

DAS LESA-MISCHDAMPF-KRAFTWERK  
**WIRKUNGSGRADBERECHNUNG**

Eine Widerlegung des Zweiten Hauptsatzes  
der Thermodynamik

Berechnung eines Rankine-Kreisprozesses  
mit dem Gemisch Wasser und Benzol

Herausgeber der Broschüre sind Bernhard Schaeffer und Gelia Lerche im Rahmen der LESA Maschinen GmbH. Die Gesellschaft behält sich alle Urheberrechte an der Broschüre und alle möglichen Rechte am Inhalt vor.  
Berlin, Oktober 2005

**LESA MASCHINEN GmbH**

Geschäftsführung Gelia Lerche

Zitadellenweg 34 13599 Berlin Germany

Tel.: +49 30 8058673-0 Fax: +49 30 8058673-11

HRB 93555 Amtsgericht Charlottenburg

E-Mail: [info@lesa-maschinen.de](mailto:info@lesa-maschinen.de)

[www.lesa-maschinen.de](http://www.lesa-maschinen.de)

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	Zusammenfassung	4
<b>2</b>	Einleitung	4
<b>3</b>	Gibbsches Phasengesetz	4
<b>4</b>	Der azeotrope Punkt	5
<b>5</b>	Die adiabate Entspannung von Einzelstoffen	6
<b>6</b>	Die adiabate Entspannung des Stoffgemisches Wasser/Benzol	6
<b>7</b>	Der Rankine Kreisprozess	7
<b>8</b>	Die Clapeyronsche Gleichung	7
<b>9</b>	Wirkungsgradberechnung	8
<b>10</b>	Geschichtliches	8
<b>11</b>	LESA-Mischdampf-Motor	9
<b>12</b>	Schlussbetrachtung	9
<b>13</b>	Anhang	10
	Anhang A	10
	Anhang B	15
	Anhang C	18
<b>14</b>	Literaturverzeichnis	19

# WIRKUNGSGRADBERECHNUNG EINES RANKINE-KREISPROZESSES MIT DEM GEMISCH WASSER UND BENZOL

## 1 ZUSAMMENFASSUNG:

Es wird der Wirkungsgrad für einen Rankine-Kreisprozess berechnet, der mit einem Gemisch aus Wasser- und Benzoldampf als Arbeitsmittel geführt wird. Diese Berechnung zeigt, dass der Wirkungsgrad in solch einem Fall deutlich über dem Carnot-Wirkungsgrad liegt. Damit wird nachgewiesen, dass durch die Veränderung von Stoffeigenschaften des Arbeitsmittels in einem Kreisprozess, der 2. Hauptsatz der Thermodynamik überwunden werden kann.

## 2 EINLEITUNG

Für diese Beweisführung werden ausschließlich bekannte Gleichungen, Rechenverfahren und Tabellenwerte verwendet, die heute in der Thermodynamik üblich sind. Als bekannte experimentelle Tatsache wird vorausgesetzt, dass sich Wasser und Benzol in der Flüssigphase entmischen und zwei Flüssigkeitsspiegel bilden.

Die hier durchgeführte Beispielrechnung geht von einer Kesseltemperatur von 450 K und einer Kondensortemperatur von 350 K aus. Mit beliebig anderen Temperaturen unterhalb der kritischen Temperatur von Benzol (562,6 K) lassen sich ähnliche Ergebnisse erzielen.

### 3 DAS GIBBSISCHE PHASENGESETZ

Eingangs wird auf das System Wasser/Benzol das Gibbsche Phasengesetz angewendet.

$$k + 2 = n + \sigma \quad (1)$$

$k$  – Zahl der Komponenten

$n$  – Zahl der Phasen

$\sigma$  – Zahl der Freiheitsgrade

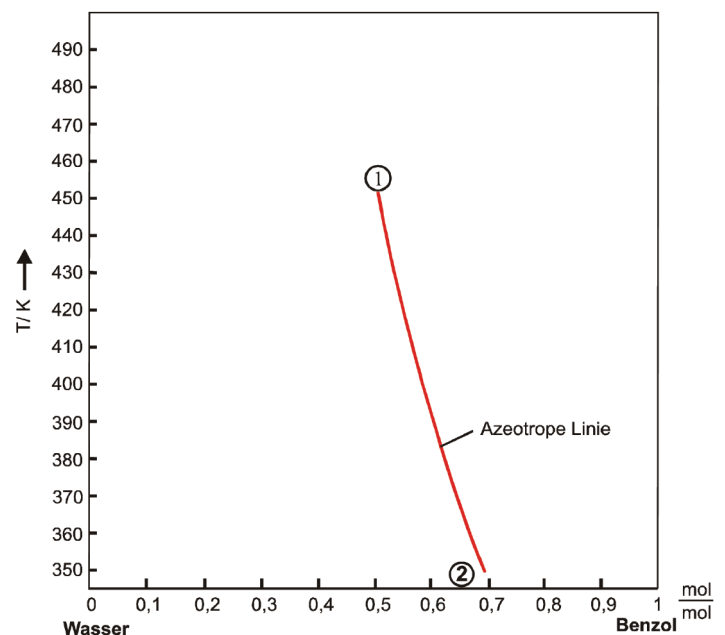
2 Komponenten + 2 = 3 Phasen + 1 Freiheitsgrad

