

1.4.4 Die Phasenübergänge

In den Anwendungsgebieten der technischen Thermodynamik treten, wie bereits erläutert, Stoffe meist nur als Fluide, d. h. als Flüssigkeiten oder Gase bzw. Dampf, auf. Daher wird im Folgenden der Übergang zwischen diesen beiden Phasen in Ergänzung zu den Ausführungen in Abschnitt 1.4.1 genauer behandelt.

Dass dabei einige Aussagen aus Abschnitt 1.4.1 erneut aufgegriffen werden, soll u. a. der Verfestigung der Begrifflichkeiten dienen.



Betrachtet wird ein geschlossenes System in Form eines Zylinders, verschlossen mit einem Kolben, das in Abbildung 14 dargestellt ist. Die Nummerierung der gezeigten Zustände korrespondiert dabei mit der in Abbildung 10 bereits eingeführten.

Im Zylinder befindet sich am Anfang beispielhaft flüssiges Wasser, wie aus der Wasserleitung entnehmbar (Zustand 5), der Masse m . Der Kolben ist im Zylinder reibungsfrei beweglich. Die Kolbenkraft soll konstant sein, so dass für den im Zylinder herrschenden Druck $p = \text{const}$ für die weiteren Betrachtungen gilt.

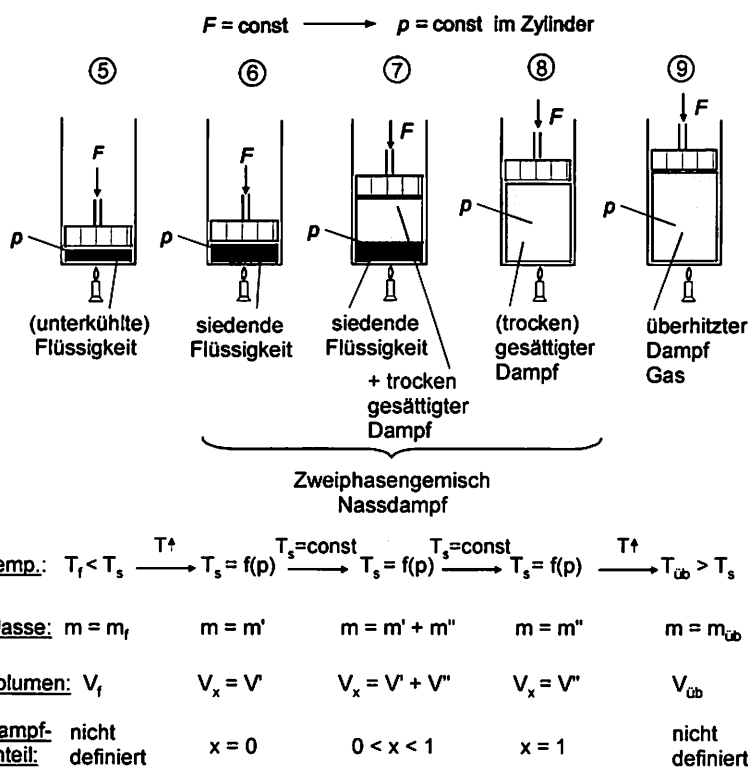


Abbildung 14: Isobare Erwärmung, Verdampfung und Überhitzung

Im Zustand 5 ist die Temperatur $T = T_f$ des flüssigen Wassers geringer als die zum Druck gehörende Sättigungstemperatur $T < T_s(p)$. Es wird deshalb als *unterkühlte Flüssigkeit* bezeichnet, wobei in der Praxis oft auf den Zusatz unterkühlt verzichtet wird. Dem Wasser wird nun Wärme zugeführt. Aufgrund der Temperaturerhöhung nimmt die Dichte des Wassers oberhalb 4 °C etwas ab, sodass der Kolben geringfügig angehoben wird.

Bis zum Erreichen der Siede- bzw. Sättigungstemperatur $T = T_s(p)$ in Zustand 6 in Abbildung 10 und in Abbildung 14 bleibt das Wasser im Zylinder flüssig. Eine Flüssig-

sigkeit bei Siedetemperatur wird *siedende Flüssigkeit* genannt. Das grafische Abbild aller möglichen Zustände siedender Flüssigkeit bei verschiedenen Drücken in den Zustandsdiagrammen ist die Siedelinie.

Die spezifischen Zustandsgrößen der siedenden Flüssigkeit werden mit einem hochgestellten Strich als Zeiger gekennzeichnet. Für eine beliebige spezifische Zustandsgröße z hat deren korrekte Schreibweise für Zustände siedender Flüssigkeit die Form z' . Sie ist abhängig von der Temperatur T bzw. dem zugehörigen Druck p , d. h. es gilt $z' = z'(T)$ bzw. $z' = z'(p)$, da p und T über $p_s(T)$ bzw. $T_s(p)$ zusammenhängen.



Als Beispiel finden Sie das spezifische Volumen v' die spezifische Enthalpie h' und die spezifische Entropie s' siedender Wasserflüssigkeit aufgelistet nach der Temperatur ϑ^9 in Tabelle A7a und nach dem Druck p in Tabelle A7b in der Stoffwert- und Diagrammsammlung zu diesem Studienbrief.

Durch weitere Wärmezufuhr beginnt das siedende Wasser zu verdampfen, beispielhaft in Abbildung 14 und Abbildung 10 als Zustand 7 gezeigt. Über der siedenden Flüssigkeit entsteht Dampf bei der Siedetemperatur $T < T_s(p)$, den man als *trocken gesättigten Dampf* (der Zusatz trocken wird in der Praxis meistens ebenfalls nicht verwendet) oder auch als *Sattdampf* bezeichnet. Die Siedetemperatur $T = T_s(p)$ bleibt während der Verdampfung konstant, da die zugeführte Energie für den Phasenwechsel benötigt wird.

