

FREQUENZREGELUNG VON HERMETISCHEN KÄLTEMITTELPUMPEN

Sparen durch Drehzahlregelung

Am 4. Dezember 2012 ist die EU-Energieeffizienz-Richtlinie (EED) in Kraft getreten. Das Ziel der EED ist die Energieeffizienz bis 2020 um 20 Prozent zu steigern. Aktuelles Thema ist die Einsparung von Energie in industriellen Kälteanlagen unter Zugrundelegung von natürlichen Kältemitteln wie NH_3 und CO_2 . Durch Verwendung eines Frequenzumformers mit Δ_p -Regelung für die Pumpensteuerung können beispielsweise bis zu 70 Prozent der Pumpenleistung im Vergleich zum 50-Hz-Netzbetrieb eingespart werden. Roland Krämer, Ivan Perez, Gundelfingen

Großkälteanlagen werden heute bevorzugt als Pumpenanlage mit Zwangsumwälzung des Kältemittels auf der Niederdruckseite ausgeführt. Dies bringt gegenüber anderen Systemen einige Vorteile:

- Verbesserten Wärmeübergang in den Verdampfern
- Sicheres Verteilen und Regeln der Kälteleistung bei vielen, auch entfernt liegenden Verdampfern
- Konzentrierung der wichtigsten Maschineneinheiten auf einem Raum

Hermetic-Kältemittelpumpen sind mit der „ZART“-Technologie (Zero Axial and Radial Thrust) ausgestattet und bieten dem Anwender eindeutige Vorteile, z. B. einen besonders breiten Frequenzregelbereich der Pumpe. Die große Oberfläche der hydrodynamischen Gleitlager stellt den dauerhaften Betrieb bei niedriger Frequenz sicher. Die „ZART“-Technologie bewirkt einen berührungs- und verschleißfreien Lauf der Rotoreinheit.

Bild 1 zeigt eine hermetische Kältemittelpumpe zur Förderung des flüssigen Kälte-trägers. Das dünnwandige Spaltröh-



Ansicht einer CO_2 -Kältemittelpumpe

Hermetic-Pumpen

aus Edelstahl dient als hermetische Abdichtung des Pumpenaggregats nach außen und schützt die Wicklung vor Einwirkung des Kältemittels. Der Motor ist flüssigkeitsgekühlt: Ein Kühlstrom wird von der Pumpendruckseite in den Rotorraum abgezweigt und nach Aufnahme der Motorverlustwärme – durch die Hohlwelle zwischen zweitem und drittem Laufrad – in ein Gebiet höheren Drucks zurückgeführt. So lässt sich ein Verdampfen des Motorkühlstromes verhindern.

Praktische Anwendung: CO_2 -hermetische Kältemittelpumpen im Supermarkt

Immer öfter kommt CO_2 in kältetechnischen Anlagen zum Einsatz. Sie versorgen z. B. Kühltruhen in Supermärkten. Wegen der auftretenden hohen Drücke kommen hier meist nur hermetische Kältemittelpum-

pen (Druckstufe PN40 oder höher) in Frage. Im folgenden Beispiel wird der Einsatz einer Kältemittelpumpe in einem Supermarkt mit 60 Kühltruhen und einer Gesamtlänge von ca. 180 m beschrieben. Als Kältemittel dient $\text{CO}_2/\text{R744}$ mit einer Temperatur von -4°C . Die Pumpe ist ausgelegt für $12\text{ m}^3/\text{h}$ bei 26 m Förderhöhe. Aufgabe war es, die Pumpe mithilfe eines Frequenzumformers effizient und energiesparend zu regeln. Dabei soll sich die Pumpe selbstständig auf unterschiedlichen Kälteverbrauch einstellen.