Wird ein Gemisch aus Wasser und Benzol verdampft, so liegen 3 Phasen vor. Zwei flüssige Phasen – Wasser, Benzol und eine dampfförmige Phase – Mischdampf. Es bleibt nur ein Freiheitsgrad, der durch die Temperatur, die das System hat, festgelegt ist. Daraus folgt, dass auch der Druck und die Konzentration des Mischdampfes festliegen. Jeder Temperatur folgt der Mischdampf demzufolge mit einem speziellen Druck und einer speziellen Konzentration. Verändert sich die Temperatur so muss ein Teil einer Komponente als Nebel ausfallen, oder die jeweils andere Komponente zusätzlich verdampfen, bis sich die richtige Konzentration einstellt.

### 4 DER AZEOTROPE PUNKT

Das Trippel aus Temperatur, Druck und Konzentration wird auch als azeotroper Punkt bezeichnet. Trägt man in einem T-x-Diagramm (Bild 1) die Summe aller azeotropen Punkte auf, so entsteht eine azeotrope Linie.

Zu jedem azeotropen Punkt gehören 3 Phasen, darum wird die Verbindungslinie aller azeotroper Punkte auch Dreiphasenlinie genannt. Die Dreiphasenlinie für das Gemisch Wasser und Benzol, neigt sich im T-x-Diagramm mit steigender Temperatur, schräg zur Wasserseite. Das bedeutet mit steigender Temperatur, steigt auch der Wasseranteil im Mischdampf, bzw. verringert sich bei sinkender Temperatur.



[Bild 1]

## 5 DIE ADIABATE ENTSPANNUNG VON EINZELSTOFFEN

Wird der Dampf eines Einzelstoffes adiabatisch im Nassdampfgebiet entspannt, verläuft dies exakt entlang der Dampfdruckkurve. Die Volumensvergrößerung wird durch die Kolbenbewegung vorgegeben, Druck und Temperatur folgen fest verknüpft über die Dampfdruckkurve. Dabei ist stets die Bedingung  $dS = 0$  erfüllt, das heißt die Entropie ändert sich nicht. Bei Einzelstoffen wurde nie etwas anderes beobachtet.

## 6 DIE ADIABATE ENTSPANNUNG DES STOFFGEMISCHES WASSER/BENZOL

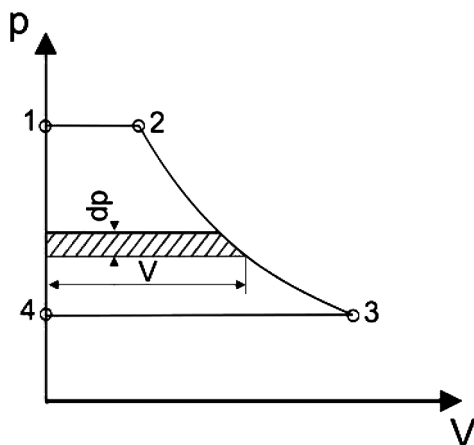
Auch die adiabatische Entspannung eines Zweistoffmischdampfes verläuft entlang der Dampfdruckkurve. Diese ist aber zugleich die azeotrope Linie, bei der als zusätzlicher Parameter die Konzentration auftritt. Dabei folgt der Volumensvergrößerung durch die Kolbenbewegung nicht nur Druck und Temperatur, sondern auch die Dampfzusammensetzung. Damit die Dampfkonzentration der azeotropen Linie folgen kann, muss bei sinkender Temperatur erheblich Wasser als Nebel aus dem Mischdampf ausfallen.

Das ist eine Zwangsbedingung, der der Mischdampf folgen muss. Es stellt sich damit die Frage, ob die zweite Zwangsbedingung, nämlich die Konstanz der Entropie erfüllt werden kann? Das in dieser Arbeit vorgelegte Endergebnis ist nur plausibel, wenn hier eine Entropieabnahme angenommen wird. Versteht man die Entropie nach Boltzmann als Ordnungsmaß eines Systems, so wird durch den Verlauf der azeotropen Linie dem Mischdampf eine ganz strenge Ordnungsbedingung auferlegt. Das bedeutet, der Grad der Ordnung nimmt zu und die Entropie nimmt ab.

Diese Ordnungsbedingung gibt es bei Einzelstoffen nicht, da hier die Konzentration als Parameter nicht auftritt. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass sich mit Zweistoffgemischen als Arbeitsmittel Möglichkeiten eröffnen, die es bei Einzelstoffen nicht geben kann.

## 7 DER RANKINE KREISPROZESS

Die Verdampfung des Stoffgemisches Wasser/Benzol verläuft, durch die feste Verknüpfung von Druck und Temperatur, wie bei Einzelstoffen isotherm-isobar. Der Rankine Kreisprozess ohne Überhitzung stellt sich also für unser System genau so dar wie für alle Einzelstoffe.



