

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 69 (1951)  
**Heft:** 24

**Artikel:** Berechnung der Wärmeaustauscher  
**Autor:** Bošnjakovi, F.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-58875>

#### 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:** 23.02.2026

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

## Berechnung der Wärmeaustauscher

Von Prof. Dr. F. BOŠNJKOVIĆ, Zagreb

DK 621.565.94

## A. Wahl der Bezeichnungen

Die Berechnung und Beurteilung von Wärmeaustauschern für stationären Wärmeaustausch kann vereinheitlicht und sehr gefördert werden durch Hinzuziehung einer Betriebscharakteristik  $\Phi$ , wie im folgenden auszugsweise gezeigt werden soll<sup>1)</sup>.

Irgend ein Wärmeaustauscher (Bild 1) soll mit seiner Austauschfläche  $F_0 \text{ m}^2$  den Wärmeübergang zwischen zwei Strömen  $W_1$  und  $W_2$  vermitteln. Mit  $W_1 = G_1 c_1 \text{ kcal/h } ^\circ\text{C}$  wollen wir in der Regel den Wärmewert (Wasserwert) des schwächeren Stromes, mit  $W_2$  denjenigen des stärkeren Stromes bezeichnen, so dass durch Übereinkunft

$$(1) \quad 0 < W_1/W_2 < 1$$

ist. Durch das Flächenelement  $dF$  wird die Wärme

$$(2) \quad dQ = k(t_1 - t_2) dF$$

und durch die ganze Fläche  $F_0$  die Wärme

$$(3) \quad Q = \int_0^{F_0} k(t_1 - t_2) dF$$



Bild 1. Temperatur-Bezeichnungen

ausgetauscht, wenn  $t_1$  und  $t_2$  die lokalen Stromtemperaturen und  $k$  die Wärmedurchgangszahl in  $\text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$  bedeuten. Die (gleichmässigen) Eintrittstemperaturen mögen mit einem Strich ( $t_1'$ ,  $t_2'$ ), die Austrittstemperaturen mit zwei Strichen ( $t_1''$ ,  $t_2''$ ) gekennzeichnet werden. Die Wärme  $Q$  in Gleichung (3) wird dem einen Strom entzogen, dem andern zugeführt, und es muss sein

$$(4) \quad Q = W_1(t_1' - t_1'') = W_2(t_2'' - t_2')$$

Je nach den Temperaturen kann  $Q$  in den Gleichungen (3) und (4) positiv oder negativ sein.

Es ist von Vorteil, diese Wärme  $Q$  mit Hilfe der oft vorgegebenen Eintrittstemperaturen  $t_1'$  und  $t_2'$  darzustellen. Das versuchen wir mit dem Ausdruck

$$(5) \quad Q = W_1(t_1' - t_2') \Phi$$

worin die Grösse  $\Phi$  zwar nicht bekannt ist, aber jedenfalls von der Art und Grösse des Austauschers und von den herrschenden Wärmeübergangs-Verhältnissen abhängen wird. Aus den Gleichungen (5) und (4) folgen die nützlichen Beziehungen

$$(6) \quad \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} = \Phi$$

$$(7) \quad \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{W_1}{W_2} \Phi$$

$$(8) \quad \frac{t_1'' - t_2''}{t_1' - t_2'} = 1 - \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \Phi$$

$$(9) \quad \frac{t_1'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = 1 - \Phi$$

$$(10) \quad \frac{t_1' - t_2''}{t_1' - t_2'} = 1 - \frac{W_1}{W_2} \Phi$$

Damit sind alle Temperaturunterschiede der ein- und austretenden Ströme mit Hilfe der Funktion  $\Phi$  ausgedrückt worden. Die Grösse  $\Phi$  wollen wir als die Betriebscharakteristik des Austauschers bezeichnen<sup>2)</sup>.

Das Verhalten des Austauschers wird außer durch seine

<sup>1)</sup> Nach einem Vortrag im Maschinen-Laboratorium der ETH Zürich am 27. Okt. 1950. Ausführlicher in der Arbeit des Verfassers: «Einheitliche Berechnung der Rekuperation», die demnächst als VDI-Forschungsheft erscheinen wird.

<sup>2)</sup> Im neu erschienenen Buch von H. Hausen: «Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom», Springer-Verlag, Berlin, wird die selbe Grösse unter dem Namen Wirkungsgradfunktion eingeführt und ausführlich verwendet.

Art (Gleichstrom, Gegenstrom usw.) noch durch die Grössen  $F_0$ ,  $k$ ,  $W_1$  und  $W_2$  bedingt. Aus diesen Grössen kann man nur zwei unabhängige Dimensionslose bilden, z. B.  $kF_0/W_1$  und  $W_1/W_2$ . Deswegen kann und muss die Charakteristik  $\Phi$  von nur zwei solchen Grössen abhängen.

$$(11) \quad \Phi = \Phi \left( \frac{kF_0}{W_1}, \frac{W_1}{W_2} \right)$$

wobei die Art dieser Funktion nur noch durch die Art der Ausführung (Gleichstrom, Gegenstrom usw.) bedingt wird.

