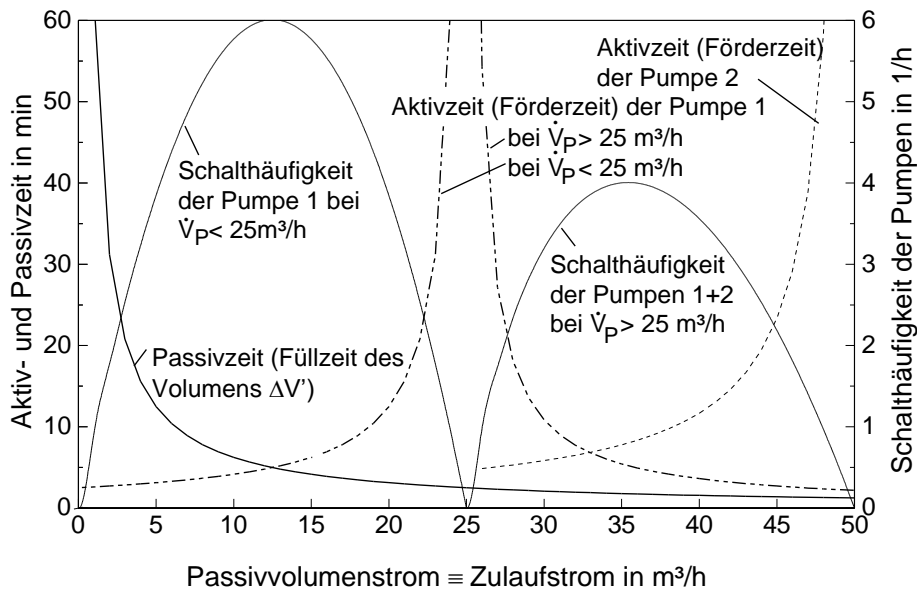
$$\Delta V'' = 1,04 \frac{4 \frac{6}{4} - \frac{1}{1,42} - \frac{1}{2-1,42}}{\frac{1}{2-1,42} + \frac{1}{1,42-1}} \text{ m}^3 = 0,905 \text{ m}^3.$$

Setzt man zur Probe die Werte in Gl. (13) ein, so ergibt sich

$$\Delta \tau = \frac{1,04 \text{ m}^3}{35,5 \text{ m}^3/\text{h}} + \frac{0,905 \text{ m}^3}{(35,5-25) \text{ m}^3/\text{h}} + \frac{(1,04+0,905) \text{ m}^3}{(50-35,5) \text{ m}^3/\text{h}} = 0,25 \text{ h};$$

d. h., die maximale Schalthäufigkeit beträgt gemäß der Forderung  $n'' = \frac{1}{0,25} \text{ h}^{-1} = 4 \text{ h}^{-1}$ .

Im Bild 5 sind wiederum die Zusammenhänge der Schalthäufigkeiten und Laufzeiten der beiden Pumpen bzw. Förderstufen sowie der Zulaufzeit aufgezeichnet.



**Bild 5** Schalthäufigkeiten, Pumpenlaufzeiten und Füllzeit in Abhängigkeit des Zuflussstromes ( $\equiv$  Passivstrom  $\dot{V}_P$ ) mit den Daten aus Beispiel 2

Wollte man in Abänderung des Beispiels den Sammelbehälter so klein wie möglich gestalten, so muss von der Festlegung der Fördermenge  $\dot{V}'_A$  abgegangen werden. Aus Bild 4 folgt, dass für  $\frac{n'}{n''} = 1,5$  das minimale Speichervolumen dann vorliegt, wenn  $x = 1,3$  und  $y = 1,06$  betragen. Nach Gl. (17) folgt

$$\dot{V}'_A = \frac{\dot{V}''_A}{x} = \frac{50}{1,3} \text{ m}^3/\text{h} = 38,5 \text{ m}^3/\text{h},$$

woraus nach Gl. (9)

$$\Delta V' = \frac{38,5}{4 \cdot 6} \text{ m}^3 = 1,6 \text{ m}^3$$

folgt. Der zweite Teil des Speichervolumens errechnet sich dann nach Gl. (18) zu

$$\Delta V'' = 1,6 \frac{4 \frac{6}{4} - \frac{1}{1,06} - \frac{1}{1,3-1,06}}{\frac{1}{1,3-1,06} + \frac{1}{1,06-1}} \text{ m}^3 = 0,07 \text{ m}^3.$$

Vergleicht man die Gesamtvolumina, so ergeben sich im ersten Fall rd.  $1,95 \text{ m}^3$  und im zweiten Fall  $1,67 \text{ m}^3$ . Hätte man ein Einstufensystem gewählt, so müsste der Behälter ein Nutzvolumen von  $3,13 \text{ m}^3$  haben.

