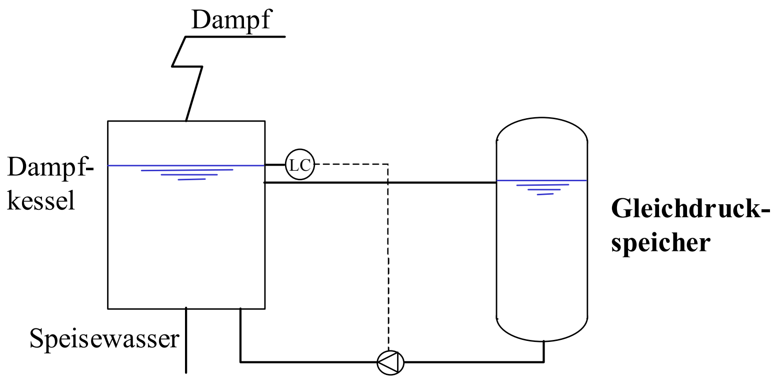
Gefälle-Dampfspeicher

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Jößnitz (Plauen) – Oktober 2012

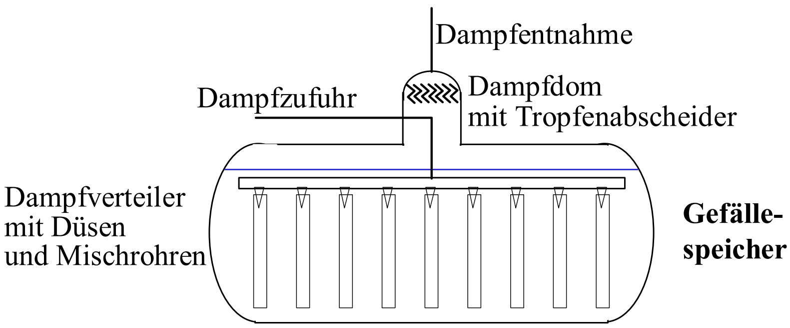
1. Übersicht und Konstruktionsprinzip

Heute wird Dampf fast ausschließlich technologisch genutzt. Da der Dampfbedarf prozessbedingt oftmals periodischen Schwankungen unterliegt, die Bereitstellung aber vorzugsweise konstant erfolgt, versucht man den Ausgleich zwischen Bedarf und Lieferung durch Einschalten eines Dampfspeichers zu realisieren.

Der *Gleichdruckspeicher* stellt praktisch eine Vergrößerung des Kesselwasserraumes dar. Bei der Speicherladung wird Siedewasser aus dem Kessel in den Speicher geleitet. Bei erhöhtem Dampfbedarf wird dem Dampferzeuger Wasser aus dem Speicher von fast Siedetemperatur zugeführt, wodurch die Dampfabgabe des Kessels gesteigert werden kann. Im Speicher herrscht stets annähernd gleicher Druck, deshalb die Bezeichnung Gleichdruckspeicher.



Zur direkten Dampfbereitstellung eignet sich der *Gefällespeicher*, der nach seinem Erfinder dem schwedischen Ingenieur J. K. Ruths (1879 bis 1935) auch Ruhts-Speicher genannt wird. Dem Speicher wird bei Beladung Dampf aus einem Dampfkessel oder einer Turbinenanzapfung zugeführt. Der Dampf kondensiert bei Einleitung im Wasserraum des Speichers und erhöht den Wasserstand im Speicher. Der Druck und die Temperatur im Speicher steigen an. – Bei Entnahme von Sattdampf nimmt der Druck im Speicher ab, wodurch eine Teilwassermenge verdampft. Die Verdampfungswärme wird dem gespeicherten Wasser entzogen. Druck und Temperatur entsprechen stets dem jeweiligen Sattdampfzustand. Die Wassermenge im Speicher verringert sich. Da der Dampfdruck bei Entnahme niedriger wird, folgte der Name Gefällespeicher.



Im Weiteren wird der Gefällespeicher betrachtet. Die Berechnung der thermodynamischen Verhältnisse ist relativ kompliziert.

2. Thermodynamische Grundlagen für die Speicherberechnung

Beim Betrieb eines Dampfspeichers – Be- und Entladung – handelt es sich um einen instationären thermodynamischen Prozess in einem offenen (nicht stoffdichten) System.