Zur Auslegung der Pumpe wurde ein Rechenalgorithmus benutzt, der die Umrechnung der 50-Hz-Kennlinie auf kleinere Frequenzen erlaubt unter Zuhilfenahme der Ähnlichkeitsgesetze: $Q \sim n$, $H \sim n^2$, $P_2 \sim n^3$ sowie $\text{NPSH} \sim n^{4/3}$. Die Umrechnung bereitete kaum Probleme, schwieriger waren die Fragen zu klären:



Dr. Roland Krämer,
CTO,
Hermetic-Pumpen,
Gundelfingen



Ivan Perez,
Produktmanager,
Hermetic-Pumpen,
Gundelfingen

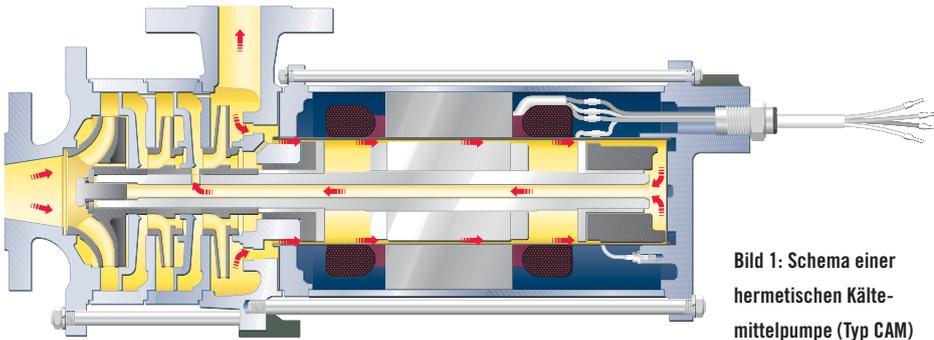


Bild 1: Schema einer hermetischen Kältemittelpumpe (Typ CAM)

- Welche Einschränkungen gibt es infolge der veränderten Wärmebilanz von Pumpe und Motor? Der Dampfdruck von CO₂ bei -4°C beträgt immerhin schon 30 bar.
- Welche Verluste hat der Motor bei geringerer Drehzahl?
- Wie sieht es mit der Tragfähigkeit der Gleitlager aus?
- Reicht die Motorleistung noch bei der maximalen Kälteleistung der Anlage?
- Welche Auswirkungen hat die Drehzahländerung auf Q_{min} und Q_{max} bzw. auf NPSH (Net Positive Suction Head), die Haltedruckhöhe?

Durch die Hinzunahme der Drehzahl als neuen Freiheitsgrad ist die Berechnung mathematisch schwieriger; das Problem wird mehrdimensional. Die Förderhöhe H ist eine zweidimensionale Funktion von Q und f, ebenso ist die Wellenleistung P₂ eine zweidimensionale Funktion von Q und f. Mithilfe des Rechenalgorithmus lassen sich die Förderhöhe H und die Wellenleistung P₂ als zweidimensionale kubische Splinefunktionen der variablen Q und f darstellen. Mit diesen Splinefunktionen ist es möglich, im Kennlinienfeld beliebig zu interpolieren. Zu vorgegebenem Q, H konnte so f berechnet werden bzw. bei Vorgabe von f, H kann Q berechnet werden.

Aus der Lagertragfähigkeitsberechnung unter Berücksichtigung der CO₂-Viskosität folgte eine Minstdrehzahl von ca. 1800 U/min entsprechend einer Mindestfrequenz von 30 Hz. Als Eingabewerte für das Berechnungsprogramm dienten die 50-Hz-Kennlinie der Pumpe, das Ersatzschaltbild des Motors und die Stoffwerte von CO₂ in Abhängigkeit von der Temperatur. Dazu kommen Vorgaben zur Geometrie, Austritt des Motorkühlstromes, Mindestsicherheit S-min gegen Verdampfen des Teilstromes und eine Mindestsicherheit SS-min = NPSHa - NPSHp (Anlage - Pumpe) gegenüber Kavitation.

Beobachtung der Motorenfrequenz

Als Ergebnis erhält man das in Bild 2 dargestellte Kennlinienfeld, das auch den Schlupf des Motors berücksichtigt. Aus der Wärmebilanzrechnung ergibt sich zunächst eine blaue Begrenzungskurve. Diese gibt die Betriebspunkte wieder, bei der die Mindestsicherheit S noch 3 m beträgt.

Für alle Punkte innerhalb der blauen Kurve ist S > 3 m. Physikalisch gesehen heißt dies, dass für alle Punkte innerhalb der blauen Grenzkurve nicht mit einer Verdampfung des Motorteilstromes zu

rechnen ist. Es zeigt sich, dass die Motorfrequenz nicht beliebig weit abgesenkt werden darf. Durch die blaue Kurve ist der Frequenzbereich nach unten auf ca. 30 Hz begrenzt. 30 Hz sind auch die untere Grenze für die Lagertragfähigkeit der Gleitlager mit CO₂.

