

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizerische Bauzeitung
<b>Herausgeber:</b>	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
<b>Band:</b>	127/128 (1946)
<b>Heft:</b>	5
<b>Artikel:</b>	Ueber die Verwendung von leichten Gasen für Wärmekraftmaschinen mit geschlossenem Kreislauf
<b>Autor:</b>	Ackeret, J.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-83788">https://doi.org/10.5169/seals-83788</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Ueber die Verwendung von leichten Gasen für Wärmekraftmaschinen mit geschlossenem Kreislauf

Von Prof. Dr. J. ACKERET, Institut für Aerodynamik E. T. H., Zürich

Als Betriebsmittel ist bei geschlossenen Anlagen<sup>1)</sup> bisher *Luft* verwendet worden. Es ist aber nicht ohne Interesse zu untersuchen, ob Fortschritte durch Verwendung anderer Gase möglich sind. Die folgenden Bemerkungen beschränken sich auf die wesentlichen Punkte und lassen eine Anzahl von Fragen, insbesondere auch solche des Betriebes, notgedrungen noch offen, da ihre Beantwortung weitgehend ausgeführte Konstruktionspläne und nähere Kenntnisse über das chemische Verhalten der Metalle bei höheren Temperaturen in Atmosphären verschiedener Zusammensetzung voraussetzen.

Zunächst muss bemerkt werden, dass für den Wirkungsgrad des Kreisprozesses *ohne Berücksichtigung der Temperatur- und Druckverluste* die Gasnatur *keine* Rolle spielt, gleiche Temperaturen vorausgesetzt. Der Prozesswirkungsgrad, d. h. das Verhältnis der in mechanische Arbeit umsetzbaren zur insgesamt eingeführten Wärme beträgt nämlich beim verlustfreien Prozess nach dem auf Bild 1 dargestellten Entropiediagramm unter Voraussetzung konstanter spezifischer Wärmen:

$$\eta = \frac{c_p (T_1 - T_2) \eta_T - \frac{A R T_3}{\eta_V} \ln \frac{p_1}{p_2}}{c_p (T_1 - T_2) \eta_T}$$

Hierin bedeuten  $\eta_T$  den adiabatischen Wirkungsgrad der Turbine und  $\eta_V$  den isothermen Verdichterwirkungsgrad. Mit der Beziehung

$$\left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{x}{x-1}} = \frac{p_1}{p_2}$$

ist:

$$\eta = 1 - \frac{T_3}{(T_1 - T_2)} \frac{1}{\eta_T \eta_V} \ln \frac{T_1}{T_2}$$

In dieser Formel kommt die Gasnatur überhaupt nicht vor. Wenn also ein Einfluss da ist, so kann er nur in den *Temperatur- und Druckverlusten* bei den Wärmeübergängen und in der spezifischen Leistung der Anlage zum Vorschein kommen. Aus Gründen der Einfachheit wollen wir weiterhin annehmen, dass wir nur Gase und Gasmischungen von gleicher Atomzahl verwenden, d. h. also etwa nur zweiatomige oder nur einatomige Gase. Mischungen von Helium mit Argon wären ein Beispiel für die zweitgenannte Art. Veränderlich ist dann nur noch das mittlere Molekulargewicht  $m$ , das z. B. zwischen 4 (reines Helium) und 40 (reines Argon) kontinuierlich variiert werden kann. Für Gase gleicher Atomzahl sind nun die Größen:

$$x = \frac{c_p}{c_v} \quad \text{und} \quad \sigma = \frac{\eta g c_p}{\lambda}$$

worin  $\eta$  die Zähigkeit und  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit bedeuten, bekanntlich unabhängig von  $m^2$ .

