

Wirtschaftlichkeitsanalyse alternativer Kühlsysteme

Prozess-Simulation mit dem Güntner Efficiency Calculator GEC

Roland Handschuh, Fürstenfeldbruck

Als einziges Kriterium für die Wahl des Wärmeabfuhrsystems einer Kälteanlage wird häufig der Anschaffungspreis herangezogen. Die Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit sind aber so vielschichtig, dass trotz des niedrigen Anschaffungspreises einer Variante, die höheren Betriebskosten bereits nach kurzer Zeit überwiegen können. Um die Wirtschaftlichkeit einer Anlage beurteilen zu können, müssen deswegen möglichst alle Faktoren berücksichtigt werden, die zum Energie- und Wasserverbrauch beitragen. Mit einem neuen Berechnungsverfahren können jetzt die Elektroenergie- und Wasserverbräuche von Kälteanlagen mit verschiedenen Kühl- bzw. Wärmeabfuhrsystemen unter Berücksichtigung der klimatischen Standortbedingungen bestimmt werden.

zum Autor

Dipl.-Ing. Roland Handschuh,
Leiter Produkt- und Vertriebsmarketing,
Hans Güntner GmbH,
Fürstenfeldbruck



Kühlsysteme

Unter dem Kühlsystem verstehen wir das System, das die thermische Anbindung des Kompressionskältekreislaufs an die Umgebung realisiert. Es kann gewählt werden zwischen

- Verflüssiger
- Rückkühler
- Nasskühlturm

Die Wärmeabfuhr wird dann entsprechend der Temperaturverläufe und den dazugehörigen thermodynamischen Eigenschaften berechnet.

Beim Kühlturm wird von einem konstanten Kühlwassermassenstrom ausgegangen.

Kältemaschine

Das Programmpaket „Kältemaschine“ bietet folgende 2 prinzipiellen Möglichkeiten:

Auswahl eines typischen Leistungszahlkennfeldes

Für die Verdichtertypen

- Schraubenverdichter
- Turboverdichter
- Hubkolbenverdichter

sind typische Kennfelder hinterlegt, die die Leistungszahl des Verdichters in Abhängigkeit des Teillastverhältnisses und der Kondensationstemperatur die Leistungszahl abbilden. Die Software ermittelt so zu

jedem Zeitpunkt die entsprechende Leistungszahl ε und berechnet daraus die Verdichterleistungsaufnahme.

Mathematische Entwicklung eines Kennlinienfeldes

Durch den Auslegungspunkt und die Angabe von 2 weiteren Betriebspunkten (Verdampfungstemperatur t_o , Verflüssigungstemperatur t_c , relative Kälteleistung $\varphi_{o,rel}$) wird ein Kennfeld erzeugt, aus dem zum jeweiligen Zeitpunkt die Verdichterleistungsaufnahme ermittelt wird.

Als Vortrag anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV am 18. 11. 2005 in Würzburg gehalten.

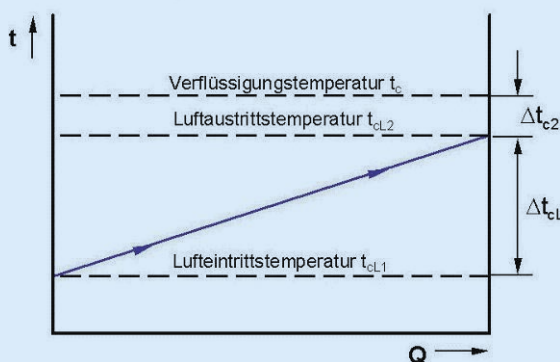


Bild 1 Temperaturverlauf bei einem Verflüssiger bei variabler Wärmemenge

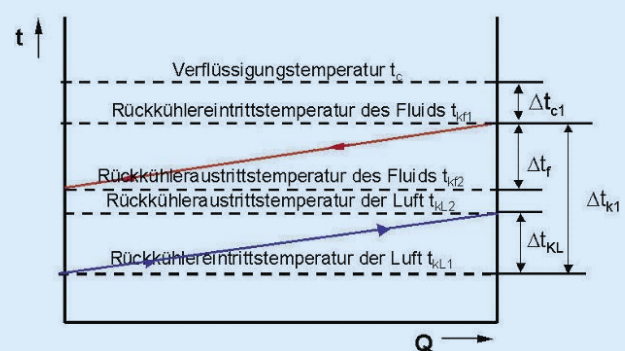


Bild 2 Temperaturverläufe bei einem Trockenrückkühler bei variabler Wärmemenge

Regelung

Unter Regelung des Kühlsystems ist hier nicht die Verdichterregelung gemeint, sondern die Regelung der Verflüssigungstemperatur über den Luftvolumenstrom durch das Wärmeaustauscherpaket. Unter „ungeregelt“ ist hier der unregelte Ventilatorlauf gemeint, wobei die Verflüssigerventilation unabhängig von der Verflüssigungstemperatur immer mit Drehzahl 100% und

