

hoch überhitzten, also vollkommen gasförmigen Dampf anwendbar sind, gelten jedoch nicht für hochgespannten, aber nur wenig über die Sättigungstemperatur erhitzten Dampf. Die Beziehungen zwischen Volumen, Druck und Temperatur des Dampfes, dessen Zustand zwischen jenem des gesättigten und vollkommen vergastem Dampfes liegt, wurden experimentell von Hirn\*) untersucht und Formeln, welche mit größerer oder geringerer Genauigkeit auf Dampf im Zustande der Sättigung oder Überhitzung anwendbar sind, wurden von Hirn, Zeuner\*\*), Ritter\*\*\*) und anderen aufgestellt. Nach Zeuner ist für die absolute Spannung  $p$  kg/qcm, das spezifische Volumen  $v$  in cbm und die absolute Temperatur  $T$ ,

$$pv + C \cdot p^{\frac{x-1}{x}} = RT \text{ mkg.}$$

Hierin ist zu setzen  $R = 0,0050933$ ,  $C = 0,1925$ ,

$$x = 1,333 = \frac{4}{3}, \quad \frac{x-1}{x} = \frac{1}{4}.$$

Die Gleichung läßt sich auch schreiben

$$pv = R \left( T - \frac{C}{R} \cdot p^{\frac{x-1}{x}} \right)$$

und nach Einsetzung obiger Werte für die Konstanten:

$$pv = 0,0050933 (T - 37,79475 \sqrt[4]{p}) \text{ mkg.}$$

**40. Isotherme für Dampf.** Die Expansion im Zustande der Verwandlung des Wassers in Dampf unter konstantem Druck ist stets isothermisch. Nach den bisherigen Erörterungen ist es klar, daß Wasserdampf oder irgend ein anderer gesättigter Dampf nur dann isothermisch expandieren oder isothermisch komprimiert werden kann, wenn er naß ist, und daß umgekehrt Verdampfung in dem einen Falle und Kondensation im anderen Falle den isothermischen Prozeß begleiten muß. Die Isothermen einer Mischung aus Dampf und jener Flüssigkeit, aus welcher derselbe entstanden, sind daher gerade Linien gleichen Druckes.

**41. Adiabate für Dampf.** Die Adiabate für Mischungen aus einer Flüssigkeit und ihren Dämpfen hängt nicht nur von der Art der Flüssigkeit selbst, sondern auch von dem Verhältnisse der Flüssigkeit zum Dampfe der Mischung ab. Die lehrreichen Versuche von Rankine und Clausius haben bezüglich des Wasserdampfes gezeigt, daß trockener

\*) *Théorie mécanique de la Chaleur*. Part 5, Vol. II.

\*\*) *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, 1866, S. 1. *Technische Thermodynamik*, 3. Aufl., 1890, II. Band.

\*\*\*) Wiedemanns *Annalen*, 1878. Eine Diskussion verschiedener dieser Formeln enthält die Abhandlung von H. Dyer in *Trans. Inst. of Engineers and Shipbuilders in Scotland*, 1885.

Dampf durch adiabatische Expansion feucht wird und anfänglich feuchter oder nasser Dampf (wenn nicht zu naß) durch die adiabatische Expansion an Nässe zunimmt.

Enthält die Mischung eine verhältnismäßig sehr große Menge Wasser, dann tritt durch die adiabatische Expansion zunächst eine Verminderung der Nässe ein, indem infolge der Druckabnahme bei zunehmender Expansion etwas Wasser verdampft. Im nächsten Kapitel wird eine graphische Methode beschrieben, zur Untersuchung der Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes durch adiabatische Expansion; dieselbe kann aber auch dann angewendet werden, wenn es sich darum handelt zu untersuchen, ob in einem gegebenen Falle die Mischung durch die Zustandsänderung trockener oder nasser wird.