Geht man davon aus, dass der Speicherbehälter ein unveränderliches Volumen V besitzt, so kann keine Volumenänderungsarbeit und in der Regel auch keine Reibungsarbeit auftreten:

$$W_{v,12} = -\int_1^2 p\, \mathrm{d}V = 0,\ \ W_{R,12} = 0. \tag{1}$$

Damit reduziert sich der 1. Hauptsatz auf den Zusammenhang:

$$Q_{12} = U_2 - U_1. \tag{2}$$

Dem System wird auch keine technische Arbeit in Form von Wellenarbeit oder elektrischer Arbeit (z. B. interne Heizung) zu- bzw. abgeführt.

Die Besonderheit besteht aber darin, dass über die Systemgrenze ein Stoffstrom $\dot{m}$ mit der spezifischen Enthalpie h, der spezifischen kinetischen Energie $c^2/2$ und der potenziellen Energie gz während des Zeitraumes dτ tritt. Ändern sich während des Zeitintervalls ($\tau_2 - \tau_1$) der Stoffstrom und/oder die Zustandsgrößen, so ist für die eintretende bzw. austretende Energie das jeweilige Integral zu bilden:

$$E_{\text{ein}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m}_{\text{ein}} \left(h_{\text{ein}} + \frac{c_{\text{ein}}^2}{2} + \mathrm{g} z_{\text{ein}} \right) \mathrm{d}\tau \ \ ; \ \ E_{\text{aus}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m}_{\text{aus}} \left(h_{\text{aus}} + \frac{c_{\text{aus}}^2}{2} + \mathrm{g} z_{\text{aus}} \right) \mathrm{d}\tau\, . \tag{3}$$

Somit gilt im betrachteten Fall für den 1. Hautsatz unter Beachtung, dass die dem System zugeführte Energie positiv gezählt wird:

$$Q_{12} + E_{\text{ein}} - E_{\text{aus}} = U_2 - U_1. \tag{4}$$

Bei den technischen Gegebenheiten können in der Regel die kinetischen und potenziellen Energieanteile gegenüber der Enthalpie vernachlässigt werden. So gilt beispielsweise für Sattdampf von 4 bar(abs) h'' = 2739 kJ/kg, für die Geschwindigkeit c = 30 m/s der Term $c^2/2$ = 0,45 kJ/kg sowie für die Höhe z = 4 m der Wert gz = 0,039 kJ/kg.

Damit kann man mit ausreichender Genauigkeit Gl. (4) schreiben:

$$Q_{12} + \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m}_{\text{ein}}\, h_{\text{ein}}\, \mathrm{d}\tau - \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m}_{\text{aus}}\, h_{\text{aus}}\, \mathrm{d}\tau = U_2 - U_1. \tag{5}$$

Diskussion der einzelnen Größen:

Q_{12} ist die Wärme, die dem Speicherinhalt – dem Wasser-Dampf-Gemisch – über die Behälterwandung zugeführt wird. In der Regel gilt infolge von Wärmeverlusten $Q_{12} < 0$. Bei einer idealen Dämmung könnte $Q_{12} = 0$ sein.

Bei genauer Berechnung muss auch die zeitliche Änderung der Behälterwandtemperatur berücksichtigt werden. Entnimmt man beispielsweise während der Entnahmephase einem Gefällespeicher Sattdampf, so sinken Dampfdruck und Dampftemperatur. Damit kühlt sich während des instationären Vorganges auch die Behälterwand ab. Diese entspeicherte Wärme fließt dem Behälterinhalt (Dampf plus Wasser) als $Q_{12} > 0$ zu. Die Größe ist von der Behälterkonstruktion, den Wärmeübergangsbedingungen, dem Wasserfüllstand im Speicher usw. abhängig. Vergleicht man die Wärmekapazität des Behältermaterials mit dem des Wassers im Behälter bei 90 % Füllung ergibt sich beispielsweise für die Kugelform: $(m\, c)_{\text{Behälter}} / (m\, c)_{\text{Wasserfüllung}} = (4\, \pi\, r^2\, \delta_{\text{Stahl}}\, \rho_{\text{Stahl}}\, c_{\text{Stahl}}) / (4/3\, \pi\, r^3\, 0{,}9\, \rho_{\text{Wasser}}\, c_{\text{Wasser}})$ $= (\delta_{\text{Stahl}}\, 7800 \cdot 460) / r\, 0{,}3 \cdot 920 \cdot 4300) = 3 \cdot \delta_{\text{Stahl}} / r \rightarrow$ Größenordnung: 0,03. Bei realen Konstruktionen ist der Wert größer, beispielsweise 0,05. In erster Näherung kann die