[Bild 2]

## 8 DIE CLAPEYRONSCHE GLEICHUNG

Zur Bestimmung der Verdampfungs- bzw. Kondensationswärme lässt sich wegen des isotherm-isobaren Verlaufs die Clapeyronsche Gleichung anwenden.

$$r = \frac{dp}{dT} \cdot (v'' - v') \cdot T \quad (2)$$

$r$  – Verdampfungswärme

$\frac{dp}{dT}$  – Anstieg der Dampfdruckkurve

$v''$  – Dampfvolumen

$v'$  – Flüssigkeitsvolumen

$T$  – Temperatur

Setzt man die Enthalpie am Punkt (4) Bild 2 willkürlich gleich 0 so ergeben sich folgende Werte für die Verdampfungswärme:

von (1) nach (2)  $r_{450K} = 614,5 \frac{kJ}{kg}$  si. Anhang A

von (3) nach (4)  $r_{350K} = 527,9 \frac{kJ}{kg}$  si. Anhang B

bei (1) Flüssigkeitsvorwärmung =  $247,4 \frac{kJ}{kg}$  si. Anh.C

## 9 WIRKUNGSGRADBERECHNUNG

Mit  $h_4 = 0$  gilt:

$$Q_{zu} = h_2 = r_{450} + \text{Flüss.vorw.} = 614,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 247,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 861,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Unter Vernachlässigung des Flüssigkeitsvolumens (der Pumpleistung der Speisewasserpumpe) gilt:

$$\text{Arbeitsleistung} = \int v dp = h_2 - h_3 \quad (3)$$

Damit berechnet sich der Wirkungsgrad des Rankine Prozesses, mit dem Gemisch Wasser und Benzol als Arbeitsmittel, wie folgt:

$$\eta = \frac{\int v dp}{Q_{zu}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2} = \frac{862 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 528 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{862 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \frac{334}{862} = 38,7\%$$

Dem steht der Wirkungsgrad nach Carnot gegenüber:

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{450\text{K} - 350\text{K}}{450\text{K}} = 22,2\% \quad (4)$$

Würde man hierbei noch berücksichtigen, dass die Flüssigkeitsvorwärmung nicht isotherm verläuft, müsste der Carnot-Wert sogar noch nach unten korrigiert werden.

Mit diesem Ergebnis wird gezeigt, dass der Carnot-Wirkungsgrad mit Kreisprozessen in denen Mischdämpfe als Arbeitsmittel verwendet werden, zu überbieten ist.

## 10 GESCHICHTLICHES

Dieses Phänomen wurde erstmals 1931 von dem ungarischen Ingenieur Arnold Iriny beschrieben. Er führte in Hamburg mehrerer Versuche durch, bei denen er herkömmliche Dampfmaschinen mit einem Mischdampf betrieb. In allen Fällen konnte er bedeutend höhere Wirkungsgrade erzielen, als im reinen Wasserdampfbetrieb. Mehrere unabhängige Ingenieure bestätigten seine Ergebnisse. Die Technik setzte sich aber nicht durch und ist heute weitgehend unbekannt.

*Marinebaurat Rudolph Meyer berichtet über seine Messungen wie folgt:[1]*

*... Diese Tatsache ist nun einmal da!*

*Es ist mir vollkommen klar, daß sie für einen jeden von uns in hohem Maße überraschend wirkt und dem kritischen Techniker und nüchternen Wirtschaftler infolge der bisherigen Auffassung über das maximal Erreichbare als kaum glaublich erscheinen muß.*

*Mir und allen an den Versuchen und ihrer Auswertung beteiligten Herren ist es ebenso ergangen, denn auch andere haben mit gleichem Ergebnis Versuche durchgeführt. ...*

*... Das Resultat ist, abgesehen von kleinen unbedeutenden Verschiebungen einzelner Werte, auf der ganzen Linie stets das gleiche geblieben, so daß der praktische Erfolg des Irinyi-Verfahrens für mich nunmehr eine bewiesene Tatsache ist – und ich kann behaupten, auch für die Herren, die diese Versuche beliebig wiederholen – und eine nunmehr der Wissenschaft festgesicherte neue Erfahrungstatsache sein muß ...*



## 11 DER LESA-MISCHDAMPF-MOTOR

Für die Entwicklung des LESA-Mischdampf-Motors wird nicht der hier beschriebene Rankine Kreisprozess verwendet. Er wurde nur wegen seiner einfachen Darstellungsmöglichkeit für diese Erläuterung ausgewählt.

Mit dem LESA-Mischdampf-Motor werden im hier beschriebenen Temperaturbereich Wirkungsgrade von 60-65 % erzielt. Dazu wird das Dualverfahren benutzt, welches von Dr. Rudolph Doczekal entwickelt wurde. Das Dualverfahren baut auf dem Irinyischen Kreisprozess auf, geht aber entscheidend darüber hinaus. Es ist wesentlich komplexer und erfordert vom Leser bedeutend umfangreichere thermodynamische Kenntnisse.