Um Dampf, wenn derselbe arbeitverrichtend expandiert, trocken zu erhalten, muß demselben Wärme während der Expansion zugeführt werden. Erfolgt die Expansion adiabatisch, also ohne Wärmeaufnahme seitens der expandierenden Flüssigkeit, dann kondensiert ein Teil des Dampfes und es bilden sich entweder in der ganzen Masse des Dampfes verteilte kleine Wasserpartikel oder tauartige Niederschläge an den Wandungen des Gefäßes, in welchem der Prozeß verläuft. Temperatur und Druck nehmen ab und nachdem jener Teil des Dampfes, welcher sich nicht kondensierte, gesättigt ist, finden während der Expansion die für gesättigten Dampf aufgestellten Beziehungen zwischen Spannung und Temperatur Anwendung.

Nachstehende Formel, für welche der Nachweis in § 56 erbracht wird, dient zur Berechnung des Ausmaßes der Kondensation während adiabatischer Expansion und ermöglicht die Bestimmung der Beziehung zwischen Druck und Volumen.

Vor Beginn der Expansion sei die Trockenheit des Dampfes, unter Benützung der § 38 eingeführten Bezeichnung,  $q_1$  und dessen absolute Temperatur  $T_1$ . Wenn infolge adiabatischer Expansion die Temperatur auf irgend einen Wert  $T$  gefallen ist, beträgt die Trockenheit des expandierten Dampfes

$$q = \frac{T}{L} \left( q_1 \frac{L_1}{T_1} + \log_e \frac{T_1}{T} \right); \quad (10)$$

$L_1$  und  $L$  ist die latente Wärme (in Wärmeeinheiten) von 1 kg Dampf vor und nach der Expansion. Wenn der Dampf vor Beginn der Expansion trocken ist, dann ist für  $q_1$  zu setzen  $q_1 = 1$ .

Diese Formel, welche unter Einführung geeigneter Werte von  $L$  für jeden beliebigen Dampf anwendbar ist, sei die Gleichung der adiabatischen Expansion oder Kompression genannt. Dieselbe giebt nicht direkt die Beziehung zwischen Druck und Volumen, aber man kann mit Benützung dieser Gleichung den Trockenheitsgrad des Dampfes in jedem beliebigen

Stadium des Prozesses berechnen und daraus das Volumen bestimmen, welches die Mischung einnimmt, wenn sich der Druck bis zu einem beliebigen Maße verändert hat.

Durch ein Beispiel wird dies sofort klar. Nehmen wir an, anfänglich trockener Dampf von der absoluten Spannung = 8,10 kg/qcm soll adiabatisch expandieren. Nach Tabelle I ist das Volumen von 1 kg dieses Dampfes 0,240 cbm und dessen Temperatur 170° C. Es soll die Beziehung zwischen Druck und Volumen für irgend ein Zwischenstadium der Expansion bestimmt werden, nehmen wir an für den Druck von 1,46 kg/qcm; die korrespondierende Temperatur ist 110° C; daraus ergeben sich die für die adiabatische Gleichung (10) erforderlichen Werte

$$\begin{aligned} q_1 &= 1; T_1 = 170 + 273 = 443 \\ T &= 110 + 273 = 383 \\ L_1 &= H_1 - h_1 = 658,30 - 171,485 = 486,815 \\ L &= H - h = 640,06 - 110,385 = 529,675. \end{aligned}$$

Daraus

$$\begin{aligned} q &= \frac{383}{529,675} \left( \frac{1 \times 486,815}{443} + \log_e \frac{443}{383} \right). \\ q &= 0,900. \end{aligned}$$

Dies sagt, daß während die Spannung von 8,1 kg/qcm auf 1,46 kg/qcm abgenommen hat,  $\frac{1}{10}$  des ursprünglich trockenen Dampfes kondensierte. Das Volumen des nicht kondensierten Dampfes beträgt  $qv$  pro kg der Mischung, wenn  $v$  das Volumen von 1 kg trockenen Dampfes von der Spannung 1,46 kg/qcm bezeichnet. Nach Tabelle I ist  $v = 1,19$  cbm, somit

$$qv = 0,90 \times 1,19 = 1,071 \text{ cbm.}$$

Um das gesamte Volumen von 1 kg der Arbeitssubstanz zu erhalten, müßte man zu dem so gefundenen Volumen  $qv$  noch das Volumen des Kondensates addieren; nachdem  $1 - q = 0,1$  kg Wasser ein Volumen von 0,0001 cbm besitzt, kann von dem ja ganz belanglosen Einflusse dieses Volumens auf das Volumen von 1,071 cbm abgesehen werden. Wir schließen daraus, daß 1,071 cbm das Volumen von 1 kg der Mischung sei, wenn infolge adiabatischer Expansion der Druck von 8,1 kg/qcm auf 1,46 kg/qcm abgenommen hat; diese Zahl bestimmt daher einen Punkt der adiabatischen Linie, welche mit trockenem Dampf von der Spannung = 8,1 kg/qcm beginnt.