Nennleistungsaufnahme laufen. Bei Eingabe einer Mindestverflüssigungstemperatur wird diese dennoch eingehalten und entsprechend des jeweiligen COP die Verdichterleistungsaufnahme berechnet, da auch in der Praxis eine Mindestverflüssigungstemperatur nicht unterschritten werden darf, um die Funktionalität der Anlage sicherzustellen. Anwählbar sind neben dem unregelmäßigen Betrieb folgende stetigen Regelungsmöglichkeiten:

- **Transformator**
- **Frequenzumformer**
- **Phasenanschnitt mit Filter**
- **Phasenanschnitt ohne Filter**
- **Frequenzumrichter mit Filter**
- **Güntner Sinus**

Betriebswirtschaftliche Faktoren

Die betriebswirtschaftlichen Faktoren sind:

- **Kapitalgebundene Kosten**
- **Betriebsgebundene Kosten**
- **Verbrauchsgebundene Kosten**

Zu den **kapitalgebundenen Kosten** gehören die Investitionskosten in die Kältemaschine und das Kühlsystem. Die Investitionskosten werden anhand des Annuitätsfaktors a in jährliche Kapitalkosten zerlegt.

$$a = \frac{q^n(q-1)}{q^n-1}$$

q =Realzinsfaktor
 n =Laufzeit in Jahren

Die **Betriebsgebundenen Kosten** setzen sich aus den Stromkosten und aus den Wasserkosten zusammen. Im Programm wird aus den Jahresleistungsverläufen

- **der Kältemaschinen**
- **der Ventilatoren und**
- **der Kühlwasserumwälzpumpen**

die Gesamtarbeit ermittelt, mit dem angegebenen Strompreis multipliziert und ebenfalls zu den Gesamtbetriebskosten hinzugerechnet.

$$W_{el} = \int P_{el} dt$$

W_{el} = elektrische Gesamtarbeit
 P_{el} = elektrische Leistungsaufnahme

$$K_{el} = W_{el} \cdot \frac{K}{AE}$$

K_{el} = Kosten für Elektroenergie
 K = Kosten
 AE = Arbeitseinheit

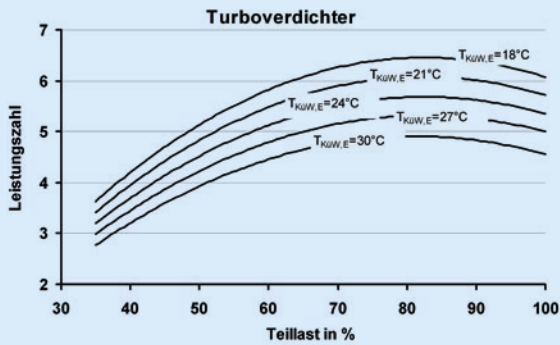


Bild 3 Standardkennfeld für einen Turboverdichter

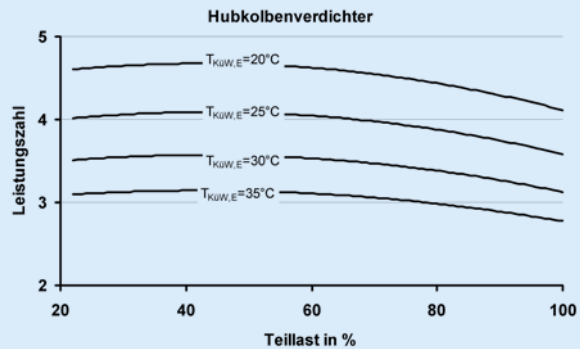


Bild 4 Standardkennfeld für einen Hubkolbenverdichter

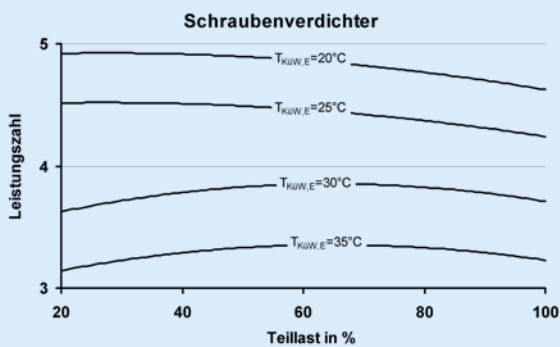


Bild 5 Standardkennfeld für den Schraubenverdichter

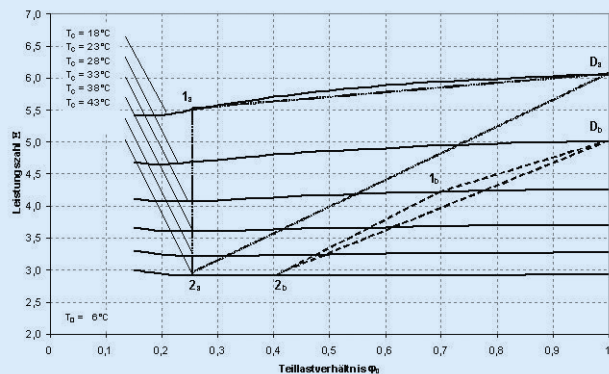


Bild 6 Generiertes, individuelles Kennfeld

Analog dazu werden bei Einsatz eines Nasskühlturns die Wasserkosten zu den jährlichen Betriebskosten addiert. Die Wartungskosten können in Form eines Faktors einbezogen werden. Die Betriebskosten erhöhen sich dann um diesen Faktor.