Ein Funktionsmodell des zukünftigen LESA-Mischdampf-Motors, mit einer Leistung von ca. 200W, zeigt ganz deutlich den wirkungsgradsteigernden Effekt bei der Zugabe von Benzol in den Wasserdampf.

## 12 SCHLUSSBETRACHTUNG

Die wichtigste Aussage des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik ist die, dass es unmöglich sei, ein Perpetuum Mobile der 2. Art zu bauen. Damit wird indirekt gesagt, dass uns die Natur niemals Stoffe mit Eigenschaften zur Verfügung stellt, mit denen eine solche Maschine verwirklicht werden kann. Der 2. Hauptsatz ist demzufolge eine Materialtheorie, die erlaubte bzw. nicht erlaubte Stoffeigenschaften beschreibt.

Bisher ist diese Materialtheorie durch die vielfältigen Kenntnisse von Stoffeigenschaften immer wieder bestätigt worden. Der 2. Hauptsatz kann deshalb auch nur mit konkreten Stoffeigenschaften widerlegt werden. Das ist hier geschehen.

Es ist in der Tat irritierend und erschreckend, einzugestehen, dass hier ein fest verankertes Gesetz der Physik ins Wanken gerät. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik galt in der Vergangenheit als das best gesicherte Naturgesetz, und es gelingt nur schwer, sich dem Gedanken zuzuwenden, dass dieses Gesetz überwindbar ist.

Wenn wir uns dieser unangenehmen Tatsache aber stellen und wir den Mut aufbringen, uns der gesamten Tragweite dieses Ereignisses zuzuwenden, werden wir erkennen, dass sich mit dem Verlust des zweiten Hauptsatzes ein unermesslicher Reichtum eröffnet. Lassen Sie uns diese große Aufgabe gemeinsam beginnen, um unseren Kindern eine lebenswerte Welt zu hinterlassen.

## 13 ANHANG

### ANHANG A: BERECHNUNG DER VERDAMPFUNGSWÄRME DES MISCHDAMPFES BEI 450 K

Wie oben ausgeführt verläuft die Verdampfung isobar-isotherm. Deshalb kann zur Berechnung der Verdampfungswärme die Clapeyronsche Gleichung verwendet werden.

$$r_{450} = \left( \frac{dp}{dT} \right) \cdot (v'' - v') \cdot 450K \quad (5)$$

### A.1 BESTIMMUNG DES ANSTIEGS DER DAMPF- DRUCKKURVE BEI 450 K

Zur Bestimmung von  $\frac{dp}{dT}$  muss eingangs der Dampfdruck bestimmt werden. Hierfür gilt in diesem speziellen Fall, das Daltonsche Gesetz, nach dem sich die Partialdrücke zum Gesamtdruck addieren.

$$P_{ges} = P_{Wasser} + P_{Benzol} \quad (6)$$

Da hier nicht ohne weiteres vorausgesetzt werden kann, dass sich die Dampfphase bei einem Druck von ca. 19 bar noch ideal verhält, haben wir den Verlauf der Dampfdruckkurve experimentell überprüft [2] und die obige Gleichung mit einer Abweichung < als 2 % bestätigt gefunden. Siehe hierzu auch [3] Lüdecke und Lüdecke Seite 654.

Aus Gleichung (6) folgt:

$$\left( \frac{dp}{dT} \right)_{ges} = \left( \frac{dp}{dT} \right)_{Wasser} + \left( \frac{dp}{dT} \right)_{Benzol} \quad (7)$$

Damit muss der Anstieg der einzelnen Dampfdruckkurven von Wasser und Benzol bei 450 K bestimmt werden. Dafür kann Gl. (5) umgestellt werden.

$$\left( \frac{dp}{dT} \right)_{Wasser} = \frac{r_{Wasser}}{(v'' - v') \cdot 450K} \quad (8)$$

Mit den Tabellenwerten für Wasser bei 450 K

$$\text{Verdampfungswärme: } r = 2026 \frac{kJ}{kg}$$

$$\text{Dampfvolumen: } v'' = 0,2078 \frac{m^3}{kg}$$

$$\text{Flüssigkeitsvolumen: } v' = 0,0011 \frac{m^3}{kg}$$

ergibt sich nach Gl. (8):

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{Wasser} = \frac{2026 \frac{kJ}{kg}}{(0,2078 - 0,0011) \frac{m^3}{kg} \cdot 450K} = 21,7814 \frac{kPa}{K}$$

Mit den Tabellenwerten für Benzol bei 450 K:

$$\text{Verdampfungswärme: } r = 320,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$\text{Dampfvolumen: } v'' = 0,04247 \frac{m^3}{kg}$$

$$\text{Flüssigkeitsvolumen: } v' = 0,00143 \frac{m^3}{kg}$$

ergibt sich nach Gl. (8)

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{Benzol} = \frac{320,4 \frac{kJ}{kg}}{(0,04247 - 0,00143) \frac{m^3}{kg} \cdot 450K} = 17,3489 \frac{kPa}{K}$$