## B. Allgemeine Eigenschaften der Betriebscharakteristik

Die Betriebscharakteristik  $\Phi$  weist einige Eigentümlichkeiten allgemeiner Natur auf, von denen hier zwei ohne nähere mathematische Begründung erwähnt seien.

In Bild 2 ist der übliche Verlauf von  $\Phi$  in Abhängigkeit von  $kF_0/W_1$  und mit  $W_1/W_2$  als Parameter dargestellt, wobei wegen Gleichung (1) nur das Gebiet zwischen den Linien  $W_1/W_2 = 0$  und  $W_1/W_2 = 1$  zu betrachten ist. Man kann darauf folgendes feststellen:

- Alle Linien  $W_1/W_2 = \text{konst.}$  laufen aus dem Nullpunkt mit scharfer Schnabelform und mit dem hier gemeinsamen Neigungswinkel  $\arctg 1$  aus, ohne Rücksicht auf die Art des Austauschers und den Wert von  $W_1/W_2$ .

*Folgerung:* Alle Austauscher mit starker Strombelastung, d. h. mit kleinem Wert  $kF_0/W_1$  zeigen ohne Rücksicht auf die Ausführungsart die selbe Betriebscharakteristik  $\Phi$ , d. h. auch das sonstige Verhalten.

- Die Linie  $W_1/W_2 = 0$ , die z. B. bei Heizung mit kondensierendem Dampf vorkommt, weist bei allen Austauschern den gleichen Verlauf auf. Die Linie gehorcht dem Gesetz

$$(12) \quad \Phi_0 = 1 - e^{-\frac{kF_0}{W_1}} \left( \frac{W_1}{W_2} = 0 \right)$$

*Folgerung:* Bei  $W_1/W_2 = 0$  zeigen alle Austauscher ohne Rücksicht auf die Ausführungsart das selbe Verhalten.

C.  $\Phi$ -Diagramme einiger Ausführungen

Das  $\Phi$ -Diagramm muss für jede Austauscherart besonders ermittelt werden. Für einige Ausführungen nach Bild 3 sind im Anhang masstäbliche  $\Phi$ -Diagramme wiedergegeben (Bilder 15 bis 18). In die Diagramme sind neben den Linien  $W_1/W_2 = \text{konst.}$  auch die Linien  $kF_0/W_1 = \text{konst.}$  eingezeichnet, die bei gewissen Berechnungen von Nutzen sind. Diagramme für andere Ausführungen und für einen grösseren Geltungsbereich können in der bereits angegebenen Quelle<sup>3)</sup> eingesehen werden.

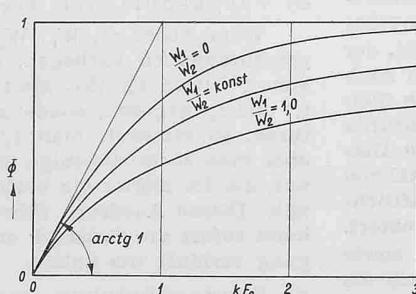
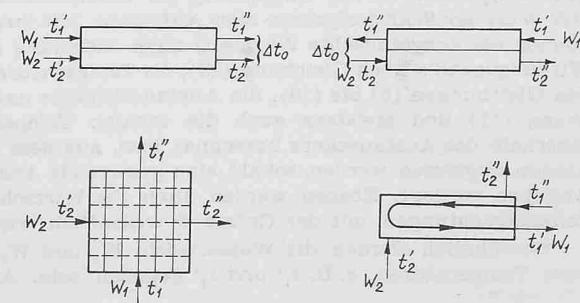
D. Wirkungsgrad  $\varepsilon$ 

In einem sehr guten Gegenstrom-Austauscher könnte man im Grenzfalle erreichen, dass sich die Austrittstemperatur des schwächeren Stromes  $W_1$  mit der Eintrittstemperatur des stärkeren Stromes  $W_2$  ausgleicht, d. h. dass  $t_1'' = t_2'$  wird. Hierbei könnte vom schwächeren Strom  $W_1$  im Grenzfalle die Wärmemenge

$$(13) \quad Q_\infty = W_1(t_1' - t_2')$$

abgegeben werden, wobei der Index  $\infty$  auf die erforderliche unendliche Austauschfläche des idealen Austauschers hinweist. In Wirklichkeit tauscht ein Austauscher nur die

<sup>3)</sup> Siehe Note 1.

Bild 2. Das  $\Phi$ -DiagrammBild 3. Einfache Austauschertypen (zugehörige  $\Phi$ -Diagramme s. Bilder 15 bis 18 im Anhang)

Wärme  $Q$  nach Gleichung (5) aus, die kleiner als  $Q_\infty$  ist; wir bezeichnen das Verhältnis

$$(14) \quad \varepsilon = \frac{Q}{Q_\infty}$$

als den Wärmewirkungsgrad. Er eignet sich gut zur Beurteilung der Frage, wie weit der Austauscher die ihm zur Verfügung gestellten Abkühlungsmöglichkeiten ( $t_1' - t_2'$ ) des Stromes  $W_1$  verwertet hat. Mit den Gleichungen (5) und (13) folgt aus Gleichung (14)

$$(15) \quad \varepsilon \equiv \Phi$$

so dass  $\Phi$  unmittelbar auch den Wirkungsgrad  $\varepsilon$  darstellt<sup>4)</sup>