Wärmespeicherung und -entspeicherung der Behälterwand vernachlässigt werden, denn sie tritt wechselweise auf und bewirkt wegen der vergleichsweise geringen Wärmespeicherkapazität gegenüber der des Wassers nur eine sehr geringe Änderung der Siedetemperatur.

U_1, U_2 stellt die innere Energie des Wasser-Sattdampf-Gemisches im Behälter zu Beginn 1 und am Ende 2 des betrachteten Zeitintervalls dar. Sie ist jeweils die Summe aus den Einzelanteilen:

$$U = U' + U'' = m'u' + m''u''. \quad (6)$$

Da üblicherweise in den sogenannten Dampftafeln nur die spezifische Enthalpie h' und h'' angegeben wird, bedient man sich der Umrechnung $h = u + p\,v$ und schreibt unter Beachtung, dass der Behälterdruck p für beide Phasen gilt:

$$U = U' + U'' = m'(h' - p\,v') + m''(h'' - p\,v''). \quad (7)$$

Da das Wasser-Sattdampf-Gemisch stets das gesamte Behältervolumen

$$V = m'\,v' + m''\,v'' \quad (8)$$

ausfüllt, folgt weiter:

$$U = U' + U'' = m'\,h' + m''\,h'' - p\,V \approx m'\,h' + m''\,h''. \quad (9)$$

$\dot{m}_{\text{ein}}$ verkörpert den zur Speicherbeladung einströmenden Dampfstrom. Er wird beispielsweise einer Turbinenanzapfung entnommen. Zu ihm gehört die spezifische Enthalpie h_{ein}. In der Regel handelt es sich um leicht überhitzten Dampf. h_{ein} gilt unabhängig von der Art der Dampfeinführung, da auch bei einem Drosselvorgang die spezifische Enthalpie erhalten bleibt.

In vielen Fällen wird es sich während des Ladeintervalls um konstante Größen handeln, sodass gilt:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m}_{\text{ein}}\, h_{\text{ein}}\, \mathrm{d}\tau = \dot{m}_{\text{ein}}\, h_{\text{ein}}\, (\tau_2 - \tau_1) = m_{\text{ein}}\, h_{\text{ein}}. \quad (10)$$

$\dot{m}_{\text{aus}}$ ist der bei der Speicherentladung verfügbare Nutzdampfstrom. Üblicherweise ist er technologisch bedingt und somit meistens konstant. Er kann aber auch eine Funktion der Lieferfähigkeit des Speichers (d. h. der Verdampfung) und damit zeitabhängig sein. Abgegeben wird trocken gesättigter Dampf. Die zu ihm gehörige spezifische Enthalpie h_{aus} ist vom Dampfdruck im Speicher abhängig, sodass $h_{\text{aus}} = h''_{\text{aus}}(\tau)$ gilt. Da mit zunehmender Entladung der Dampfdruck sinkt, wird man zur praktischen Berechnung kleine Zeitintervalle verwenden und während dieser jeweils mit einer konstanten Größen rechnen. Somit wird das Integral in eine Summe i = 1 ... n von Teilabschnitten $\Delta\tau_i$ aufgelöst.

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m}_{\text{aus}}\, h_{\text{aus}}\, \mathrm{d}\tau = \sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{\text{aus,i}}\, h''_{\text{aus,i}}\, \Delta\tau_i \qquad \text{mit} \quad n\,\Delta\tau_i = \tau_2 - \tau_1. \quad (11)$$

Während die Beladung des Speichers in der Regel relativ einfach zu berechnen ist, steigt der Aufwand bei der Entladung oder gar bei der kombinierten Be- und Entladung beträchtlich an. Für Mehrfachanwendungen werde die Entwicklung eines Simulationsmodells empfohlen.