Diese beiden Ergebnisse eingesetzt in Gl. (7) ergeben das Zwischenergebnis A1

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{ges} = 21,7814 + 17,3489 = 39,13 \frac{kPa}{K}$$

**ZWISCHENERGEBNIS A.1:**  $\left(\frac{dp}{dT}\right)_{ges} = 39,13 \frac{kPa}{K}$

## A.2 BESTIMMUNG DES DAMPFVOLUMENS BEI 450 K

Zur Bestimmung des Dampfvolumens  $v''$  bei 450 K muss vorab die Dampfzusammensetzung bestimmt werden. Aus dem Avogadro'schen Gesetz leitet sich für den Molenbruch  $x$  die folgende Gleichung ab.

$$x_{Wasser} = \frac{P_{Wasser}}{P_{ges}} \quad (9)$$

$$x_{Benzol} = \frac{P_{Benzol}}{P_{ges}} \quad (9a)$$

Die Tabellenwerte für die Dampfdrücke bei 450 K

$$\text{Wasser } p = 9,315 \text{ bar}$$

$$\text{Benzol } p = 9,746 \text{ bar}$$

eingesetzt in Gl. (6) ergeben den Dampfdruck des Mischdampfes.

$$p_{ges} = 9,315 + 9,746 = 19,061 \text{ bar}$$

Mit Gl. (9) und (9a) ergeben sich die Molenbrüche der Einzelkomponenten.

$$x_{Wasser} = \frac{9,315 \text{ bar}}{19,061 \text{ bar}} = 0,4887 \frac{mol}{mol}$$

$$x_{Benzol} = \frac{9,746 \text{ bar}}{19,061 \text{ bar}} = 0,5113 \frac{mol}{mol}$$

Diese Molenbrüche ( $x$ ) müssen nach Gl. 10 in die Massenbrüche ( $w$ ) umgerechnet werden, damit sie mit den anderen Kilogrammwerten vergleichbar sind. Mit den Molekulargewichten:

$$\text{Wasser} = 18 \frac{g}{mol}$$

$$\text{Benzol} = 78 \frac{g}{mol}$$

ergibt sich für die Umrechnung:

$$w_{\text{Wasser}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{78}{18} \left( \frac{1}{x_{\text{Wasser}}} - 1 \right)} + 1}} \quad (10)$$

$$x_{\text{Wasser}} = 0,4887 \frac{\text{mol}}{\text{mol}} \quad w_{\text{Wasser}} = 0,1807 \frac{\text{kgWasser}}{\text{kgDampf}}$$

$$w_{\text{Wasser}} + w_{\text{Benzol}} = 1 \quad w_{\text{Benzol}} = 0,8193 \frac{\text{kgBenzol}}{\text{kgDampf}}$$

Damit besteht ein Kilogramm Dampf aus 0,181 kg Wasserdampf und 0,819 kg Benzoldampf.

Die experimentelle Überprüfung der Dampfzusammensetzung hat eine befriedigende Übereinstimmung mit diesen Rechenergebnissen gezeigt. [2]

Hiermit kann das Volumen für ein Kilogramm Mischdampf bestimmt werden.

Die Tabellenwerte für die Dampfvolumen:

$$v''_{\text{Wasser}} = 0,2078 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v''_{\text{Benzol}} = 0,04247 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

sind mit dem jeweiligen Massenanteil im Dampf zu multiplizieren.

Dampfvolumen des Wassers:

$$0,2078 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 0,181 \frac{\text{kg}}{\text{kgDampf}} = 0,0378 \frac{\text{m}^3}{\text{kgDampf}}$$

Dampfvolumen des Benzols:

$$0,04247 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 0,819 \frac{\text{kg}}{\text{kgDampf}} = 0,0348 \frac{\text{m}^3}{\text{kgDampf}}$$

Diese beiden Werte müssten gleich sein, da sich die jeweiligen Dampfanteile im gleichen Volumen befinden. Die Abweichung zwischen diesen beiden Werten von ca. 8 % geht darauf zurück, dass hier keine idealen Gase sondern Dämpfe vorliegen. Diese Abweichung hat aber nur einen geringfügigen Einfluss auf das eigentliche Endergebnis. Für die weitere Berechnung soll der Mittelwert beider Ergebnisse verwendet werden.

$$v'' = 0,0363 \frac{\text{m}^3}{\text{kgDampf}}$$

**ZWISCHENERGEBNIS A.2:**  $v'' = 0,0363 \frac{\text{m}^3}{\text{kgDampf}}$

Dazu eine Alternative:

**BESTIMMUNG DES DAMPFVOLUMENS ÜBER DAS SPEZIFISCHE VOLUMEN DER EINZELKOMPONENTEN.**

Auf den ersten Blick erschiene es einfacher das Volumen und die Zusammensetzung des Mischdampfes aus den spezifischen Volumen der Einzelkomponenten zu berechnen. Dafür gilt nach Dalton:

$$v''_{\text{Mischdampf}} = v''_{\text{Wasser}} \cdot M_{\text{Wasser}} = v''_{\text{Benzol}} \cdot M_{\text{Benzol}} \quad (11)$$

