

Schlüsselwörter: Absorptionskältemaschine · charakteristische Gleichung · effektive Wärmeübertragung · Monitoring · Parameteridentifikation

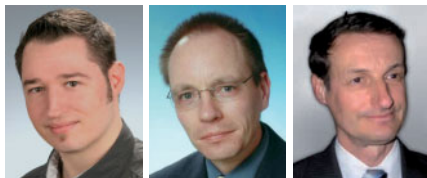
Dieser Artikel zeigt einen Weg, wie man die charakteristische Gleichung für Absorptionskältemaschinen zur Parameteridentifikation nutzen kann. Am Beispiel einer konkreten Kältemaschine der Zentralen Kälteversorgung Chemnitz wird die Ermittlung spezieller Parameter für die charakteristische Gleichung erläutert. Dabei spielt die lineare Regression von vorhandenen Betriebsdaten (Monitoring) der externen Kreisläufe eine entscheidende Rolle. Anschließend folgt eine Herleitung des effektiven Wärmeübertragungsvermögens für die vier Hauptwärmeübertrager der einstufigen H₂O-LiBr-Absorptionskältemaschine.

Determination of parameters by means of characteristic equation

Keywords: Absorption chiller · characteristic equation · effective heat transfer · monitoring · parameter identification

This article shows a way, how the characteristic equation for absorption chillers can be used for parameter identification. The evaluation of special parameters will be explicated by the example of a concrete chiller of the Central cold water supply of Utility Chemnitz. In the algorithm the linear regression analysis of operating data (monitoring) of external circuits plays an important role. Afterwards a derivation of the effective heat transfer coefficient of the four main heat exchangers concerning the single effect H₂O-LiBr-Absorption chiller follows.

Autoren



Dipl.-Ing. Falk Neumann (links),
Dr.-Ing. Thorsten Urbaneck (Mitte),
Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Platzer (rechts),
TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau



Dipl.-Ing. Ulf Uhlig (links), Dipl.-Ing.
Thomas Göschel (rechts), eins energie
in sachsen GmbH & Co. KG, Chemnitz

Parameterbestimmung mit der charakteristischen Gleichung

1 Einleitung

Bei der Untersuchung von Absorptionskältemaschinen (AbKM) steht man vor den verschiedensten Herausforderungen. Unter anderem tritt folgendes Problem auf. Zur Nachrechnung fehlen oft wichtige Parameter (z. B. Kennwerte der Wärmeübertrager). Diese benötigt man für Simulationen oder zur Funktionskontrolle. Weil die Auslegungswerte in der Regel schwer zu beschaffen sind bzw. weil die realen Betriebsparameter nicht ohne weiteres bestimmbar sind, soll in diesem Artikel ein Weg aufgezeigt werden, wie man die charakteristische Gleichung (siehe unten) zur Parameteridentifikation einsetzen kann.

Die zentrale Kälteversorgung in Chemnitz setzt für die Kälteerzeugung neben Kompressions- auch einstufige H₂O-LiBr-Absorptionskältemaschinen ein [1]. Dieses Fernkältesystem wurde 2007 mit einem oberirdischen Kaltwasserspeicher (Tank) erweitert. Ein dazugehöriges Monitoringprogramm

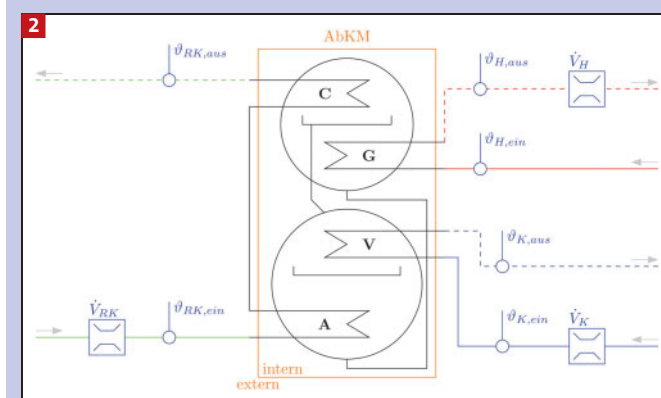
Nennkälteleistung	1800 kW
COP	0,65
Kältemittel	H ₂ O
Lösungsmittel	LiBr
Kaltwassertemp.	13/5 °C
Kühlwassertemp.	27/37 °C
Heißwassertemp.	120/100 °C