3. Näherungsweise Größenbestimmung des Speichers

Die im Abschnitt 2 dargestellten Zusammenhänge eignen sich für eine Nachrechnung des Be- und Entladeverhaltens eines bestehenden Dampfspeichers. Um aber die Größe des Dampfspeicher mit einfachen Mitteln festlegen zu können, bedarf es einer überschläglichen Bemessung.

Dabei wird von Gl. (5) ausgegangen und mit Vereinfachungen die Entladung des Speichers betrachtet:

$$Q_{12} + \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m}_{\mathrm{ein}}\, h_{\mathrm{ein}}\, \mathrm{d}\tau - \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m}_{\mathrm{aus}}\, h_{\mathrm{aus}}\, \mathrm{d}\tau = U_2 - U_1.$$

Bei idealer Wärmedämmung und Vernachlässigung der Wärmekapazität der Behälterwandung sowie bei abgestellter Dampfzufuhr während der Entladung gilt:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m}_{\mathrm{aus}}\, h_{\mathrm{aus}}\, \mathrm{d}\tau = U_1 - U_2. \tag{12}$$

Setzt man überschläglich $u' \approx h'$ und $u'' \approx h''$, so kann man für die Energie zur Dampfbereitstellung schreiben:

$$U_1 - U_2 = m_1' h_1' + m_1'' h_1'' - m_2' h_2' - m_2'' h_2''. \tag{13}$$

Die jeweils im Dampfraum über dem Siedewasser gespeicherte Energie ist bei den praktischen Füllgraden des Speichers relativ gering (< 0,5 %). Zudem unterscheiden sich die Vorzeichen, sodass näherungsweise $m_1'' h_1'' - m_2'' h_2'' \approx 0$ gilt. Damit vereinfacht sich die Gl. (13) zu:

$$U_1 - U_2 = m_1' h_1' - m_2' h_2'. \tag{14}$$

Die Genauigkeit dieser Näherungen wird in einer Sonderrechnung zum nachfolgenden Beispiel 1 gezeigt.

Der abgegebene Sattdampf besitzt zu Beginn der Dampfentnahme die Enthalpie h_1'' und am Ende h_2''. Die lineare Mittelung ergibt die aus dem Speicher entnommene Energie gemäß Gl. (12) zu:

$$m_{\mathrm{Dampf}} \left(\frac{h_1'' + h_2''}{2} \right) \approx U_1 - U_2. \tag{15}$$

Damit nimmt Gl. (14) schrittweise die folgenden Formen an:

$$m_{\mathrm{Dampf}} \left(\frac{h_1'' + h_2''}{2} \right) = m_1' h_1' - m_2' h_2' \qquad \text{und mit} \quad m_2' \approx m_1' - m_{\mathrm{Dampf}}$$

$$m_{\mathrm{Dampf}} \left(\frac{h_1'' + h_2''}{2} \right) = m_1' h_1' - (m_1' - m_{\mathrm{Dampf}})\, h_2'$$

$$m_{\mathrm{Dampf}} \left(\frac{h_1'' + h_2''}{2} - h_2' \right) = m_1' (h_1' - h_2'). \tag{16}$$

Da man das Behältervolumen V_{B} sucht, ist ein Zusammenhang zur maximalen Wasserfüllung, die zu Beginn der Entspeicherung vorliegt, herzustellen. Dazu wird der Füllgrad β definiert:

$$\beta = \frac{m_1' v_1'}{V_B} . \tag{17}$$

Üblicherweise liegt er zwischen 0,90 bis 0,95.

Die Substitution in Gl. (16) liefert:

$$\frac{m_{Dampf}}{V_B} = \frac{\beta}{v_1'} \frac{h_1' - h_2'}{0{,}5\,(h_1'' + h_2'') - h_2'} . \tag{18}$$

Damit ist eine Berechnungsmöglichkeit geschaffen, die angibt welche Dampfmasse aus dem Speichervolumen mit dem maximalen Füllgrad β zwischen den definierten Zuständen 1 und 2 entnehmbar ist.