Falls  $W_1$  und  $W_2$  durch Außenbedingungen aufgezwungen sind, ist der Vergleich verschiedener Austauscher untereinander nur bei gleichem  $W_1/W_2$  vernünftig. Durch diese Zahl ist nach Gleichung (4) das Temperaturverhältnis

$$(16) \quad \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{W_1}{W_2}$$

einheitig festgelegt (Wärmebilanz). Bei gegebenem Wert  $W_1/W_2$  kann man auf dieses Temperaturverhältnis nicht durch die Wahl oder Verbesserung des Austauschers einwirken. Im  $\Phi$ -Diagramm stellen somit die Linien  $W_1/W_2 = \text{konst.}$  zugleich auch den Verlauf des Wirkungsgrades  $\varepsilon$  in Abhängigkeit von  $kF_0/W_1$  dar. Durch Gegenüberstellung der  $\Phi$ -Diagramme (Bild 4) kann man verschiedene Ausführungen untereinander vergleichen, wobei die Überlegenheit des Gegenstromes und einigermassen auch des reinen Kreuzstromes gegenüber anderen Ausführungsarten, besonders bei Belastungen  $W_1/W_2$  in der Nähe von 1, zum Vorschein kommt. Bei  $W_1/W_2 = 0$  sind dagegen alle Austauscherarten in bezug auf  $\varepsilon$  gleichwertig.

#### E. Die mittlere Temperaturdifferenz $\Delta t_m$

Die ausgetauschte Wärmemenge berechnet man oft mit Hilfe einer mittleren Temperaturdifferenz  $\Delta t_m$ , indem man setzt

$$(17) \quad Q = k \Delta t_m F_0$$

Bei Gleich- und Gegenstrom war  $\Delta t_m$  die logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz. Die Größe  $\Delta t_m$  musste bisher je nach der Austauscherart durch mehr oder weniger umständliche Berechnung ermittelt werden. Aus den Gleichungen (17) und (5) folgt jedoch

$$(18) \quad \frac{\Delta t_m}{t_1' - t_2'} = \frac{\Phi}{kF_0/W_1}$$

Sucht man im  $\Phi$ -Diagramm bei den Werten  $kF_0/W_1$  und  $W_1/W_2$  des betreffenden Austauschers seinen Betriebspunkt A auf (Bild 5) und verbindet diesen mit dem Nullpunkt, so legt Punkt M bei der Abszisse  $kF_0/W_1 = 1$  den Wert

$$\frac{\Delta t_m}{t_1' - t_2'}$$

fest, woraus bei gegebenen Werten  $t_1'$  und  $t_2'$  die Größe  $\Delta t_m$  sofort zu ermitteln ist.

Für unsere Betrachtungen ist der Begriff der mittleren Temperaturdifferenz  $\Delta t_m$  nicht erforderlich. Er wurde hier erwähnt, um dem Leser gegebenenfalls den Anschluss an die sonst übliche Berechnungsweise zu erleichtern.

#### F. Praktische Anwendung

Wir setzen nun voraus, dass das  $\Phi$ -Diagramm der in Aussicht genommenen Ausführungsart des Austauschers zur Verfügung steht. Bei allen praktischen Berechnungen liegt das Kernproblem in der Auffindung der Betriebscharakteristik  $\Phi$  als der Schlüsselgröße aller Aufgaben. Mit ihrer Hilfe können die ausgetauschte Wärme  $Q$  nach Gleichung (5), der Wirkungsgrad  $\varepsilon$  nach Gleichung (15), die Temperaturen nach den Gleichungen (6) bis (10), die Austauschfläche nach Gleichung (11) und meistens auch die lokalen Temperaturen innerhalb des Austauschers berechnet, bzw. aus dem  $\Phi$ -Diagramm abgelesen werden, sobald eine genügende Anzahl von Angaben vorliegt. Ebenso werden auch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit der Größe  $\Phi$  wesentlich erleichtert.

Gewöhnlich werden die Wasserwerte  $W_1$  und  $W_2$ , sowie zwei Temperaturen, z. B.  $t_1'$  und  $t_2'$  gegeben sein. Auch die

<sup>4)</sup> Man beachte, dass Gleichung (13) nur dann physikalisch einen Sinn hat, wenn  $W_1$  den schwächeren Strom bezeichnet. Das haben wir aber in Gleichung (1) auch vorausgesetzt.

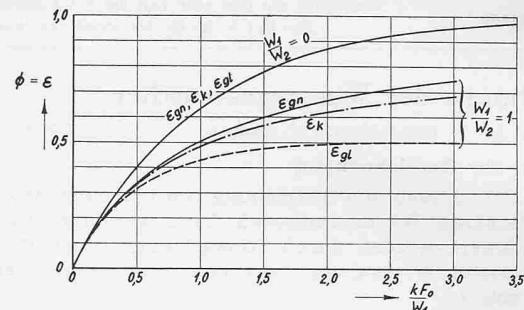


Bild 4. Vergleich des Wirkungsgrades  $\varepsilon$  nach Gl. (14) für Gleichstrom, Gegenstrom und reinen Kreuzstrom

Wärmedurchgangszahl  $k$  wird gewöhnlich bekannt sein oder wird geschätzt werden können. Die Berechnung ist selbstverständlich auch bei andersgearteten Angaben durchführbar. Hier sollen einige öfter auftretende praktische Aufgaben kurz besprochen werden.