In gleicher Weise können beliebig viele Punkte der adiabatischen Linie gefunden werden, indem man eine Anzahl von Pressungen, sämtliche jedoch kleiner als die Anfangsspannung annimmt, zu jedem Werte von  $p$  in bekannter Weise  $q$  bestimmt und daraus  $v$  berechnet, wozu man in den gewöhnlichen Fällen solcher Bestimmungen die praktische Gleichung benützen kann:  $v = qV$ , wenn  $v$  das Volumen von 1 kg der Mischung,

$V$  hingegen das Volumen bezeichnet, welches 1 kg gesättigten Dampfes derselben Temperatur und Spannung einnehmen würde.

Hat man es mit nassem Dampf zu tun, so daß  $q_1$  wesentlich kleiner ist als die Einheit, dann ergibt die Rechnung für irgend ein Beispiel, daß  $q$  größer ausfallen kann als  $q_1$ ; das heißt mit anderen Worten: Durch die adiabatische Expansion sehr nassen Dampfes kann der Wassergehalt desselben als Folge zweier gegensätzlicher Vorgänge vermindert werden, denn in dem Maße als die Temperatur während der Expansion abnimmt, kondensiert ein Teil des zu Beginn vorhandenen Dampfes; andererseits verdampft ein Teil des zu Beginn des Prozesses vorhandenen Wassers, weil dessen anfängliche Temperatur höher ist als die Temperatur, welche die Mischung während des Verlaufes der Expansion annimmt. Bei sehr nassem Dampfe kann daraus als Endergebnis, wie eingangs erwähnt, eine Verminderung des Wassergehaltes resultieren. Als extremer Fall kann jener angesehen werden, wenn zu Beginn des Prozesses die Arbeitssubstanz nur aus Wasser besteht. Unter Voraussetzung adiabatischer Expansion bildet sich Dampf und unter Benützung der vorhergehenden Gleichung kann,  $q_1 = 0$  gesetzt, sodann berechnet werden, wieviel Wasser verdampft wurde, wenn der Druck oder die Temperatur auf irgend einen angenommenen Wert gefallen ist.

**42. Formel für die Beziehung zwischen Druck und Spannung adiabatischer Expansion des Dampfes.** Adiabatische Kurven für Dampf, ob anfänglich trocken oder naß, können in der eben erörterten Weise berechnet und sodann durch eine empirische Gleichung von der Form

$$pv^n = \text{const.}$$

dargestellt werden, wobei der Index  $n$  so zu wählen ist, daß die auf diese Weise erhaltenen Kurven wirklichen Adiabaten möglichst nahe kommen. Eine derartige Formel ist für jene Fälle besonders geeignet, wenn die Anfangsspannung und das Expansionsverhältnis  $r$  gegeben sind und die Endspannung der Expansion ermittelt werden soll. Wenn die Arbeitssubstanz auf das  $r$ fache des Anfangsvolumen expandiert, dann ist die Endspannung  $p$  bei gegebener Anfangsspannung  $p_1$

$$p = \frac{p_1}{r^n}. \quad (11)$$

Der Wert des Index  $n$  ist abhängig von  $q_1$ , dem anfänglichen Grade der Trockenheit des Dampfes. Zeuner\*) giebt für die Bestimmung von  $n$  die empirische Formel

$$n = 1,035 + 0,1q_1,$$

\*) Grundzüge der mechan. Wärmetheorie, S. 342. Technische Thermodynamik, 3. Aufl., Vol. II, 1890, S. 75. Siehe auch Grashof, Resultate aus der mechan. Wärmetheorie, § 37.