Tabelle 1: Auslegungsdaten der H₂O-LiBr-Absorptionskältemaschine der Firma Carrier

[1] lieferte die Betriebsdaten der Absorptionskältemaschinen (Abb. 1, Tab. 1). Das Monitoring ermöglichte ebenfalls eine detaillierte Analyse des Betriebsverhaltens der Kältemaschinen (z. B. COP-Verhalten bei verschiedenen Betriebsituationen) [2, 3, 4]. Dabei konnte die Messtechnik nur im Kaltwasser-, Kühlwasser- und Heißwasserkreislauf eingebaut werden (Abb. 2). Für



1 Einstufige H₂O-LiBr-Absorptionskältemaschine der Firma Carrier Typ 16 JH 065 (vgl. mit Tab. 1), Zentrale Kälteversorgung Chemnitz



2 Stark vereinfachtes Schalt-schema einer AbKM, Kaltwasser-, Kühlwasser- und Heißwasseranschlüsse inklusive Messtechnik



KI Kälte · Luft ·
Klimatechnik
INGENIEURWISSEN IN FORSCHUNG UND PRAXIS



Entdecken Sie weitere interessante
Artikel und News zum Thema auf
ki-portal.de!

Hier klicken & informieren!



die Datenanalyse und -auswertung ist zudem eine Filterung für stationäre Betriebszustände (wegen der Speicherwirkung der Absorptionskältemaschine) notwendig.

2 Grundlagen der charakteristischen Gleichung

Zur Beschreibung des Betriebsverhaltens von Absorptionskältemaschinen wurde in [5] und [6] die Methode der charakteristischen Gleichung vorgestellt. Die Gerade der charakteristischen Gleichung (Abb. 3) stellt die Verdampferleistung \dot{Q}_V als Funktion einer charakteristischen Temperaturdifferenz $\Delta\Delta\vartheta$ dar:

$$\dot{Q}_V = s_V \cdot (\Delta\Delta\vartheta - \Delta\Delta\vartheta_{\min,V}). \quad (1)$$

Mit dem Steigungsfaktor

$$s_V = \left[\frac{G_V}{(kA)_{G,\text{eff}}} + \frac{A_V}{(kA)_{A,\text{eff}}} + B \cdot \left(\frac{C_V}{(kA)_{C,\text{eff}}} + \frac{1}{(kA)_{V,\text{eff}}} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

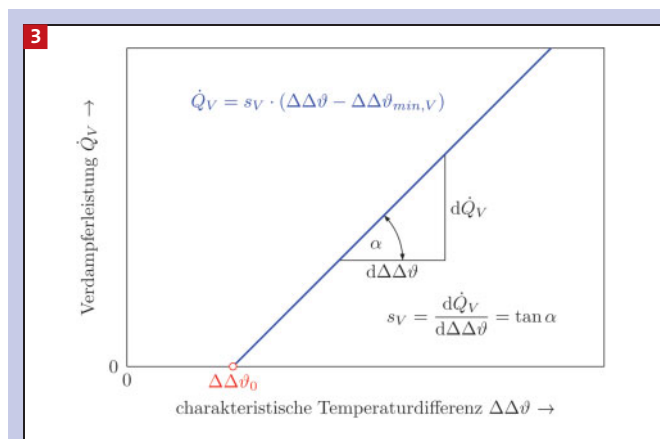
werden die Enthalpiekoeffizienten (G_V , A_V , C_V) und das Wärmeübertragungsvermögen ($(kA)_{i,\text{eff}}$ mit $i = V, A, C, G$) für die vier Hauptwärmübertrager Verdampfer, Absorber, Kondensator und Generator berücksichtigt. Der enthaltene Dühring-Faktor B dient der Beschreibung des Lösungsfeldes (z.B. Wasser-Lithiumbromid) nach dem in [7] eingeführten Gesetz der korrespondierenden Siedetemperaturen. Es besagt, dass die Temperaturdifferenzen zweier Substanzen (z.B. gleiche Lösung mit unterschiedlichen Konzentrationen) ausgehend von deren Siedepunkten bei einem gemeinsamen Druck zu den Siedepunkten bei einem gemeinsamen anderen Druck in einem gleichbleibenden Verhältnis zueinander stehen. Dies gilt ebenso für die Taupunkte der korrespondierenden Stoffe. Ein weiterer Bestandteil der Gl. 1 ist der Verlustparameter