##### a) Gegeben die Austauschfläche $F_0$

Es seien für den Austauscher die Größen  $F_0$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $t_1'$ ,  $t_2'$ , und  $k$  gegeben. Man frägt nach den übrigen Temperaturen, nach der ausgetauschten Wärmemenge  $Q$  und dem Wirkungsgrad  $\varepsilon$  des Austauschers. Man ermittle zunächst die dimensionslosen Größen  $kF_0/W_1$  und  $W_1/W_2$ . Mit ihnen ermittelt man mit Hilfe des  $\Phi$ -Diagrammes den Wert  $\Phi$ . Dadurch ist das Problem gelöst, denn alle anderen Größen folgen aus den früher gegebenen Gleichungen.

##### b) Gesucht die Austauschfläche $F_0$

Oft wird bei gegebenen Werten  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $t_1'$ ,  $t_2'$ ,  $k$  die Größe  $F_0$  gesucht. Zu diesem Zweck muss noch etwas gegeben sein, z. B. noch eine Temperatur oder eine Wirtschaftlichkeitsbedingung oder ähnliches. Manchmal wird z. B. ein kleinster, nicht zu überschreitender Temperaturunterschied  $\Delta t_0$  der beiden Ströme an dem einen oder anderen Ende des Austauschers vorgeschrieben. Bei Gleichstrom kann es sich hierbei nur um den Unterschied der Austrittstemperaturen handeln

$$(19) \quad \Delta t_0 = t_1'' - t_2'' \quad (\text{Gleichstrom})$$

Bei Gegenstrom kann der kleinste Temperaturunterschied nur beim Austritt des schwächeren Stromes  $W_1$  liegen, und hier ist

$$(20) \quad \Delta t_0 = t_1'' - t_2' \quad (\text{Gegenstrom})$$

Der selbe Ausdruck (20) gilt auch für reinen Kreuzstrom. Aus diesen Angaben folgt für Gleichstrom aus den Gleichungen (19) und (8)

$$(21) \quad \Phi = \frac{1 - \frac{\Delta t_0}{t_1' - t_2'}}{1 + \frac{W_1}{W_2}} \quad (\text{Gleichstrom})$$

und für Gegenstrom und reinen Kreuzstrom nach den Gleichungen (20) und (9)

$$(22) \quad \Phi = 1 - \frac{\Delta t_0}{t_1' - t_2'} \quad (\text{Gegenstrom und Kreuzstrom})$$

Wenn also neben  $t_1'$ ,  $t_2'$ ,  $W_1$  und  $W_2$  noch  $\Delta t_0$  vorgeschrieben ist, so kann man hier  $\Phi$  nach Gleichung (21) oder Gleichung (22) berechnen und in das  $\Phi$ -Diagramm einzeichnen, wodurch  $kF_0/W_1$  und alle Temperaturen festgelegt werden. Man muss noch  $k$  kennen, um  $F_0$  zu berechnen.

##### c) Vorgeschrrieben die Wärmemenge $Q$

Wenn neben  $Q$ ,  $W_1$ ,  $W_2$  und  $k$  noch irgendwelche Temperaturangaben vorliegen, so benutzt man zur Ermittlung von  $\Phi$  Gleichung (5). Sind nicht die beiden Temperaturen  $t_1'$  und  $t_2'$  gegeben, sondern irgendwelche andere Temperaturen, so ermittelt man  $t_1'$  oder  $t_2'$  aus Gleichung (4), oder aber man sucht diejenige unter den Gleichungen (6) bis (10) auf, die im Zähler die beiden gegebenen Temperaturen enthält. Diesen Ausdruck führt man in Gleichung (5) ein und kann sofort die Größe  $\Phi$  ermitteln. Der weitere Rechnungsgang verläuft wie üblich.

##### d) Vorgeschrrieben der Wirkungsgrad $\varepsilon$

Wenn bei gegebenen Wärmewerten  $W_1$  und  $W_2$  ein mindestens zu erreichernder Wirkungsgrad  $\varepsilon$  des Austauschers