Im Programm werden die Jahresleistungsverläufe

- der Kältemaschinen
- der Ventilatoren und
- der Kühlwasserumwälzpumpen

zur Arbeit aufaddiert, mit dem angegebenen Strompreis multipliziert ebenfalls zu den Gesamtbetriebskosten hinzugerechnet.

Kältebedarfsprofil

Der Kältebedarf eines Gebäudes resultiert aus internen und externen Lasten, die eine Erhöhung der Temperatur und/oder Luftfeuchtigkeit nach sich ziehen. Während interne Lasten vor allem durch elektrische

Geräte und Personen bei kontinuierlicher Nutzung weitestgehend konstant sind und in vollem Umfang zeitgleich wirken, sind die externen Lasten witterungsabhängig und diesbezüglich speziell von der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Sonneneinstrahlung abhängig. Die Kühllastbedarfsrechnung soll jedoch dem Planer einer zu konzipierenden Anlage überlassen bleiben, so dass im Rahmen der Simulation eines Kältebedarfsprofils von mathematischen Funktionen ausgegangen wird, die auch im Bereich der Wärmeversorgung und der Klimatechnik mit guten Ergebnissen zur Anwendung kommen. Im Rahmen von Berechnungen ist es sinnvoll, mit dimensionslosen Variablen zu rechnen, so dass anstelle der Kälteleistung die mit der Auslegungsleistung (Design Load) normierte, zeitabhängige Kälteleistung sowie die normierte Zeit verwendet werden.

$$\varphi_o(\tau) = f(\varphi_o \text{ min}, \tau_{VL}, \tau_B)$$

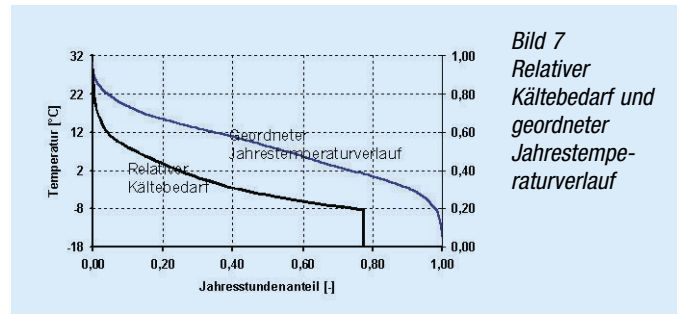
- $\varphi_o(\tau)$ = zeitabhängige, relative Kälteleistung
- $\varphi_o \text{ min}$ = relative, minimale Kälteleistung
- τ_{VL} = relative Vollaststundenzahl
- τ_B = relative Betriebsstundenzahl

Nach Eingabe von

- Betriebsstunden t_B
- Vollaststunden t_{VL}
- Relativer, minimaler Kälteleistung $\varphi_{o,min}$

generiert das Programm einen relativen Kältebedarfsverlauf. Dieser ist nicht zu verwechseln mit dem Verdichterlauf.

Bild 1 zeigt neben dem relativen Kältebedarf einen typischen Außentemperaturverlauf für einen deutschen Standort nach der Temperatur sortiert. Die Fläche des Kältebedarfs entspricht der Jahreskältearbeit.



*Bild 7
Relativer
Kältebedarf und
geordneter
Jahrestempe-
raturverlauf*

Klimatische Standortbedingungen

Die Betriebskosten einer Kälteanlage hängen entscheidend von der Verflüssigungstemperatur ab. Diese ist nicht statisch, sondern schwankt entsprechend dem Temperaturverlauf des Standortes und der Temperaturdifferenz des Wärmeaustauschers nach Auslegung:

$$\Delta t = \frac{Q_o \cdot N}{k \cdot A}$$

Hinzu kommt beim Nasskühlturm der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit. Aktuell sind der Software die Wetterdaten des Jahres 2004 für 29 deutsche Städte hinterlegt. In Arbeit ist die Hinterlegung von Wetterdaten für 3800 Standorte weltweit. Für Standorte, von denen nur wenige Messdaten zur Verfügung stehen, wird anhand der bestehenden Daten ein Temperaturverlauf generiert. Anhand der Verläufe von Trockenlufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit können unter Verwendung der Beziehungen für feuchte Luft alle weiteren notwendigen Zustandsgrößen berechnet werden.

Ausblick

In weiteren Bearbeitungsschritten werden die Wirkungsgrade der Verdichter unter Teillastbedingungen und der Einfluss der minimalen Verflüssigungstemperatur in Abhängigkeit der eingesetzten Expansionsventile untersucht. Güntner wird diese Software zum Vergleich der energetisch sinnvollen Wärmeabfuhr bei Kälte- und Klimaanlage weiter entwickeln und voraussichtlich in etwa einem Jahr dem Außendienst zur Beratung der Projektgenieure und Fachplaner zur Verfügung stellen. ■