Mit dem Tabellenwert:

$$v''_{\text{Wasser}} = 0,2078 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v''_{\text{Benzol}} = 0,04247 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

eingesetzt in Gleichung 11 ergibt:

$$\frac{M_{\text{Wasser}}}{M_{\text{Benzol}}} = \frac{v''_{\text{Benzol}}}{v''_{\text{Wasser}}} = \frac{0,04247 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{0,2078 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = \frac{W_{\text{Wasser}}}{W_{\text{Benzol}}} = 0,2044 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

und mit  $w_{Wasser} + w_{Benzol} = 1$  ergibt sich

$$w_{Wasser} = 0,1697$$

$$w_{Benzol} = 0,8303$$

Für das Dampfvolumen folgt dann aus Gleichung (11):

$$v''_{Wasser} = 0,2078 \frac{m^3}{kg} \cdot 0,1697 \frac{kg}{kgDampf} = 0,03526 \frac{m^3}{kgDampf}$$

$$v''_{Benzol} = 0,04247 \frac{m^3}{kg} \cdot 0,8303 \frac{kg}{kgDampf} = 0,03526 \frac{m^3}{kgDampf}$$

Bei diesem Rechenweg sind die beiden Volumen natürlich exakt gleich, was rein mathematisch so sein muss. Die über diesen Rechenweg aufgefundenen Werte für die Dampfzusammensetzung weichen aber stärker von unseren experimentell bestimmten Werten ab als die unter A.2 berechneten Werte.

Im Übrigen liegt der hier aufgefundene Wert für das Dampfvolumen  $0,03526 \frac{m^3}{kgDampf}$

zwischen den beiden unter A.2 berechneten Werten

$$0,0378 \frac{m^3}{kgDampf} \text{ und } 0,0348 \frac{m^3}{kgDampf} .$$

Diese Übereinstimmung zeigt die Zuverlässigkeit des erzielten Ergebnisses.

### A.3 BESTIMMUNG DES FLÜSSIGKEITSVOLUMENS V' BEI 450 K

Das Flüssigkeitsvolumen ergibt sich aus den Tabellenwerten beider Flüssigkeiten bei 450 K, multipliziert mit den Flüssigkeitsmengen aus denen der Dampf bei der Verdampfung entsteht.

$$\text{Wasser: } v' = 0,00112 \frac{m^3}{kg}$$

$$\text{Benzol: } v' = 0,00143 \frac{m^3}{kg}$$

$$v'_{Wasser} = 0,00112 \frac{m^3}{kg} \cdot 0,181 \text{ kg} = 0,0002 \text{ m}^3$$

$$v'_{Benzol} = 0,00143 \frac{m^3}{kg} \cdot 0,819 \text{ kg} = 0,0012 \text{ m}^3$$

Diese beiden Volumeneinheiten addieren sich, da sich die beiden Flüssigkeiten gegenseitig verdrängen. Damit ist

$$\text{ZWISCHENERGEBNIS A.3: } v' = 0,0014 \frac{m^3}{kgMischdampf}$$

#### A.4 BERECHNUNG DER VERDAMPFUNGSWÄRME BEI 450 K

Die Zwischenergebnisse

$$\text{Zwischenergebnis A.1: } \left(\frac{dp}{dT}\right)_{ges} = 39,13 \frac{kPa}{K}$$

$$\text{Zwischenergebnis A.2: } v'' = 0,0363 \frac{m^3}{kg \text{Mischdampf}}$$

$$\text{Zwischenergebnis A.3: } v' = 0,0014 \frac{m^3}{kg \text{Mischdampf}}$$

sind in Gl. (2) einzusetzen:

$$r_{450} = 39,13 \frac{kPa}{K} \cdot (0,0363 - 0,0014) \frac{m^3}{kg} \cdot 450K = \frac{kNm}{kg}$$

$$\text{ENDERGEBNIS A: } r_{450} = 614,5 \frac{kJ}{kg}$$

## ANHANG B: BERECHNUNG DER VERDAMPFUNGSWÄRME DES MISCHDAMPFES BEI 350 K

Hier wird das gleiche Rechenverfahren angewandt wie im Anhang A.