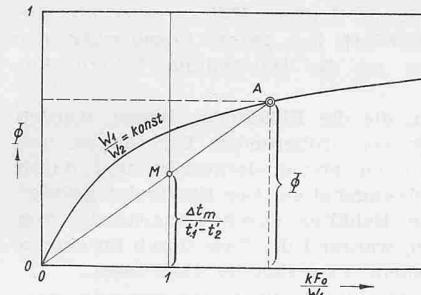
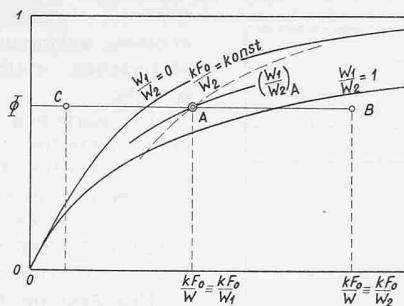
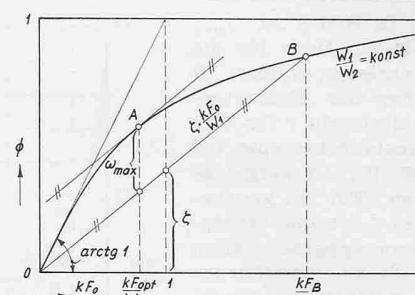
Bild 5. Mittlere Temperaturdifferenz  $\Delta t_m$  im  $\phi$ -DiagrammBild 6. Ermittlung des Austauschers bei Kenntnis nur des einen Stromes  $W$ 

Bild 7. Wirtschaftliche Austauschergrösse für Verhältnisse nach Gl.(24)

gewünscht wird, so ist  $\phi$  durch den Ausdruck (15) festgelegt. Mit bekannten Werten für  $W_1/W_2$  und  $\phi$  ist der Zustandspunkt im  $\phi$ -Diagramm eindeutig bestimmt, und der weitere Rechnungsgang ist bekannt.

e) Von zwei Strömen ist nur der eine bekannt

Es sei neben  $F_0$ ,  $k$ ,  $t_1'$  und  $t_2'$  nur der eine Wärmewert  $W$  und außerdem der kleinste Temperaturunterschied  $\Delta t_0$  nach Gleichung (20) gegeben<sup>5)</sup>. Neben anderen Größen muss auch der andere Wärmewert ermittelt werden.

Wir wissen nicht, ob der gegebene Wärmewert  $W$  sich als der schwächere oder stärkere Strom erweisen wird, und ob ihm die Bezeichnung  $W_1$  oder  $W_2$  zukommt. Man geht deswegen folgendermassen vor: Zunächst ermittle man  $kF_0/W$  aus den Angaben und daraus  $\phi$  mit Hilfe von Gleichung (22). Mit diesen Werten gehe man in das  $\phi$ -Diagramm ein, als ob  $W \equiv W_1$  wäre (was ja nicht zuzutreffen braucht). Auf diese Weise bekommt man entweder Punkt A im Feld zwischen den Linien  $W_1/W_2 = 0$  und  $W_1/W_2 = 1$ , oder Punkt B unterhalb  $W_1/W_2 = 1$ , oder Punkt C oberhalb  $W_1/W_2 = 0$  (Bild 6). Erhält man Punkt A, so hat man richtig geschätzt, es ist tatsächlich  $W \equiv W_1$ , und die Grösse  $W_1/W_2$  ist gefunden, die Aufgabe somit gelöst.

Bekommt man dagegen Punkt B unterhalb  $W_1/W_2 = 1$ , so ist  $W \equiv W_2$  und  $kF_0/W \equiv kF_0/W_2$ , so dass man diesen Wert nicht als Abszisse nehmen darf, da diese  $kF_0/W_1$  ist. Deswegen sind in den meisten  $\phi$ -Diagrammen noch die Linien  $kF_0/W_2 = \text{konst}$  eingetragen (Bild 6). Mit bekanntem  $\phi$  findet man dann den richtigen Zustandspunkt A auf der Linie  $kF_0/W_2 \equiv kF_0/W$ , wodurch die Aufgabe gelöst ist.

Erhält man Punkt C oberhalb der Linie  $W_1/W_2 = 0$ , so gibt es keine reale Lösung, d. h. die vorgeschriebene kleinste Temperaturdifferenz  $\Delta t_0$  ist mit den vorliegenden Angaben gar nicht zu erreichen.

#### G. Wirtschaftlichste Austauschergrösse

Für die Wahl der zweckmässigsten Grösse eines Austauschers gibt es je nach seiner Zweckbestimmung verschiedene Gesichtspunkte. Für den Einbau in ein Flugzeug werden das Gewicht, der Raumbedarf und der Strömungswiderstand des Austauschers wichtig sein, während bei stationären Anlagen oft die Wirtschaftlichkeit eine entscheidende Rolle spielt. Als Beispiel wollen wir die günstigste Grösse eines Rauchgas-Luftvorwärmers besprechen, oder allgemeiner eines solchen Austauschers, bei dem die erzielbaren Ersparnisse der ausgetauschten Wärme verhältnisgleich sind.