Untersuchen wir jetzt für die allein in Betracht kommende turbulente Strömung Wärmeübergang und Reibung an einer bestimmten Stelle eines Rohres vom Durchmesser  $D$ , an der das Gas mit der mittleren Geschwindigkeit  $u$ , der Dichte  $\rho$ , dem Druck  $p$ , der Temperatur  $T$  und der Zähigkeit  $\eta$  strömt. Zwischen Gas und Wand soll die feste Temperaturdifferenz  $\Theta$  vorhanden sein. Dann gilt für die Schubspannung:

$$\tau = c_f \frac{\rho}{2} u^2$$

Für den Wärmeübergang pro Flächen- und Zeiteinheit folgt nach *Reynolds-Prandtl*:

$$q = \frac{c_f}{2P} \rho g c_p u \Theta$$

Für mässig grosse Reynolds'sche Zahlen  $R_e = \rho u D / \eta$  gilt nach *Blasius* genügend genau:  $c_f = \frac{0,0791}{\sqrt{R_e}}$

<sup>1)</sup> Vgl. SBZ, Bd. 113, S. 229\* (1939); Bd. 125, S. 269\* u. 279\* (1945); Bd. 126, S. 63\* u. 75\* (1945).

<sup>2)</sup> Nach Eucken ist mit guter Näherung  $\sigma = \frac{4 \times}{9 \times - 5}$

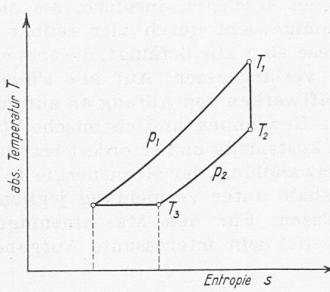


Bild 1. Entropiediagramm

Der Prandtl'sche Ausdruck  $P = 1 + \frac{1,74}{R_e^{1/8}} (\sigma - 1)$  ist nur wenig von  $R_e$  abhängig und liegt praktisch in der Nähe von 1. Für ein kurzes Rohrstück  $dx$  ist nun der Druckverlust:

$$dp = - 4 c_f \frac{\rho}{2} u^2 \frac{dx}{D}$$

Im weiteren soll verlangt werden, dass sich bei den verschiedenen Molekulargewichten  $m$  stets dasselbe Wert  $dp/p$ , ferner bei konstanten für den Wärmedurchgang massgebenden Temperaturdifferenzen  $\Theta$  dasselbe Wert  $dT/T$  einstellt. Diese Forderung bedingt eine (geringe) Veränderung von  $dx$ . Ohne über die Rohrlängen integrieren zu müssen, sieht man, dass sich dann auch gleiche Werte  $\Delta p/p_e$  und  $\Delta T/T_e$  ergeben, wobei  $\Delta p$  und  $\Delta T$  die endlichen Druck- bzw. Temperaturdifferenzen zwischen Rohrende und Rohranfang sind, und der Index  $e$  sich auf den Eintritt bezieht.

Für alle Gase gilt:

$$R = \frac{\mathfrak{R}}{m}; \quad \varrho = \frac{p}{g R T} = \frac{p m}{g \mathfrak{R} T}$$

für Gase mit gleicher Atomzahl:

$$c_p = \frac{\mathfrak{C}_p}{m}$$

wobei  $\mathfrak{R}$  und  $\mathfrak{C}_p$  Konstanten sind.

Nun ist:

$$\frac{dp}{p} = - 2 c_f \frac{\rho}{p} u^2 \frac{dx}{D} = - 2 c_f \frac{u^2}{g R T} \frac{dx}{D} = - 2 c_f \frac{M^2}{D} \frac{dx}{D}$$

worin  $M = u/a$  die Mach'sche Zahl (das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit) bedeutet. Soll also der Wert  $d p/p$  konstant bleiben, so muss sein:

$$c_f M^2 dx = \text{const.}$$

Andererseits ergibt ein konstanter Wert  $d T/T$ :

$$\frac{dT}{T} = \frac{1}{T} \frac{q dx}{\varrho g c_p u} \frac{\pi D}{\pi/4 D^2} = \frac{2 c_f}{P T} \Theta \frac{dx}{D} = \text{const.}$$

also  $\frac{c_f dx}{P} = \text{const.}$ , oder da  $P$  fast konstant ist, mit guter Näherung:  $c_f dx = \text{const.}$  Damit aber folgt weiter:

$$M = u/a = \text{const.}$$

Mit der Schallgeschwindigkeit  $a = \sqrt{g \mathfrak{R} T} = \sqrt{g \mathfrak{R} T / m}$  ergibt sich schliesslich:

$$u \sim \frac{1}{\sqrt{m}}$$

Ist also ein Gasgemisch 9 mal leichter als ein anderes, so kann es dreimal schneller strömen, ohne dass sich der Druckabfall oder die Temperaturaufnahme ändert. Geändert werden muss  $dx$  und damit auch die gesamte Rohrlänge. Man erhält:

$$\frac{dx}{D} = \frac{dp}{2 c_f p} \frac{1}{M^2}$$

$\frac{dx}{D}$  ist also proportional zu  $\frac{1}{c_f} = \frac{1}{0,0791} \sqrt{\frac{\rho u D}{\eta}}$