### B.1 BESTIMMUNG DES ANSTIEGS DER DAMPF- DRUCKKURVE BEI 350 K

Tabellenwerte für Wasser bei 350 K :

$$\text{Verdampfungswärme } r = 2316 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Dampfvolumen } v'' = 3,847 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\text{Flüssigkeitsvolumen } v' = 0,001 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

mit Gl. (8):

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{\text{Wasser}} = \frac{2316 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(3,847 - 0,001) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 350\text{K}} = 1,7205 \frac{\text{kPa}}{\text{K}}$$

Tabellenwerte für Benzol bei 350 K

$$\text{Verdampfungswärme } r = 399,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Dampfvolumen } v'' = 0,3971 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\text{Flüssigkeitsvolumen } v' = 0,0012 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

mit Gl. (8):

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{\text{Benzol}} = \frac{399,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(0,3971 - 0,0012) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 350\text{K}} = 2,8846 \frac{\text{kPa}}{\text{K}}$$

Beide Ergebnisse eingesetzt in Gl. (7)

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{ges} = 1,7205 + 2,8846 = 4,6051 \frac{\text{kPa}}{\text{K}} \text{ ergeben}$$

$$\text{ZWISCHENERGEBNIS B.1: } \left(\frac{dp}{dT}\right)_{ges} = 4,6051 \frac{\text{kPa}}{\text{K}}$$

### B.2 BESTIMMUNG DES DAMPFVOLUMENS BEI 350 K

Vorab muss die Dampfzusammensetzung bestimmt werden.

Tabellenwerte für den Dampfdruck

$$\text{Wasser } p = 0,416 \text{ bar}$$

$$\text{Benzol } p = 0,917 \text{ bar}$$

eingesetzt in Gl. (6) ergibt den Dampfdruck des Mischdampfes

$$p_{ges} = 0,416 + 0,917 = 1,333 \text{ bar}$$

daraus ergeben sich mit Gl. (9) die Molenbrüche der Einzelkomponenten

$$x_{\text{Wasser}} = \frac{0,416 \text{ bar}}{1,333 \text{ bar}} = 0,312 \frac{\text{mol}}{\text{mol}}$$

$$x_{\text{Benzol}} = \frac{0,917 \text{ bar}}{1,333 \text{ bar}} = 0,688 \frac{\text{mol}}{\text{mol}}$$

Umgerechnet nach Gl. (10)

$$x_{\text{Wasser}} = 0,312 \frac{\text{mol}}{\text{mol}} \quad w_{\text{Wasser}} = 0,0947 \frac{\text{kgWasser}}{\text{kgDampf}}$$

$$w_{\text{Wasser}} + w_{\text{Benzol}} = 1 \quad w_{\text{Benzol}} = 0,9053 \frac{\text{kgBenzol}}{\text{kgDampf}}$$

Beim Durchlaufen der Adiabate von (2) nach (3) (Bild 2) kann keine Stoffmenge verloren gehen. Das heißt die Benzolmenge mit 0,819 kg im Dampf bleibt erhalten. Auch die Wassermenge bleibt gleich, diese teilt sich aber nun auf in Wasserdampf und ausgeschiedenem Wasser (als Nebel). Es muss soviel Wasser ausfallen, das sich die soeben berechnete Konzentration im Dampf einstellt. Damit ergeben sich folgende Gleichungen für den Zustand am Ende der Adiabate.

$$Wasserdampf + Wassernebel = 0,181 \text{ kg (Ausgangsmenge)}$$

$$Benzoldampf = 0,819 \text{ kg (Ausgangsmenge)}$$

Die nun vorhandene Wasserdampfmenge ergibt sich aus dem Verhältnis der beiden

Massenbrüche:

$$\frac{w_{Wasser}}{w_{Benzol}} = \frac{M_{Wasser}[kg] \cdot (M_{Wasser}[kg] + M_{Benzol}[kg])}{(M_{Wasser}[kg] + M_{Benzol}[kg]) \cdot M_{Benzol}[kg]}$$

$$= \frac{M_{Wasser}[kg]}{M_{Benzol}[kg]}$$

$$M_{Wasserdampf}[kg] = \frac{w_{Wasser}}{w_{Benzol}} \cdot M_{Benzoldampf}[kg] \quad (12)$$

$$M_{Wasserdampf}[kg] = \frac{0,0947 \text{ kg}}{0,9053 \text{ kg}} \cdot 0,819 \text{ kg} = 0,0857 \text{ kg}$$

Damit teilt sich die im Kreisprozess vorhandene Wassermenge von 0,181 kg in 0,0857 kg noch vorhandenen Dampf und 0,0953 kg ausgeschiedenes Wasser. Das ist über die Hälfte der anfänglich vorhandenen Wassermenge im Mischdampf. Dieser enorme Wasseranteil gibt seine Kondensationswärme an den Benzoldampf ab, und

dieser wiederum gibt diese Energie vollständig an den Kolben als mechanische Arbeit ab. Dieser innere Wärmeaustausch ist der entscheidende Mechanismus der zu dem erstaunlichen Endergebnis führt.

Damit besteht ein Kilogramm Mischdampf bei 350 K (Punkt 3 Bild 2) aus:

Wasserdampf:	0,0857 kg
flüssigem Wasser:	0,0953 kg
Benzoldampf:	0,8190 kg

Für die Berechnung des Dampfvolumens bei 350 K benötigen wir folgende Tabellenwerte:

$$v''_{Wasser} = 3,847 \frac{m^3}{kg}$$

$$v''_{Benzol} = 0,3971 \frac{m^3}{kg}$$

Diese sind zu multiplizieren mit dem jeweiligen Massenanteil, aus dem der Dampf besteht:

Volumen des Wasserdampfes:

$$3,847 \frac{m^3}{kg} \cdot 0,0857 \text{ kg} = 0,3297 \text{ m}^3$$

Volumen des Benzoldampfes:

$$0,3971 \frac{m^3}{kg} \cdot 0,819 \text{ kg} = 0,3252 \text{ m}^3$$

Auch diese beiden Werte müssten gleich sein, weichen aber um ca. 1,4 % von einander ab. Bei niedrigerem Druck weichen die Dämpfe wie zu erwarten weniger vom idealen Gase ab, als bei 450 K. Auch hier wird für die weitere Berechnung der Mittelwert beider Ergebnisse verwendet.