In einem Luftvorwärmer wird Abgaswärme an die Verbrennungsluft abgegeben, und jede gerettete Abgaskalorie verringert den Kohlenverbrauch des Kessels. Man kann somit der ausgetauschten Wärme  $Q$  kcal/h einen aus dem Kohlenpreis zu berechnenden Kalorienwert  $x_q$  Fr./kcal zuordnen. Die Ausführungskosten des Austauschers mögen  $x_f$  Fr./m<sup>2</sup> Austauschfläche betragen, mit einem jährlichen Abschreibungs- und Unterhaltungsfaktor  $a$ . Die Betriebskosten (Ventilatorarbeit usw.) belaufen sich auf  $x_b$  Fr./m<sup>2</sup> h. Die Anlage wird von den 8760 möglichen Betriebsstunden des Jahres vermutlich nur den  $x$ -ten Teil im Vollbetrieb sein. Dann wird jährlich die Wärmemenge  $Q x_q 8760 x$  zurückgewonnen, wofür jedoch an Abschreibung und Betrieb der Betrag

$$(a x_f + 8760 x x_b) F_0$$

<sup>5)</sup> Bei Gleichstrom ist  $\Delta t_0$  nach dem Ausdruck (19) massgebend, so dass bei ihm der Berechnungsgang anders wird; er ist im VDI-Forschungsheft angegeben.

aufgewendet wird. Jährlich kann also der Differenzbetrag  $B$  gespart werden

$$(23) \quad B = Q x_q 8760 x - (a x_f + 8760 x x_b) F_0 \quad \text{Fr./Jahr}$$

Die Grösse des Austauschers muss so gewählt werden, dass  $B$  einen Höchstwert erreicht. Drückt man  $Q$  in Gleichung (23) mit Gleichung (5) aus, so bekommt man

$$(24) \quad B = 8760 x x_b W_1 (t_1' - t_2') (\Phi - \zeta kF_0/W_1)$$

worin als Kostenverhältniszahl  $\zeta$  gesetzt wurde

$$(25) \quad \zeta = \frac{\frac{a}{8760 x} x_f + x_b}{k (t_1' - t_2') x_b}$$

In Gleichung (24) sind  $x$ ,  $x_q$ ,  $W_1$ ,  $t_1'$ ,  $t_2'$  gegebene Außenbedingungen, die dem Austauscher aufgezwungen sind und auf die man durch die Wahl des Austauschers nicht einwirken kann. In Gleichung (25) sind  $x$ ,  $x_q$  und  $(t_1' - t_2')$  ebenfalls aufgezwungene Außenbedingungen, dagegen werden  $x_f$ ,  $x_b$  und  $k$  entscheidend durch die Wahl des Austauschers beeinflusst. Aber bei einem in Aussicht genommenen Austauschertyp und ungefährer Austauschergrösse werden die genannten Größen wenig veränderlich sein und können geschätzt werden. Man kann in Gleichung (25) mit  $\zeta = \text{konst}$ . rechnen.

Der angestrebte Höchstwert von  $B$  wird erreicht, wenn in Gleichung (24) der letzte Klammerausdruck

$$(26) \quad \omega = \Phi - \zeta \frac{kF_0}{W_1} = \frac{B}{8760 x x_b W_1 (t_1' - t_2')}$$

am grössten wird. Das kann man aus dem  $\phi$ -Diagramm nach Bild 7 ermitteln, wenn man durch den Nullpunkt die Gerade  $\zeta kF_0/W_1$  zieht; dazu trägt man bei  $kF_0/W_1 = 1$  den Zahlenwert für  $\zeta$  auf. Eine hierzu parallele Tangente liefert auf der Linie  $W_1/W_2 = \text{konst}$ . den Punkt A, wodurch  $\omega_{\max}$  und die hierfür benötigte optimale Austauschergrösse  $F_{\text{opt}}$  festgelegt werden. Jede Vergrösserung des Austauschers über diesen Wert würde die Wirtschaftlichkeit wieder vermindern, so dass z. B. ein grösserer Austauscher mit der Fläche  $F_B$  (Punkt B) durch seine hohen Anschaffungs- und Betriebskosten den ganzen Wärmegewinn verschlucken würde. Bei der Bestimmung der optimalen Austauschergrösse  $F_{\text{opt}}$  darf man natürlich die Unsicherheit, die den beiden einflussreichen Größen  $k$  und  $x$  in Gleichung (25) anhaftet, nicht übersehen.

Es wurde oben erwähnt, dass alle  $W_1/W_2$ -Linien des  $\phi$ -Diagrammes in den Nullpunkt mit dem Neigungskoeffizienten 1 einmünden. Deswegen können diese Linien überhaupt nur von solchen  $\zeta kF_0/W_1$ -Geraden geschnitten werden, deren Neigung kleiner als 1 ist, d. h. für welche

$$(27) \quad \zeta < 1$$

Folgerung: Eine Anwendung des in Aussicht genommenen Austauschertyps ist überhaupt nur dann wirtschaftlich zu vertreten, wenn nach den Gleichungen (25) und (27)

$$(28) \quad (t_1' - t_2') > \frac{\frac{a}{8760 x} x_f + x_b}{k x_b} \quad \begin{array}{l} \text{(Voraussetzung für} \\ \text{die Anwendungsberechtigung)} \end{array}$$

ist, d. h. wenn der verfügbare Temperaturunterschied  $(t_1' - t_2')$  der eintretenden Ströme den durch Gleichung (28) gegebenen Mindestbetrag wesentlich überschreitet. Dieser Betrag ist sowohl von den Eigenschaften des fraglichen Austauschers ( $x_f$ ,  $x_b$ ,  $k$ ) als auch von aufgezwungenen Außenbedingungen ( $x$ ,  $x_q$ ) abhängig. Man sieht jedenfalls, dass geringe Temperaturdifferenzen auch hier die Durchführung der Wärmewirtschaft erschweren.