Ein zweites Kriterium betrifft NPSHa und NPSHr. Bei kleinen Fördermengen steigt NPSHr infolge der erzeugten Wärme im ersten Laufrad wieder an. Fordert man einen Mindestsicherheitsabstand SS-min = 0,3 m zwischen NPSHa und NPSHr, so ergibt sich die rote Begrenzungskurve im Diagramm. Innerhalb der roten Kurve ist die Pumpe kavitationsfrei, außerhalb ist mit Kavitation zu rechnen. Man erkennt, dass die rote Kurve in diesem Falle den Mindestförderstrom bestimmt, der maximale Förderstrom im Kennfeld wird dagegen durch die blaue Kurve festgelegt.

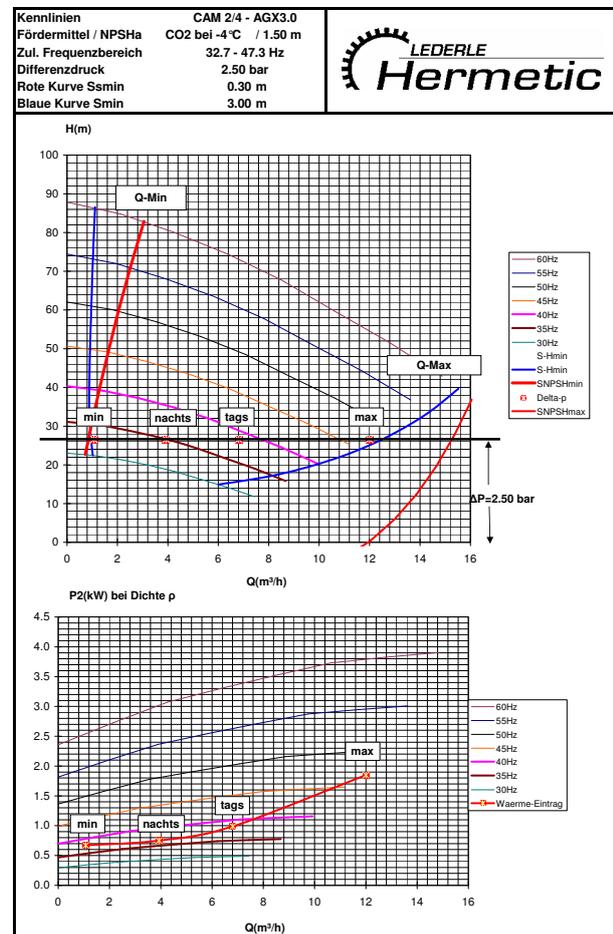


Bild 2: Kennlinien 30–60 Hz. Oben: H-Q-Kennlinien mit Begrenzungskurven zur Vermeidung der Verdampfung des Motorkühlstromes (blau), bzw. zur Vermeidung von Kavitation (rot) Unten: P-Q-Kennlinien. Ebenso gerechnete und gemessene Betriebspunkte für Q_{min} und Q_{max} sowie Betriebspunkte bei Tag- und Nachtbetrieb

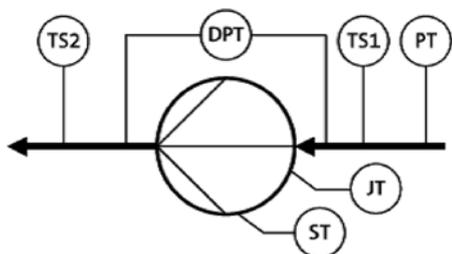


Bild 3: Differenzdruckschema: DPT Differenzdruck, TS1 Saugseitige Temperatur, TS2 Druckseitige Temperatur, PT Druck auf der Saugseite, ST Frequenz (am Umformer), JT Aufnahmeleistung (am Umformer)