Das Zweistufensystem mit minimiertem Speicherbehälter einzusetzen, ist praktisch bedeutungslos, da die Förderströme  $\dot{V}'_A$  und  $\dot{V}''_A$  - zumindest bei  $\frac{n'}{n''} > 1$  - nur sehr geringen Unterschied aufweisen.

## 5. Kalorischer Pufferspeicher

Diese Speicherart wird sowohl bei Wärme- oder Kältebereitstellern (kurz Bereitsteller) gleichermaßen eingesetzt (Bilder 6, 7). Die hydraulischen Anschlüsse der Bereitsteller und Verbraucher werden so vorgenommen, dass keine gegenseitige Beeinflussung erfolgt. Der Pufferspeicher arbeitet gleichzeitig als hydraulische Weiche. Die Be- und Entladung der Speicher erfolgt über gelochte Rohre, die beispielsweise auf einen Umfangswinkel von  $120^\circ$  zu den Böden hin angeordnet sind, oder über Behältereinbauten, die eine Mischung durch den Ein- und Austrittsstrom verhindern.

Parallel arbeitende Bereitsteller und Verbraucher können über einen gemeinsamen Anschluss an den Pufferspeicher oder - hydraulisch günstiger - getrennt, z. B. durch winkelfersetzt angeordnete, gelochte Rohre auf annähernd gleicher Behälterhöhe angebunden werden.

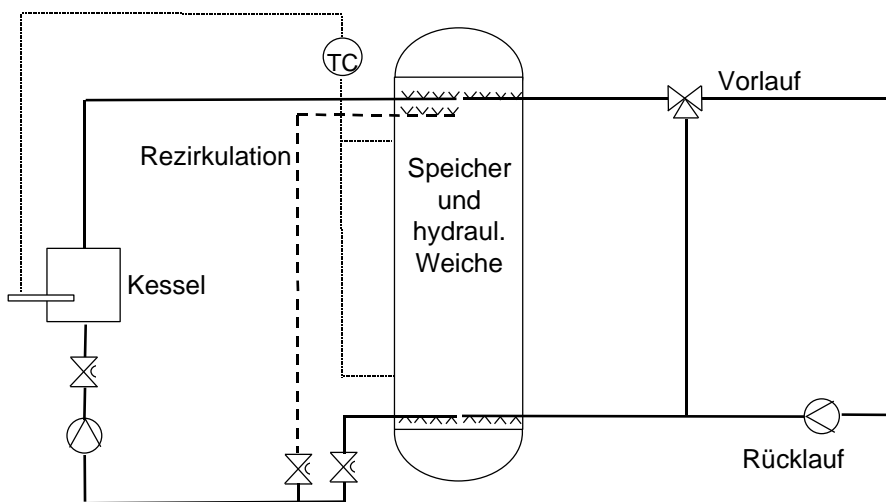
Die Betriebsdauer der Bereitsteller (Aktivzeit  $\tau_A$ ) beträgt bei der möglichen Speicherwärme  $\Delta Q$

$$\tau_A = \frac{\Delta Q}{\dot{Q}_A - \dot{Q}_P}, \quad (22)$$

die Entladezeit (Passivzeit  $\tau_P$ )

$$\tau_P = \frac{\Delta Q}{\dot{Q}_P}. \quad (23)$$

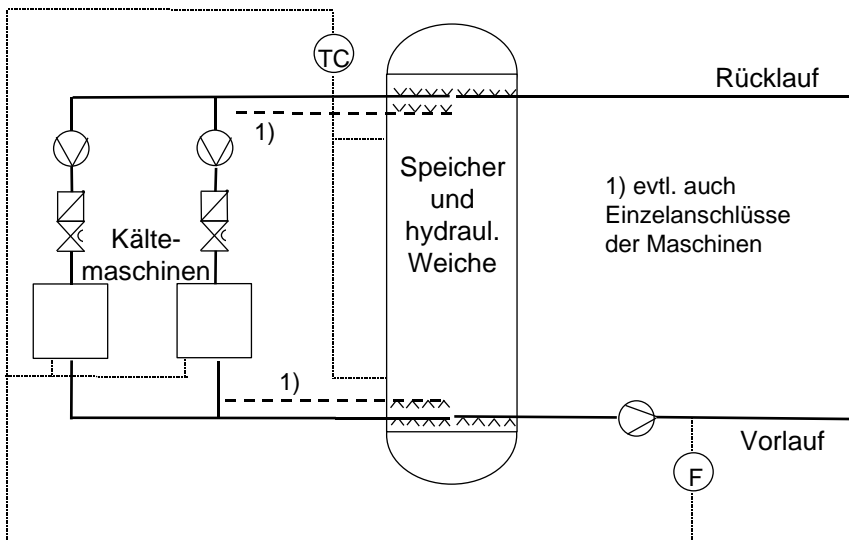
Die Analogie zwischen den Gln. (1) und (22) sowie (2) und (23) kann in eine direkte Vergleichbarkeit überführt werden, wenn man  $\dot{V}_A$  durch  $\dot{Q}_A$ ,  $\dot{V}_P$  durch  $\dot{Q}_P$  und  $\Delta V$  durch  $\Delta Q$  ersetzt.