Bei gleichem  $D$  ist:

$$\frac{dx}{D} \sim \sqrt{\frac{\rho u}{\eta}}$$

Für gleiche Temperaturen ist die Zähigkeit von Gasen gleicher Atomzahl (mit alleiniger Ausnahme von Wasserstoff) wenig verschieden. Für ein Gemisch von Helium und Argon variiert sie beispielsweise zwischen  $m = 4$  und  $m = 40$  um nur rd. 10%. In vereinfachter Form kann somit gesetzt werden:

$$\frac{dx}{D} \sim \sqrt{\frac{\rho u}{\eta}} \sim \sqrt{\frac{1}{m \sqrt{m}}} = \sqrt{\frac{8}{m}}$$

Für leichtere Gase nimmt also die Rohrlänge schwach ab; denn da diese Gleichung für jedes  $x$  gilt, folgt die selbe Proportionalität auch für die ganze Rohrlänge.

Der entscheidende Vorteil besteht nun darin, dass sich bei Gleichheit der Druck- und Temperaturverluste, wie wir sie bisher angenommen haben, die Leistung vergrössert. Sie ist nämlich proportional zu:

$$L \sim \rho u c_p$$

Da die Temperaturgefälle beibehalten und die Durchmesser nicht geändert werden sollen, kann auch gesetzt werden:

$$L \sim m \frac{1}{\sqrt{m}} \frac{1}{m} = \frac{1}{\sqrt{m}}$$

Eine Verkleinerung des Molekulargewichtes um den oben genannten Faktor 9 würde also die Leistungsfähigkeit der Austauschflächen verdreifachen. Die Rohrlängen würden um rd. 25% kleiner. Da die Drücke und Temperaturen gleich sind und damit die Wandstärken nicht geändert zu werden brauchen, verringert sich das Gewicht der wirksamen Rohrfläche je PS auf den vierten Teil.

Die Vergrösserung der Leistung kann physikalisch auch folgendermassen eingesehen werden: Nach dem Gesetz von Avogadro enthält die Volumeneinheit bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleichviele Moleküle, d. h. aber auch (bei gleicher Atomzahl) gleichviele molekulare Freiheitsgrade. Jeder davon transportiert gleichviel Energie und kann auch gleichviel davon nutzbar abgeben. Da wir aber das  $\frac{1}{\sqrt{m}}$ -fache Volumen je Zeiteinheit transportieren, folgt eine Erhöhung der Leistung um den selben Faktor.

Der grösste Nutzen ist vorhanden beim Wärmeaustauscher und bei den Vor- und Zwischenkühlern des Kompressors, die wasserseitig ja grosse Wärmeübergangszahlen aufweisen. Bei den Gaserhitzern tritt innenseitig eine grosse Verbesserung auf. Aussenseitig wird dadurch eine schärfere Ausnutzung der Wärmestrahlung ermöglicht. Bei Druckfeuerung, wo aussenseitig der Wärmeübergang vergrössert ist, kommen natürlich die Vorteile leichter Gase stärker zur Geltung. Rohrleitungen brauchen im Durchmesser nicht vergrössert zu werden, da sie bei den kleineren Apparatedimensionen auch etwas kürzer ausfallen dürften; auf alle Fälle aber dürfte ihr Gewicht je Leistungseinheit mit  $\sqrt{m}$  zurückgehen.

Die Turbomaschinen würden in den Abmessungen trotz grösserer Leistung gleich bleiben, wenn es möglich wäre, auch die Umfangsgeschwindigkeiten entsprechend  $\frac{1}{\sqrt{m}}$  zu steigern.