**ZWISCHENERGEBNIS B.2:**  $v'' = 0,3275 \text{ m}^3$



### B.3 VERNACHLÄSSIGUNG DES FLÜSSIGKEITS-VOLUMENS BEI 350 K

Angesichts des großen Dampfvolumens kann hier das Flüssigkeitsvolumen  $v'$  vernachlässigt werden.

### B.4 BERECHNUNG DER KONDENSATIONSWÄRME VON PUNKT 3 ZU PUNKT 4 (BILD 2) BEI 350 K

Zur Berechnung der Kondensationswärme können die erzielten Zwischenergebnisse in Gl. (2) eingesetzt werden.

$$\text{Zwischenergebnis B.1: } \frac{dp}{dT} = 4,6051 \frac{kPa}{K}$$

$$\text{Zwischenergebnis B.2: } v'' = 0,3275 \frac{m^3}{kg \text{ Mischdampf}}$$

Bei der unter B.2 auf Seite 16 bilanzierten Zusammensetzung des Mischdampfes am Punkt 3 wurde der bereits kondensierte Wasseranteil berechnet. Dieser Wasseranteil hat schon den Punkt 4 erreicht (gleicher Druck, gleiche Temperatur). Er trägt also nicht zur Kondensationswärme bei. Die Dimensionierung  $m^3/kg$  Mischdampf bezieht sich hier auf die im Prozess umlaufende Gesamtmenge.

$$r_{350} = 4,6051 \frac{kPa}{K} \cdot 0,3275 m^3 \cdot 350K$$

$$\text{ENDERGEBNIS B: } r_{350} = 527,9 \frac{kJ}{kg}$$

### ANHANG C: BERECHNUNG DER FLÜSSIGKEITSVORWÄRMUNG VON 350 K AUF 450 K

Die Werte für die Flüssigkeitsvorwärmung können einzeln für Wasser und Benzol berechnet und addiert werden, da sich die beiden Flüssigkeiten trennen. Die spezifische Erwärmung der Flüssigkeiten ergibt sich aus der jeweiligen Enthalpiedifferenz zwischen 450 K und 350 K.

Tabellenwerte für: Wasser:

$$h'_{450} = 749,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h'_{350} = 321,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h'_{450} - h'_{350} = 427,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tabellenwerte für: Benzol:

$$h'_{450} = 47,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h'_{350} = -160,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h'_{450} - h'_{350} = 207,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Diese Werte sind mit den Flüssigkeitsmengen zu multiplizieren, aus denen ein Kilogramm Dampf entsteht. In Anhang A wurden diese Mengen berechnet zu:

*Wasser:* 0,181 kg

*Benzol:* 0,819 kg

Damit ergibt sich für die Erwärmung

$$\text{Wasser: } 427,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,181 \text{ kg} = 77,4 \text{ kJ}$$

$$\text{Benzol: } 207,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,819 \text{ kg} = 170 \text{ kJ}$$

Beide Werte addiert ergibt die:

$$\text{Flüssigkeitsvorwärmung} = 77,4 + 170 = 247,4 \text{ kJ}$$

**ENDERGEBNIS C:** *Flüssigkeitsvorwärmung* = 247,4 kJ

## 14 LITERATURVERZEICHNIS

[1] Mischdampf Krafterzeugung, Denkschrift von Arnold Irinyi an die Akademie der Wissenschaften in Berlin, 2. unveränderte Auflage 1931, Herausgeber Deutsches Institut für Energieforschung Hamburg 37.

[2] Untersuchung des Stoffgemisches Benzol/Wasser im Hinblick auf die Verwendung für einen Kreisprozess, LESA Forschung GbR, 2003.

[3] Thermodynamik, Physikalisch-chemische Grundlagen der thermischen Verfahrenstechnik, Lüdecke Lüdecke, Springer 2000, ISBN 3-540-66805-5.

# LESA

The background of the entire page is a close-up photograph of numerous water droplets of various sizes on a light blue, slightly textured surface. The droplets are in sharp focus, showing their rounded shapes and reflections, while the background is softly blurred.

**LESA MASCHINEN GMBH**

Zitadellenweg 34 13599 Berlin Germany

Tel.: +49 30 8058673-0 Fax: +49 30 8058673-11

E-Mail: [info@lesa-maschinen.de](mailto:info@lesa-maschinen.de)

Internet: [www.lesa-maschinen.de](http://www.lesa-maschinen.de)