$$\Delta\Delta\vartheta_{\min,V} = \left(\frac{\dot{Q}_{G,x}}{(kA)_{G,\text{eff}}} + \frac{\dot{Q}_{A,x}}{(kA)_{A,\text{eff}}} \right), \quad (3)$$

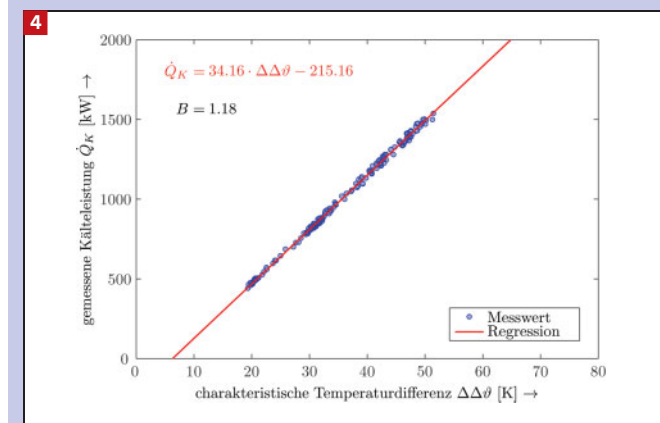
in welchen die Verlustleistungen (Wärmetönung, Lösungsmittel-Wärmeübertrager) eingehen. Während s_V und $\Delta\Delta\vartheta_{\min,V}$ Konstanten sind, stellt die charakteristische Temperaturdifferenz $\Delta\Delta\vartheta$ eine variable Größe (das Argument) der charakteristischen Gleichung dar. Sie wird aus den externen mittleren Temperaturen auf der Kaltwasser-, der Kühlwasser- und der Heißwasserseite mit

$$\Delta\Delta\vartheta = (\bar{\vartheta}_H - \bar{\vartheta}_{RK,A}) - (\bar{\vartheta}_{RK,C} - \bar{\vartheta}_K) \cdot B \quad (4)$$

gebildet.



3 Schematische Darstellung der charakteristischen Gleichung



4 Lineare Regression, gemessene Kälteleistung als Funktion der charakteristischen Temperaturdifferenz

3 Parameterermittlung mit linearer Regression

Die beiden charakteristischen Parameter für Steigung und Verluste (s_V , $\Delta\Delta\vartheta_{\min,V}$) lassen sich mit Hilfe der linearen Regression aus vorhandenen Messdaten ermitteln. Dabei wird zunächst für jeden Messdatensatz¹ die charakteristische Temperaturdifferenz $\Delta\Delta\vartheta$ nach Gl. 4 aus den externen Temperaturen von Kalt-, Kühl- und Heißwasser berechnet. Der dafür benötigte Dühring-Faktor $B = 1,18$ ergibt sich aus

$$B(\xi_m) = \frac{\bar{\vartheta}_{G,\text{Ref}}(\xi_m) - \bar{\vartheta}_{A,\text{Ref}}(\xi_m)}{\bar{\vartheta}_{C,\text{Ref}} - \bar{\vartheta}_{V,\text{Ref}}} \quad (5)$$

unter Verwendung der mittleren internen Temperaturen (Tab. 2), wobei für $\bar{\vartheta}_{G,\text{Ref}}$ und $\bar{\vartheta}_{A,\text{Ref}}$ eine Abhängigkeit zum angenommenen mittleren Massenanteil $\xi_m = 0,383$ besteht (aus [8, 9, 10]). Abb. 4 zeigt die auf der Kaltwasserseite gemessene Kälteleistung \dot{Q}_K in Abhängigkeit der charakteristischen Temperaturdifferenz $\Delta\Delta\vartheta$. Die eingezeichnete Regressionsgerade und ihre zugehörige Gleichung

$$\dot{Q}_K = 34,16 \cdot \Delta\Delta\vartheta - 215,16 \quad (6)$$

1 Ein Messdatensatz beinhaltet alle Messwerte der Zentralen Kälteversorgung (Monitoring) für ein bestimmtes Zeitintervall.