4. Beispiel – Entladung

Technologisch bedingt werden in regelmäßigen Abständen für eine Prozessdurchführung 16 t Sattdampf benötigt. Die Dampftemperatur darf zwischen den Temperaturen von 200 °C bis 150 °C schwanken. Da der Dampferzeuger eine derartige Leistungsschwankung nicht realisieren kann, soll ein Gefälle-Dampfspeicher konzipiert werden. Wie groß ist dieser zu bemessen, wenn er mit maximal 90 % Siedewasser gefüllt sein darf?

Lösung

Gemäß Wasserdampftafel gelten nachfolgende Grenzparameter.

Beginn der Entladung: t_1 = 200 °C, p_1 = 15,55 bar(abs), v_1' = 0,0011565 m³/kg, v_1'' = 0,1271 m³/kg, h_1' = 852,4 kJ/kg, h_1'' = 2791 kJ/kg

Ende der Entladung: t_2 = 150 °C, p_2 = 4,76 bar(abs), v_2' = 0,0010908 m³/kg, v_2'' = 0,3926 m³/kg, h_2' = 632,2 kJ/kg, h_2'' = 2746 kJ/kg.

Gl. (18) liefert

$$\frac{m_{Dampf}}{V_B} = \frac{0{,}9}{0{,}0011565} \frac{852{,}4 - 632{,}2}{0{,}5\,(2791 + 2746) - 632{,}2} \text{ kg/m}^3 = 80{,}214 \text{ kg/m}^3,$$

woraus das Behältervolumen zu

V_B = 16000 / 80,214 m³ = 199,5 m³ folgt.

Gewählt: V_B = 200 m³. Damit ist die Aufgabe gelöst.

Nachbetrachtung:

Die in Gl. (14) eingeführte Näherung soll – wie oben versprochen – näher untersucht werden.

Zu *Beginn der Entladung* ergeben sich:

$$m_1' = \frac{0{,}9 V_B}{v_1'} = \frac{0{,}9 \cdot 200}{0{,}0011565} \text{kg} = 155642 \text{kg}, \quad m_1'' = \frac{0{,}1 V_B}{v_1''} = \frac{0{,}1 \cdot 200}{0{,}1271} \text{kg} = 157 \text{kg}, \quad m_1 = 155799 \text{ kg}$$

$m_1' h_1'$ = 155642 · 852,4 kJ = 132669241 kJ, $m_1'' h_1''$ = 157 · 2791 kJ = 438187 kJ

$$\frac{m_1'' \, h_1''}{m_1' \, h_1'} 100\ \% = 0{,}33\ \%.$$

Am *Ende der Entladung* beträgt die Gesamtmasse im Speicher

$m_2 = m_1 - m_{\mathrm{Dampf}} = 155799\ \mathrm{kg} - 16000\ \mathrm{kg} = 139799\ \mathrm{kg}.$

Die Masseanteile m_2' und m_2'' bestimmen sich aus der Volumenbilanz:

$$V_{\mathrm{B}} = m_2' \, v_2' + m_2'' \, v_2'' = m_2' \, v_2' + (m_2 - m_2') \, v_2''$$

$$m_2' = \frac{V_{\mathrm{B}} - m_2 v_2''}{v_2' - v_2''} = \frac{200 - 139799 \cdot 0{,}3926}{0{,}0010908 - 0{,}3926} \mathrm{kg} = 139678\ \mathrm{kg}\ ; \qquad m_2'' = 121\ \mathrm{kg}.$$

Damit ergeben sich weiter:

$m_2' \, h_2' = 139678 \cdot 632{,}2\ \mathrm{kJ} = 88304432\ \mathrm{kJ},\ m_2'' \, h_2'' = 121 \cdot 2746\ \mathrm{kJ} = 332266\ \mathrm{kJ}$

$$\frac{m_2'' \, h_2''}{m_2' \, h_2'} 100\ \% = 0{,}38\ \%.$$

Sowohl bei Entladungsbeginn als auch am Entladungsende ist der vernachlässigte Energieanteil des Sattdampfes <0,5 %.