Aerodynamisch würde dadurch keine Verschlechterung entstehen, da die hauptsächlich massgebenden Mach'schen Zahlen ja unverändert sind; allein die Festigkeit erlaubt nur bei den Axialverdichtern noch eine Steigerung, nicht aber bei den Turbinen. Das bedingt eine Vergrösserung der Stufenzahl. Für den Verdichter ist die Stufenzahl bei einem adiabatischen Temperaturverhältnis  $\vartheta$  und einer Druckziffer  $\psi$  durch

$$n_v = \frac{2}{\vartheta - 1} \frac{\ln \vartheta}{\psi M^2}$$

gegeben; sie würde also wie  $\frac{1}{M^2} \propto \frac{1}{m}$  zunehmen; es sei denn,

dass die Umfangsgeschwindigkeit noch gesteigert wird. Im schlimmsten Fall würde also die Länge der Maschine im Verhältnis der Werte  $1/m$  zunehmen, ohne dass der Durchmesser wesentlich geändert zu werden braucht. Die grösseren Werte  $\varphi = c_m/u$  in der Maschine würden sich für den Wirkungsgrad eher günstig auswirken, Kompressibilität würde keine Schwierigkeiten ergeben.

Als leichteste Gase stehen zur Verfügung: Wasserstoff  $H_2$  ( $m = 2$ ) und Helium  $He$  ( $m = 4$ ). Es scheint, dass die Anwendung von  $H_2$  bei hohen Temperaturen für das heute gebräuchliche Material Schwierigkeiten ergeben würde. Mischungen von  $H_2$  und Luft sind wegen Explosionsgefahr, solche von  $H_2$  und Stickstoff  $N_2$  wohl wegen Ammoniakbildung ( $NH_3$ ) ausgeschlossen. Es bleibt also praktisch nur  $He$ , das in den U.S.A. in industriell ausmass zu vernünftigen Kosten genommen wird. Als Mischgas wird ein relativ schweres Gas, vielleicht  $CO_2$ , Vorteile haben, das leicht verflüssigt werden kann und das damit eine gute Möglichkeit der Aenderung des Mischungsverhältnisses bietet.

Es ist klar, dass nur ein sehr eingehendes konstruktives Studium imstande ist, abzuklären, wie weit von den hier erwähnten physikalischen Möglichkeiten praktischer Gebrauch gemacht werden kann. Die grossen Erfahrungen der Kälteindustrie und der chemischen Grossindustrie, wo man ja auch vor teureren und chemisch weit weniger harmlosen Stoffen nicht zurückschreckt, könnten dabei von erheblichem Nutzen sein.

Legt man weniger Gewicht auf Steigerung der Leistung, lässt also die Apparatedimensionen und die Leistung wenig verändert, so resultiert, wie man leicht übersieht, eine spürbare Erhöhung des Wirkungsgrades, da dieser ja stark von den Verlusten in den Apparaten abhängt. Man kann dann mit Druck- und Temperaturverhältnissen nahe an eins arbeiten und nähert

sich so weitgehend dem Carnot-Wirkungsgrad. Wahrscheinlich bringt eine Kombination beider Tendenzen den grössten Gesamt-nutzen.

Eine interessante Anwendung solcher Gemische ergibt sich möglicherweise bei den vor kurzem noch utopischen, heute aber doch ernsthaft erwogenen Atomkraftwerken. Soviel man sehen kann, wird die bei der Kernspaltung gelöste Energie in erster Linie als Wärme frei; direkte Elektrizitätserzeugung erscheint vorläufig noch unmöglich. Somit erhebt sich die Frage, welche Art von Wärmekraftmaschinen für solche Anlagen vor allem in Frage kommt. Da die Wärmeleitung in relativ grossen Massen erfolgt, scheiden Kolbenmaschinen offenbar aus; es kommt nur Beheizung, also Uebertragung an ein flüssiges oder gasförmiges Medium und Turbinenantrieb in Frage. Es trifft sich nun recht merkwürdig, dass die aus anderen Gründen oben empfohlene Mischung von Helium und  $CO_2$  auch für die «Atomkessel» geeignet erscheint, insofern, als sie nur Elemente enthält, deren Atomgewicht durch vier teilbar ist ( $He = 4$ ,  $C = 12$ ,  $O = 16$ ). Diese sind alle befähigt, die schnellen Neutronen ohne Einfangen zu verlangsamen. Auf alle Fälle wird es auch bei den Atomkraftwerken von Anfang an auf guten Wirkungsgrad ankommen. Die Gewinnung und chemische Vorbereitung des «Brennstoffes» ist kostspielig und erfordert besondere Anlagen; die nachfolgende Umwandlung der Kernenergie in elektrische Energie wird man deshalb unter Vermeidung jeglicher Verschwendungen vornehmen müssen. Für den Maschineningenieur ergeben sich da ohne Zweifel sehr interessante Aufgaben.