In Bild 8 ist  $\omega_{\max}$  als ein Mass für die Jahresersparnisse  $B$  über der Kostenverhältniszahl  $\zeta$  für drei Austauschertypen bei  $W_1/W_2 = 1$  aufgetragen. Für ein gegebenes  $\zeta$  ist der Gegenstromapparat allen anderen Ausführungen überlegen. Da jedoch z.B. beim Kreuzstrom-Apparat gewöhnlich bessere  $k$ -Werte und damit nach Gleichung (25) kleinere  $\zeta$ -Werte zu erzielen sind als beim Gegenstrom, so kann es gut vorkommen, dass der Kreuzstromapparat wirtschaftlicher wird.

Für andersgeartete Aufgaben können auch andere Ueberlegungen wirtschaftlicher Art massgebend sein, und die obigen Darlegungen sind nicht zu verallgemeinern. (Schluss folgt)

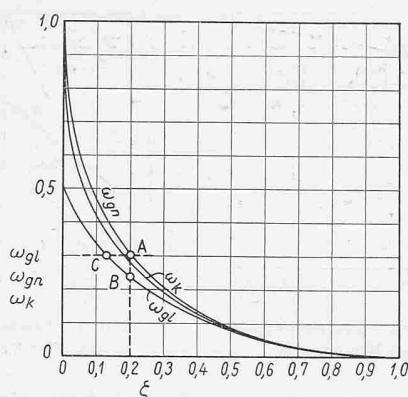


Bild 8. Wirtschaftlichkeitsskennzahl  $\omega_{\max}$  für Gleichstrom, Gegenstrom und reinen Kreuzstrom, in Abhängigkeit von der Kostenverhältniszahl  $\zeta$ , für  $W_1/W_2 = 1$

## Die elektrolytische Herstellung von Wasserstoff

DK 661.931

Wasserstoff ist in zahlreichen Industrien ein wichtiger Rohstoff. Seine Hauptverwendung findet er in der Stickstoffindustrie, wo aus ihm und Luftstickstoff Ammoniak hergestellt wird, das man weiter zu Salpetersäure, Ammoniumverbindungen, Kunstdünger, Sprengstoffen und zahlreichen Kunststoffen verarbeitet. Auch in anderen Zweigen der chemischen Industrie besteht eine grosse Nachfrage nach reinem und billigem Wasserstoff. In der Fetthärtungsindustrie dient er zur Veredlung von organischen Oelen und zur Herstellung hochwertiger Industrie- und Speisefette. In der Metallurgie findet er zu Reduktionszwecken und als Schutzgas bei der Wärmebehandlung von Spezialstählen Verwendung. Die synthetische Herstellung von flüssigen Motortriebstoffen, zu der Wasserstoff benötigt wird, erwies sich während des Krieges als sehr wertvoll, und es ist zu erwarten, dass die Herstellungskosten mit weiterer Verbesserung der Verfahren auf ein wirtschaftlich tragbares Mass gesenkt werden können. Im Zusammenhang damit dürfte es möglich sein, billige Kohlenwasserstoff-Verbindungen synthetisch herzustellen.

Elektrolytisch hergestellter Wasserstoff ist sehr rein. Der Energiebedarf ist jedoch mit 4,5 bis 5,5 kWh pro nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> verhältnismässig hoch. Daher kommt die hydroelektrische Wasserstoffherstellung nur dort in Frage, wo billige hydroelektrische Energie verfügbar ist.

Die Energie muss in Form von Gleichstrom niedriger Spannung zugeführt werden. Nach dem Faradayschen Gesetz sind pro nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> 2400 Ah (genau 2390 Ah) erforderlich. Bei einer oberen Verbrennungswärme des Wasserstoffes von 3050 kcal/nm<sup>3</sup> ergibt sich aus der Energiebilanz die benötigte Spannung theoretisch zu 1,48 V. Praktisch stellt sich erst bei etwa 1,6 bis 1,7 V Gasbildung ein. Die Ueberspannung ist vom Elektrodenmaterial, vom Elektrolyten, von dessen Temperatur sowie von der Formgebung und der Ausbildung der Elektroden abhängig. Hierzu kommt ferner der Ohmsche Spannungsabfall in den Elektroden und im Elektrolyten.

Nach einer Beschreibung im «Bulletin Oerlikon» vom Jan./Feb. 1951 hat die Maschinenfabrik Oerlikon bereits in den Jahren 1902 bis 1920 mehr als 400 Elektrolyseure auf den Markt gebracht, die wesentliche Merkmale der heute von dieser Firma gebauten Bipolar-Konstruktion aufweisen. Um kleine Spannungsabfälle zu erhalten, müssen die Elektrodenflächen so nahe wie möglich aneinander gebracht werden. Dabei ist aber zugleich dafür zu sorgen, dass der Elektrolyt unbehindert zur aktiven Oberfläche treten kann und dass die gebildeten Gase ebenfalls unbehindert abströmen können. Damit sich die Gase nicht miteinander vermengen, werden die Elektroden durch ein Diaphragma, das heute meist aus hochwertigem Asbestgewebe besteht, voneinander getrennt. Als Elektrolyt wird meist eine KOH-Lösung von 24% verwendet.