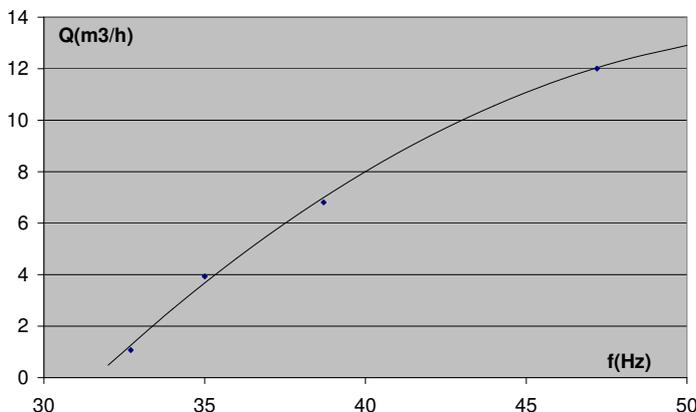


Bild 4: Abhängigkeit des Förderstroms Q (m³/h) von der Umformerfrequenz f (Hz)

Anpassung der Pumpe an die Anlage

Zweckmäßigerweise wird dazu der Differenzdruck zwischen Saug- und Druckflansch verwendet (siehe Differenzdruckschema Bild 3) als Stellgröße für den Frequenzumformer benutzt. Der Umformer regelt die Frequenz entsprechend der benötigten Fördermenge bzw. benötigten Kälteleistung so, dass der Differenzdruck über den gesamten Regelbereich konstant bleibt. Somit wird Q eine eindeutige Funktion der Frequenz. Um Energie zu sparen, muss der Differenzdruck auf einen Sollwert im unteren Bereich des Kennfeldes (Bild 2) eingestellt werden. Dort sind die Pumpenleistungen P2 im Verhältnis ~n3 kleiner. Um einen möglichst großen Regelbereich zu erlauben, sollte die Frequenz jedoch nicht zu tief bzw. zu nahe am Minimum der blauen Kurve gewählt werden. In unserem Beispiel wurde der Sollwert auf 26,6 m, entsprechend 2,5 bar Differenzdruck festgelegt. Der minimale Förderstrom ergibt sich dann als Schnittpunkt der Kurve H = 26,6 m mit der roten Kurve zu Q_{min} = 1,07 m³/h bei 32,7 Hz, der maximale Förderstrom als Schnittpunkt der Kurve H = 26,6 m mit der rechten blauen Kurve zu 12,0 m³/h bei 47,3 Hz.

65 Prozent Energieeinsparung

Die in der Anlage tatsächlich gemessenen Betriebspunkte bei Tag- und Nachtbetrieb lagen auf der Δ_p = 2,5 bar Geraden und sind ebenfalls in Bild 2 wiedergegeben. Die Betriebspunkte lagen tagsüber bei 38,7 Hz / 6,8 m³/h, nachts bei 35,0 Hz / 3,9 m³/h. Q ändert sich dabei nahezu um den Faktor 2.

Beide Betriebspunkte sind noch ausreichend von Q_{min} und Q_{max} entfernt.

Die Energieeffizienz ist offensichtlich. Die Wellenleistung nachts beträgt nur noch 0,66 kW, gegenüber 1,91 kW bei 47,2 Hz. Das bedeutet eine Energieeinsparung von 65 Prozent. Gegenüber einem 50-Hz-Netz-Betrieb, wäre die Einsparung noch größer, nämlich 70 Prozent. Der gesamte Wärme-eintrag ins System reduziert sich auf 0,75 kW bei 35 Hz, gegenüber 1,85 kW bei 47,2 Hz, eine Einsparung von 59 Prozent, im Vergleich zu 50-Hz-Netzbetrieb sogar 65 Prozent.

Obwohl die Fördermenge Q nicht direkt gemessen werden kann, lässt sie sich bei konstantem Differenzdruck einfach aus der Frequenz berechnen. Dazu bildet man eine

quadratische Regression Q gegen f für die obigen vier Betriebspunkte und erhält so den funktionalen Zusammenhang:

$$Q \text{ (m}^3\text{/h)} = -61,596 + 2,74 \times f - 0,025 \times f^2$$

Diese Gleichung gilt nur für einen Differenzdruck von 2,5 bar. Aus ihr kann der Förderstrom aus der gemessenen Frequenz berechnet werden und gegebenenfalls am Umformer direkt angezeigt oder extern abgegriffen werden. Ein störungsfreier Pumpenbetrieb ist damit für folgende Parameter und innerhalb folgender Bereichsgrenzen sichergestellt:

- Differenzdruck: 2,5 bar
- Förderstrom Q (m³/h): 1,1–12,0 m³/h
- Umformerfrequenz f (Hz): 32,7–47,2 Hz
- Pumpendrehzahl n (U/min): 1913–2674 U/min

Betriebspunkt	Min	Nachts	Tags	Max
Frequenz (Hz)	32.70	35.00	38.70	47.20
Förderstrom (m³/h)	1.07	3.93	6.81	12.00
Förderhöhe (m)	26.60	26.60	26.60	26.60
NPSH-Pumpe (m)	0.11	0.16	0.32	0.78
Druckhöhenreserve über Dampfdruck (m)	4.28	9.89	8.97	3.87
NPSH-Reserve über NPSH-Pumpe (m)	0.64	1.25	1.14	0.69
Motor Kühlstrom (m³/h)	0.92	0.92	0.92	0.92
Erwärmung Motorkühlstrom (°K)	1.53	0.94	1.03	1.58
Wirkungsgrad-Pumpe (%)	17.00	41.00	47.11	43.41
Wirkungsgrad-Motor (%)	58.70	64.65	68.40	71.42
Min. Druckhöhe am Kühlstromaustritt (m)	18.57	18.57	18.57	18.57
Zunahme der Dampfdruckhöhe (m)	14.29	8.68	9.59	14.70
Gesamterwärmung des Förderstromes (°K)	1.00	0.31	0.23	0.25
Verlustleistung (kW)	0.67	0.75	0.99	1.85
Stromaufnahme (A)	2.53	2.87	3.36	4.63
Aufnahmeleistung (kW)	0.74	1.03	1.46	2.68
Wellenleistung (kW)	0.44	0.66	1.00	1.91
Drehzahl (1/min)	1913	2031	2226	2674
Drehmoment (Nm)	2.18	3.12	4.29	6.83

Bild 5: Gerechnete Zahlenwerte für die Betriebspunkte

Unter diesen Bedingungen ist eine ausreichende Druckhöhenreserve ($S > 3$ m) gegenüber Verdampfung des Motorkühlstromes vorhanden. Ebenfalls gibt es für die Pumpe genügend NPSH-Reserve ($S > 3$ m), um Kavitation auf der Saugseite der Pumpe auszuschließen. Die Pumpendrehzahlen reichen ebenfalls aus, um die Lagertragfähigkeit der Gleitlager zu gewährleisten. Der Betriebspunkt Max entspricht dem Schnittpunkt der blauen Kurve mit der Δ_p -Geraden gemäß Bild 2 und gibt somit den Zustand maximaler Kälteleistung der Anlage wieder. Rechnerisch ergeben sich für diesen Betriebspunkt die in Tabelle 1 unter Betriebspunkt Max angegebenen Zahlenwerte. Diese entsprechen auch den Auslegungsdaten der Pumpe.

Fazit

Durch die Verwendung eines Frequenzumformers mit Δ_p -Regelung können bis zu 70 Prozent der Pumpenleistung im Vergleich zum 50-Hz-Netzbetrieb eingespart werden. Die ins Kältesystem eingetragene Wärme reduziert sich dabei ebenfalls um 65 Prozent. Dies bedeutet, dass auch die erforderliche Kühlleistung der Kompressoren dementsprechend reduziert wird. Durch die Drehzahlregelung der Pumpe, ergibt sich somit ein doppelter Nutzen. Die spezielle Ausführung und die hohe Tragfähigkeit der hydrodynamischen Gleitlager, in Kombination mit einem effizienten Axialschubausgleich der Pumpe, ermöglichen einen berührungslosen Betrieb hermetischer Kältemittelpumpen. Die mit der „ZART“-Technologie ausgestatteten Kältemittelpumpen sind prädestiniert für einen zuverlässigen und dauerhaften Betrieb mit Frequenzregelung.

Online-Auslegung für Frequenzumrichter

Die Auslegungssoftware www.hermetic-pumpen.com/de/kaeltetechnik/pumpenauslegung/ erleichtert Ihnen die Auswahl der für Sie passenden Kältemittelpumpe. Insbesondere können hiermit auch Optionen der Energieeinsparung berechnet werden. Die softwaregestützte Auslegung für frequenzgeregelten Betrieb ist komfortabel möglich. Minimale und maximale Drehzahlen sowie der passende Betriebsbereich werden ausgegeben. ■