Temperatur	Wert
$\bar{\vartheta}_{K,\text{Ref}}$	9,0 °C
$\bar{\vartheta}_{RK,A,\text{Ref}}$	28,9 °C
$\bar{\vartheta}_{RK,C,\text{Ref}}$	33,9 °C
$\bar{\vartheta}_{H,\text{Ref}}$	110,0 °C
$\bar{\vartheta}_{V,\text{Ref}}$	3,0 °C
$\bar{\vartheta}_{A,\text{Ref}}$	45,5 °C
$\bar{\vartheta}_{C,\text{Ref}}$	43,0 °C
$\bar{\vartheta}_{G,\text{Ref}}$	92,9 °C

Tabelle 2: Mittlere Referenztemperaturen der Absorptionskältemaschine für den Betrieb nach Tab. 1

hat die Form $y = r_1 \cdot x - r_2$. Wird der Koeffizient r_1 ausgeklammert, erhält man den gebräuchlichen Ausdruck der charakteristischen Gleichung. Wenn diese Regressionsgerade der charakteristischen Geraden entspricht, also

$$\begin{aligned} \dot{Q}_K &= r_1 \cdot \left(x - \frac{r_2}{r_1} \right) \hat{=} \dot{Q}_V \\ &= s_V \cdot (\Delta\Delta\vartheta - \Delta\Delta\vartheta_{\min,V}) \end{aligned} \quad (7)$$

gilt, dann lassen sich die gesuchten charakteristischen Parameter aus den, auf diese Weise bestimmten, Regressionskoeffizienten mit dem Ansatz

$$s_{V,reg} = r_1 = 34,16 \text{ kW/K}, \quad (8)$$

$$\Delta\Delta\vartheta_{\min,V,reg} = \frac{r_2}{r_1} = -6,30 \text{ K} \quad (9)$$

ermitteln.

4 Effektives Wärmeübertragungsvermögen

Bei der Herleitung der effektiv wirkenden Kennwerte $(kA)_{\text{eff}}$ wird nun der Ansatz

$$s_{V,reg} = \frac{1}{\frac{C_V}{(kA)_{G,eff}} + \frac{A_V}{(kA)_{A,eff}} + \frac{C_V \cdot B}{(kA)_{C,eff}} + \frac{B}{(kA)_{V,eff}}}, \quad (10)$$

$$\Delta\Delta\vartheta_{\min,V,reg} = \frac{\dot{Q}_{G,x}}{kA_{G,eff}} + \frac{\dot{Q}_{A,x}}{kA_{A,eff}}, \quad (11)$$

$$(kA)_{C,eff} = \frac{\dot{Q}_V \cdot C_V}{(\vartheta_{C,Ref} - \vartheta_{RK,C,Ref})}, \quad (12)$$

$$(kA)_{V,eff} = \frac{\dot{Q}_V}{(\vartheta_{K,Ref} - \vartheta_{V,Ref})}, \quad (13)$$

verfolgt, wobei man für \dot{Q}_V die Gl. 6 (Regressionsgleichung) verwendet. Demnach bildet man die Kälteleistung durch folgenden Ausdruck:

$$\dot{Q}_V = s_{V,reg} \cdot (\Delta\Delta\vartheta_{Ref} - \Delta\Delta\vartheta_{\min,V,reg}) \quad (14)$$

und setzt diesen in die Gln. 12 und 13 ein. Die benötigte charakteristische Temperaturdifferenz $\Delta\Delta\vartheta_{Ref}$ kann man mit Hilfe des oben festgelegten Dühring-Faktors aus Gl. 5 unter Verwendung der mittleren externen Referenztemperaturen (Tab. 2) mit