Betrachtet man die in den Gln. (9) und (14) implizierten Näherungen, so ergeben sich:

$(U_1 - U_2)_{\mathrm{exakt}} = m_1' \, h_1' + m_1'' \, h_1'' - m_2' \, h_2' - m_2'' \, h_2'' - (p_1 - p_2) V\ .$

$U_1 - U_2 = 132669241\ \mathrm{kJ} + 438187\ \mathrm{kJ} - 88304432\ \mathrm{kJ} - 332266\ \mathrm{kJ} - 215800\ \mathrm{kJ} = 44254930\ \mathrm{kJ}$

$(U_1 - U_2)_{\mathrm{Näherung}} = m_1' \, h_1' - m_2' \, h_2' = 132669241\ \mathrm{kJ} - 88304432\ \mathrm{kJ} = 44364809\ \mathrm{kJ}.$

Damit ist die Näherung um den Faktor 1,002 (0,25 %) größer als der reale Wert. D. h., die vorgenommenen Näherungen sind praxisnah!

5. Beispiel – Beladung

Der entladene Dampfspeicher soll mit leicht überhitztem Dampf (t_3 = 220 °C, p_3 = 20 bar(abs), h_3 = 2820,4 kJ/kg beladen werden. Um die entnommene Dampfmasse zu ersetzen, ist eine Masse von 16 t zuzuführen. Man diskutiere theoretische und durch die Regelung praktizierte Verfahren und die sich im Dampfspeicher einstellenden Zustände.

Lösung

Beim Ersatz der entnommenen Dampfmenge m_{ein} = 16000 kg wird natürlich am Ende der Ladung die Masse $m_3 = m_1$ = 155799 kg vorhanden sein.

Da der überhitzte Dampf in das Siedewasser induziert wurde, wird im Ergebnis wiederum ein Siedewasser-Sattdampf-Gemisch vorliegen.

Ausgehend von Gl. (5) folgt für die Energiebilanz bei der Beladung, wenn weiterhin kein Wärmeverlust nach außen und keine Wärmespeicherung in der Behälterwandung angenommen wird (entladener Zustand 2, beladener Zustand 3)

$$\int_{\tau_2}^{\tau_3} \dot{m}_{\text{ein}}\, h_{\text{ein}}\, d\tau = U_3 - U_2. \tag{19}$$

Da $h_{\text{ein}} = h_3$ während des Füllens gilt, kann das Integral in einfacher Weise geschrieben werden:

$m_{\text{ein}}\, h_3 = U_3 - U_2$.

Die dem Speicher zugeführte Energie beträgt:

$m_{\text{ein}}\, h_3 = 16000 \cdot 2820{,}4$ kJ $= 45126400$ kJ.

Die überschlägliche Energieentnahme betrug nach Gl. (15)

$$m_{\text{Dampf}} \left(\frac{h_1'' + h_2''}{2} \right) = 16000 \left(\frac{2791 + 2746}{2} \right) \text{kJ} = 44296000 \text{ kJ}.$$

Damit ist die zugeführte Energie um 1,9 % größer als die entnommene Energie.

- Fall 1 (theoretische Variante):

Würde die Dampfmenge von 16 t zugeführt, stellte sich im Dampfspeicher ein höherer Druck ein, sodass das folgende Gleichungssystem erfüllt wäre:

$$V_{\text{B}} = m_3'\, v_3' + m_3''\, v_3'' \qquad \text{und} \qquad m_3'\, h_3' + m_3''\, h_3'' = m_2'\, h_2' + m_2''\, h_2'' + m_{ein}\, h_3. \tag{20}$$

- Fall 2 (praktische Variante):

Um die Startverhältnisse (Zustand 1) wieder zu erreichen, müsste eine geringere Heißdampfmenge $m_{\text{ein}}^* < m_{\text{ein}} = 16000$ kg zugeführt und der Rest mit Wasser $m_{\text{Wasser}} = 16000$ kg $- m_{\text{ein}}^*$ der Enthalpie h_{Wasser} ergänzt werden, sodass die Bilanz

$m_{\text{ein}}^*\, h_3 + m_{\text{Wasser}}\, h_{\text{Wasser}} = 44296000$ kJ

erfüllt ist.

In der Realität treten natürlich doch Wärmeverluste des Speichers auf, sodass ein entsprechender Energiemehrbetrag zugeführt werden muss. Ansonsten halten die Druckregelung den maximalen Druck und die Wasserstandsregelung den maximalen Stand des Siedewassers im Speicherbehälter bei voller Beladung konstant. Damit wird automatisch die Zufuhr der geforderten Dampf- und Wassermenge realisiert.