Die spezifischen Zustandsgrößen des gesättigten Dampfes werden mit zwei hochgestellten Strichen als Zeiger gekennzeichnet. Für eine beliebige spezifische Zustandsgröße z hat deren korrekte Schreibweise für Zustände gesättigten Dampfes die Form z'' . Sie ist abhängig von der Temperatur T bzw. dem zugehörigen Druck p , d. h. es gilt $z'' = z''(T)$ bzw. $z'' = z''(p)$.



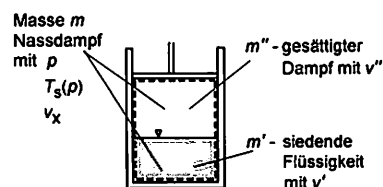
Als Beispiel finden Sie das spezifische Volumen v'' die spezifische Enthalpie h'' und die spezifische Entropie s'' des gesättigten Dampfes von Wasser aufgelistet nach der Temperatur ϑ in Tabelle A7a und nach dem Druck p in Tabelle A7b in der Stoffwert- und Diagrammsammlung zu diesem Studienbrief.



Für alle wichtigen Stoffe sind Tabellen mit Werten für v' und v'' in den entsprechenden Kompendien thermophysikalischer Stoffdaten zu finden.

In Zustand 7 befinden sich, wie in Abbildung 15 nochmals deutlich hervorgehoben, gleichzeitig siedende Flüssigkeit der Masse m' und (trocken) gesättigter Dampf der Masse m'' im System.

Abbildung 15:
Zusammensetzung von
Nassdampf in einem
geschlossenen System



9 Die Zustandsgrößen der Stoffe werden für die Vorgänge der Verdampfung nicht nur in diesen Tabellen nach der Celsius-Temperatur ϑ geordnet angegeben.

Ein solches Zweiphasengemisch wird *Nassdampf* genannt. Somit ergibt sich die Masse m des Zweiphasengemisches Nassdampf mit

$$m = m' + m'' \quad (20)$$

Bei offenen Systemen spricht man von Nassdampf, in einer *Zweiphasenströmung*. Diese kann, wie in Abbildung 16 dargestellt, als Dampfströmung mit Flüssigkeitstropfen oder als Flüssigkeitsströmung mit Dampfblasen vorliegen.

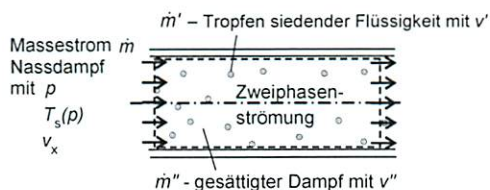


Abbildung 16:
Zusammensetzung von
Nassdampf in einem
offenen System

Der Massestrom \dot{m} dieser Zweiphasenströmung setzt sich analog der Masse m des Nassdampfs zusammen:

$$\dot{m} = \dot{m}' + \dot{m}'' \quad (21)$$

Welche Masse m'' bereits verdampft ist, wird durch den Dampfanteil (exakt Dampfmasseanteil)

$$x = \frac{m''}{m} = \frac{m''}{(m' + m'')} \quad \text{bzw.} \quad x = \frac{\dot{m}''}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}''}{(\dot{m}' + \dot{m}'')} \quad (22)$$

auch als *Dampfgehalt* bezeichnet, angegeben.

Liegt die gesamte Masse als siedende Flüssigkeit vor, d. h. $m = m'$ und $m'' = 0$, so ergibt sich $x = 0$. Dies war im Zustand 6 der Fall.

Nachdem die gesamte Flüssigkeit vollständig verdampft ist, liegt nur noch (trocken) gesättigter Dampf bzw. Sattdampf vor, d. h. $m = m''$ (Zustand 8 in Abbildung 14 und Abbildung 10). Gemäß Gleichung (22) ergibt sich für den Dampfanteil in diesem Fall $x = 1$. Das grafische Abbild aller möglichen Zustände des gesättigten Dampfes in den Zustandsdiagrammen ist die Taulinie.

Für das Zweiphasengemisch Nassdampf aus siedender Flüssigkeit und gesättigtem Dampf im Zustand 7 kann der Dampfanteil x Werte zwischen 0 und 1 ($0 < x < 1$) annehmen. Die Zustandsgrößen des Nassdampfs werden mit dem Index x gekennzeichnet. D. h. für eine beliebige spezifische Zustandsgröße z hat deren korrekte Schreibweise für Zustände des Nassdampfs die Form z_x .

Wie bereits ausgeführt, bleibt während des Verdampfens von Zustand 6 bis Zustand 8 die zum gegebenen Druck p gehörige Siedetemperatur $T_s(p)$ konstant.

Erst wenn die gesamte Flüssigkeit verdampft ist, erhöht sich bei weiterer Wärmezufuhr die Temperatur $T = T_{\text{üb}}$. Der Dampf wird überhitzt. Man spricht von *überhitzten Dampf*, *Heißdampf* oder Gas (Zustand 9 in Abbildung 14 und Abbildung 10).

Der Versuch kann durch Wärmeabfuhr umgekehrt werden (Zustandsänderung von 9 nach 5). Der überhitzte Dampf wird gekühlt, bis trocken gesättigter Dampf vorliegt, anschließend bei konstanter Siedetemperatur kondensiert, bis nur noch siedende Flüssigkeit vorliegt, und schließlich als Flüssigkeit unterkühlt.