$$\Delta\Delta\vartheta_{Ref} = (\vartheta_{H,Ref} - \vartheta_{RK,A,Ref}) - (\vartheta_{RK,C,Ref} - \vartheta_{K,Ref}) \cdot B = 51,66 \text{ K} \quad (15)$$

berechnen. Aus den vier Gln. 10 bis 13 lässt sich durch gezieltes Sortieren der Terme und Substitution der unbekanntenen Größen mit

$$u_i = \frac{1}{(kA)_{i,eff}} \quad (16)$$

folgendes lineares Gleichungssystem aufstellen:

$$\begin{bmatrix} C_V & A_V & C_V \cdot B & B \\ \dot{Q}_{G,x} & \dot{Q}_{A,x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_G \\ u_A \\ u_C \\ u_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s_{V,reg}} \\ \Delta\Delta\vartheta_{\min,V,reg} \\ \frac{(\vartheta_C - \vartheta_{RK,C})_{Ref}}{s_{V,reg} \cdot (\Delta\Delta\vartheta_{Ref} - \Delta\Delta\vartheta_{\min,V,reg})} \\ \frac{(\vartheta_K - \vartheta_V)_{Ref}}{s_{V,reg} \cdot (\Delta\Delta\vartheta_{Ref} - \Delta\Delta\vartheta_{\min,V,reg})} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Die Enthalpiekoeffizienten können dabei mit $C_V = 1,04$, $A_V = 1,00$, und $C_V = 1,07$

	Verdampfer	Kondensator	Absorber	Generator	
i	V	C	A	G	Einheit
$(kA)_{i,eff}$	258,3	182,7	275,8	73,4	[kW/K]

Tabelle 3: Berechnete, effektive Wärmeübertragungsvermögen für die Absorptionskältemaschine nach Tab. 1

(etwa um den Wert 1) angenommen werden. Die Verlustleistungen $\dot{Q}_{G,x}$ und $\dot{Q}_{A,x}$ betragen bei einem COP von 0,65 maximal 630 kW, wobei

$$\dot{Q}_{G,x} \approx -\dot{Q}_{A,x} \quad (18)$$

gilt. Die durch lineare Regression von vorhandenen Messdaten bestimmten charakteristischen Parameter aus den Gln. 8 und 9 sind entsprechend anzuwenden. Durch Auflösung des Gleichungssystems erhält man zunächst Ergebnisse für die Unbekannte u_i , aus welchen sich mittels Rücksubstitution von Gl. 16 die effektiven Wärmeübertragungsvermögen $(kA)_{i,eff}$ ($i = V, A, C, G$) berechnen (Tab. 3) lassen. Mit diesen Apparate-Kennwerten nach dem Ansatz

$$(kA)_{i,eff} = (kA)_{i,Nenn} \cdot z_i \cdot \sigma_i \quad (19)$$

sind die in [6] beschriebenen Korrekturfaktoren für die mittlere Temperaturdifferenzen und die Änderung des Wärmeübertragungsvermögens σ aufgrund variabler externer Volumenströme bereits berücksichtigt.

Abkürzungsverzeichnis lateinische Buchstaben

Symbol	Beschreibung	Einheit
A_V	Enthalpiekoeffizient für den Absorber	[-]
B	Dühring-Faktor	[-]
C_V	Enthalpiekoeffizient für den Kondensator	[-]
G_V	Enthalpiekoeffizient für den Generator	[-]
(kA)	Wärmeübertragungsvermögen	[kW/K]
\dot{Q}	Wärmeleistung	[kW]
r	Regressionskoeffizient	[-]
s_V	Steigungsparameter der charakteristischen Gleichung	[kW/K]
u	Variable	[-]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ /h]
z	Korrekturfaktor für Temperaturdifferenz	[-]