Die von der Maschinenfabrik Oerlikon entwickelten Elek-

troyseure gleichen in ihrem Aufbau Filterpresszellen. Sie ergeben geringen Raumbedarf bei guter Ausnutzung der Materialien, stellen aber an die Herstellung höhere Ansprüche.

Die einzelnen Platten, die die Elektroden bilden, werden unter Zwischenschaltung von isolierenden Dichtungen und den erwähnten Diaphragmen aneinandergereiht und durch kräftige Zuganker zusammengehalten. Der Elektrolyt gelangt aus einem hochliegenden Behälter durch Längskanäle von unten in die Zellen hinein, während die Gase durch im oberen Teil der Platten vorgesehene Längskanäle abströmen.

Ungefähr im Jahre 1935 griff Oerlikon den während etwa 15 Jahren nicht mehr gepflegten Bau von Elektrolyseuren wieder auf und entwickelte Apparate ohne längsgehende Gaskanäle, die gegenüber den früheren Konstruktionen in bezug auf Herstellung, Montage und Betriebseigenschaften eine Reihe von Vorteilen aufweisen. Jede einzelne Zelle erhält den Elektrolyten durch eine besondere Zuführleitung, die unten eintritt, während Wasserstoff und Sauerstoff aus jeder Zelle oben austreten und in getrennten Leitungen nach den auf deren Längsseiten angeordneten Sammlern überströmen.

Diese Apparate werden heute praktisch in jeder Grösse von 1 bis 500 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/h hergestellt. Sie weisen eine Umwälzpumpe für die Laugenzirkulation auf, sowie grossdimensionierte, im Betrieb leicht zu reinigende Filter für den Elektrolyten. Die Reinheit des erzeugten Wasserstoffes erreicht durchwegs 99,8 bis 100%, während die Sauerstoffreinheit etwa 99,6 bis 99,8% beträgt. Die Zellenspannung liegt zwischen 2,1 und 2,3 V.

Zur Energiedienstversorgung von grossen Wasserstoff-Elektrolyse-Anlagen dient heute fast durchwegs der Quecksilberdampf-Gleichrichter. Die Maschinenfabrik Oerlikon hat seit Jahren mit Erfolg eine besondere Einanodenbauart angewendet, mit welcher Stromstärken von 8000 bis 10 000 A geliefert werden können. In der Regel werden Einheiten von 5000 kW, bestehend aus einer 12-Anoden-Gleichrichtergruppe für 8000 A, 625 V und zwei Elektrolyseuren in Serie für je 2500 kW, als wirtschaftlichste Lösung empfohlen. Bei kleinen und mittleren Anlagen ergeben Umformergruppen geringeren Platzbedarf und geringere Betriebskosten.

Die Entwicklungstendenzen gehen wie auf andern Gebieten in der Richtung einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Dies ist möglich, einerseits durch Senkung der Gewichte und andererseits durch Verringerung der Zellenspannungen. Der jährliche Energieaufwand für die Wasserstoff-Elektrolyse in der Schweiz beträgt rund 300 Mio kWh. Man erkennt, welche Bedeutung einer Verringerung dieses Bedarfs um nur etwa 10% zukommt.

## Die überschlägliche Bemessung der Wasserkraftzentralen

DK 621.311.21

Bei der Ausarbeitung von Vorprojekten und Kostenschätzungen für Wasserkraftanlagen ist die Dimensionierung des Maschinenhauses bzw. der Maschinenkaverne besonders bei mittleren und kleinen Gefällen, vorab also bei Niederdruckwerken, von Bedeutung. Die Hauptabmessungen der dabei in Frage kommenden Francis- oder Kaplan-turbinen mit ihren Einlaufspiralen und Saugkrümmern sind für die Dimensionen der ganzen Anlage massgebend. Nun ist allerdings die Berechnung der Maschinen und der Wasserzu- und -abläufe, wie sie der Hydrauliker durchführen muss, eine zeitraubende Arbeit. Es ist deshalb erwünscht, für die eingangs erwähnten Zwecke über eine Näherungsmethode zu verfügen, die im Einzelfall natürlich nur Anspruch auf eine angemessene Genauigkeit erheben kann.

In den Heften Nr. 2 und Nr. 3 vom 15. Januar und 1. Februar 1951 von «Le Génie Civil» wird ein solches Verfahren ausführlich beschrieben, mit dem sich die betreffenden Angaben (Mittelwerte aus einer sehr grossen Zahl ausgeführter Kraftwerke gefunden) bestimmen lassen. Ausgehend vom verfügbaren Gefälle, der Schluckfähigkeit der Turbine und deren Leistung werden zunächst die spezifische Drehzahl, die Drehzahl und der Laufraddurchmesser ermittelt. Als Funktion des Letztgenannten ergeben sich die Dimensionen der Einlaufspirale und des Saugkrümmers, sowie der erforderliche Axabstand bei mehreren Gruppen. Auch die