**Bild 6** Einordnung eines "Wärme"-Pufferspeichers (Befüllung und Entnahme oben) zum Ausgleich der diskontinuierlichen Verbraucherentnahme und zur hydraulischen Entkopplung (hydraulische Weiche) mit Sicherung eines konstanten Massestromes durch den Kessel



Zur Anhebung der Kesselrücklauf­temperatur kann eine zusätzliche Rezirkulation realisiert werden. Alle Masseströme sind durch Drosselventile einstellbar.



**Bild 7** Einordnung eines "Kälte"-Pufferspeichers (Befüllung und Entnahme unten) zum Ausgleich der diskontinuierlichen Verbraucherentnahme und zur hydraulischen Entkopplung (hydraulische Weiche) mit Sicherung eines konstanten Massestromes durch die Kaltwassersätze. Die Masseströme parallelarbeitender Maschinen sind durch Drosselventile einstellbar.

Damit gelten auch alle Ableitungen über die Schalzhäufigkeit und Laufzeiten, d. h. die Gln. (3) bis (21). Etwas problematisch ist das Erfassen der Speicherwärme  $\Delta Q$ . Bei einem ideal arbeitenden Schichtenspeicher gilt

$$\Delta Q = V \rho c \Delta t \quad (24)$$

mit

$V$	$\text{m}^3$	wirksames Speichervolumen
$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$	Dichte
$c$	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität
$\Delta t$	$\text{K}$	Temperaturdifferenz im Speicher
$\Delta Q$	$\text{J}$	Speicher­kapazität.

Je nach Konstruktion des Puffergefäßes und der Betriebsweise ergibt sich der Zusammenhang zwischen Behältervolumen  $V_B$  und wirksamem Speichervolumen  $V$  näherungsweise

$$V_B \approx 2V. \quad (25)$$

Teilweise kann man je nach Schaltungsart auch das Netz mit einbeziehen.

Handelt es sich beispielsweise um einen Kaltwassersatz mit einer Leistungsstufe, so ergibt sich aus Gl. (9) nach der analogen Übertragung bei vorgegebenem Ladefluss  $\dot{Q}_A$  und der maximalen Schalzhäufigkeit  $n_{\max}$  die erforderliche Speicher­kapazität zu

$$\Delta Q = \frac{\dot{Q}_A}{4 n_{\max}}. \quad (26)$$

Die Substitution der Gl. (24) liefert das erforderliche Speichervolumen

$$V = \frac{\dot{Q}_A}{4 \rho c \Delta t n_{\max}}, \quad (27)$$

woraus mit Gl. (25) näherungsweise das notwendige Behältervolumen folgt

$$V_B = 0,5 \frac{\dot{Q}_A}{\rho c \Delta t n_{\max}}. \quad (28)$$

In analoger Weise sind die zweistufig arbeitenden Systeme umsetzbar. Unabhängig davon, ob es sich um Wärme- oder Kältebereitstellungsanlagen handelt, sollten die aktiven und passiven Wärmeströme  $\dot{Q}_A$  und  $\dot{Q}_P$  sowie die Speicherkapazität  $\Delta Q$  jeweils positiv eingesetzt werden.

## Literatur

- [1] JACOBOWSKY, H.: Funktionsstörungen der Kälteanlage bei falscher Verrohrung. Ki Luft- und Kältetechnik 6/1998
- [2] GLÜCK, B.: Bemessung von Sammelbehältern mit diskontinuierlichem Zu- oder Abfluss. Stadt- und Gebäudetechnik 2/1973
- [3] GLÜCK, B.: Einsatz eines Pufferspeichers zum Ausgleich intermittierend arbeitender Wärmeleistungsstufen. Stadt- und Gebäudetechnik 4/1983