5 Zusammenfassung

Mit der Anwendung der charakteristischen Gleichung in Verbindung mit einer linearen Regression kann man die effektiv wirkenden Wärmeübertragungsvermögen an den vier Haupt-Wärmeübertragern von einstufigen Absorptionskältemaschinen ermitteln. Die Bestimmung von Steigungs- und Verlustparameter erfolgte auf Basis von vorhandenen Betriebsdaten einer Kältemaschine. Es ist außerdem notwendig, Referenzbedingungen zu definieren, um Enthalpiekoeffizienten, Dühring-Faktor sowie Verlustleistungen abschätzen zu können. Es folgen weitere Untersuchungen zum Nachweis der Praxistauglichkeit sowie zum Vergleich von zwei baugleichen Kältemaschinen bzgl. des Volumenstromeinflusses.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit unter dem Kennzeichen 0327357B/C gefördert. Besonderer Dank gilt auch dem Projektträger Jülich für die Unterstützung des Vorhabens. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

griechische Buchstaben

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\Delta\Delta\vartheta$	charakteristische Temperaturdifferenz	[K]
$\Delta\Delta\vartheta_{\min,V}$	Verlustparameter der charakteristischen Gleichung	[K]
σ	Änderung des Wärmeübertragungsvermögens	[-]
ϑ	Temperatur	[°C]
ξ_m	mittlerer Massenanteil	[-]

Abkürzungen und Indizes

Symbol	Beschreibung
A	Absorber
AbKM	Absorptionskältemaschine
aus	austretend
C	Kondensator
COP	coefficient of performance
eff	effektiv
ein	eintretend
G	Generator
H	Heißwasserseite
K	Kaltwasserseite
Nenn	Nennbedingungen, Auslegung
Ref	Referenzbedingungen
RK	Kühlwasserseite
V	Verdampfer

Literatur

- [1] Urbaneck, T.: Internetseite zum Projektvorhaben. 2005-2010 http://www-user.tu-chemnitz.de/~tur/ks2/pilotpr_ks.htm - TU Chemnitz, Stadtwerke Chemnitz AG
- [2] Urbaneck, T.; Barthel, U.; Uhlig, U.; Göschel, T.: Fernkältesystem Chemnitz, Analyse des Systembetriebs (Teil 1). Klima Kälte Aktuell. 28 (2009) 4, S. 53-55. Gütersloh: Bauverlag BV
- [3] Urbaneck, T.; Barthel, U.; Uhlig, U.; Göschel, T.: Fernkältesystem Chemnitz, Analyse des Systembetriebs (Teil 2) Klima Kälte Aktuell. 28 (2009) 5, S. 38-42 Gütersloh: Bauverlag BV
- [4] Urbaneck, T.; Platzer, B.; Schirmer, U.; Uhlig, U.; Göschel, T.; Baumgart, G.; Fiedler, G.; Zimmermann, D.; Wittchen, F.; Schönfelder, V.; Technische Universität Chemnitz, Fakultät Maschinenbau, Professur Technische Thermodynamik (Hrsg.); Stadtwerke Chemnitz AG (Hrsg.): Pilotprojekt zur Optimierung von großen Versorgungssystemen auf Basis der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mittels Kältespeicherung. Forschungsbericht (2010)
- [5] Ziegler, F.: Sorptionswärmepumpen: Beschreibung des Betriebsverhaltens durch eine charakteristische Gleichung. In: Staudt, R. (Hrsg.): Technische Sorptionsprozesse. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3, Verfahrenstechnik, Nr. 554. Düsseldorf: VDI Verlag, 1998, S. 259-279
- [6] Ziegler, F.; Albers, J.: Einfluss variabler Volumenströme auf charakteristische Gleichungen für Absorptionskälteanlagen. KI Kälte · Luft · Klimatechnik. 45 (2009) 4, S. 18-22
- [7] Dühring, E.: Neue Grundgesetze zur rationalen Physik und Chemie. Leipzig: Fues's Verlag (1878)
- [8] Dozenten der Kältetechnik an Fachhochschulen (Hrsg.): Aufgabensammlung Kältetechnik. 1. Aufl. Heidelberg: C.F. Müller Verlag (1995)
- [9] ASHRAE (Hrsg.): ASHRAE Handbook - Refrigeration SI. chapter 1 (2006)
- [10] Carrier (Hrsg.): Absorptionskältemaschinen 16J,B,JH. Firmenschrift (1999)