## Das Diffusionshygrometer

Von Prof. Dr. H. GREINACHER, Bern

Die gebräuchlichsten Hygrometertypen sind bekanntlich das Psychrometer, das Taupunktihgrometer und das Haarhygrometer. Da das Erstgenannte in der Form des Aspirationshygrometers zu genaueren Messungen verwendet wird, hat es mit dem Zweitgenannten den Nachteil, dass zu jeder Messung ein Versuch ausgeführt werden muss. Das direkt zeigende Haar-Hygrometer, das die von der Temperatur unabhängige Ausdehnung von Haaren mit der Feuchtigkeit verwendet, ist zwar bequem, aber seine Angaben können, wenn gewisse Voraussetzungen nicht erfüllt sind, sehr ungenau sein. Man sollte den Feuchtigkeitsgrad unmittelbar und mit genügender Genauigkeit ablesen können. Hierzu eignet sich das Diffusionshygrometer, bei dem zur Anzeige die verschiedenen Diffusionsgeschwindigkeiten von Luft und Wasserdampf durch poröse Schichten ausgenutzt werden. Eine Tonplatte  $P$  (Bild 1) von genügend feiner Porosität ist auf den seitlichen Ansatz eines Glasgefäßes aufgekittet, das mit dem Flüssigkeitsmanometer  $M$  (Füllflüssigkeit: Paraffinöl) verbunden ist. Wird nun in den untern Teil, der beim eingeschlossenen Verschluss  $S$  dicht anschliesst, ein Trockenmittel (KOH u. dgl.), eingeführt, durch das die Luft innen absolut trocken wird, so stellt sich von selbst ein gewisser Unterdruck  $\Delta p_A$  ein, der umso grösser ist, je feuchter die umgebende Luft ist. Der Vorgang kommt folgendermassen zustande. Innen und aussen sei nach Einsetzen des Schliffes  $S$  der Gasdruck derselbe (Manometerstellung 0). Innen haben wir nur Luft, aussen Luft + Wasserdampf. Der Partialdruck der Luft ist also aussen kleiner als innen, wodurch eine stärkere Luftdiffusion von innen nach aussen stattfindet. Der Druck im Innern sinkt, bis die Luftdiffusion in beiden Richtungen gleich gross geworden ist. Er ist umso kleiner, je grösser der Unterschied des Partialdruckes der Luft innen und aussen, d. h. je höher der Partialdruck des Wasserdampfes ist. In einer ausführlichen Veröffentlichung<sup>1)</sup> sind die Verhältnisse genauer dargestellt; dort ist auch bewiesen, dass man Proportionalität ansetzen kann:

$$\Delta p_A = kp \quad \dots \quad (1)$$

wo  $p$  den Partialdruck des Wasserdampfes in mm Hg bedeutet.  $\Delta p_A$  kann in beliebigen Einheiten gemessen sein. Die Apparaturkonstante  $k$  lässt sich ein für alle Male bestimmen. Man macht sich von dieser in einfacher Weise unabhängig, indem man ein zweites Diffusionshygrometer mitverwendet und dieses statt mit einem Trockenmittel mit Wasser beschickt. Dann stellt sich ein Ueberdruck  $\Delta p_B$  ein, der dem Unterschied des Dampfdruckes zwischen innen und aussen proportional ist. Da die Luft innen mit Wasserdampf gesättigt ist, also der Dampfdruck  $p_s$  herrscht, hat man:

$$\Delta p_B = kp_s - p \quad \dots \quad (2)$$

$\Delta p_A$  und  $\Delta p_B$ , die beide positiv gerechnet seien, hängen nach Gleichungen (1) und (2) so zusammen:

$$\Delta p_A + \Delta p_B = kp_s \quad \dots \quad (3)$$

<sup>1)</sup> Helv. Phys. Acta, Bd. 17, S. 437, 1944.