



INITIATIVE
EnergieEffizienz⁺
Industrie & Gewerbe

Infoblätter Kältetechnik: Regelungstechnik.

Wozu regeln? + Beispiele für Regelungen in Kälteanlagen.

Wozu regeln?

Moderne Kältemaschinen sind hoch komplexe Anlagen mit einer Reihe ineinander verzahnter Regelsysteme. Regelungen erkennen Abweichungen zwischen dem vorgegebenen Sollwert und dem tatsächlichen Ist-Wert. Über ein von ihnen angesteuertes Stellglied (z.B. Ventil, Frequenzumrichter oder Ähnliches) versuchen sie, Soll- und Ist-Wert in Übereinstimmung zu bringen. Dadurch können sie äußere und innere Einflüsse („Störgrößen“) ausgleichen.

Die Grundaufgabe der Kälteanlagenregelung ist es, die Temperatur an der Kühlstelle möglichst genau in der Nähe des Sollwerts zu halten. Dies allein reicht jedoch nicht aus. Eine gute Regelungsstrategie optimiert auch die Energieeffizienz der Anlage. Auch für das störungsfreie Funktionieren und die Stabilität der Kälteanlage sind zusätzliche Regel- und Sicherheitseinrichtungen nötig. Die Regelkreise beeinflussen sich gegenseitig und müssen daher aufeinander abgestimmt sein. Die Auswirkungen eines Regelkreises werden teilweise zur Störgröße für einen anderen.

Die einzelnen Wärmeleistungen an verschiedenen Stellen der Anlage müssen ins Gleichgewicht gebracht werden.

Die entscheidende Stellgröße einer Kälteanlage ist die Kälteleistung, also die Wärmemenge, die im jeweiligen Augenblick gerade abtransportiert wird. Der Sollwert ergibt sich aus der jeweiligen Anwendung, z. B. aus dem Kältebedarf für das Einfrieren eines Lebensmittels und der geforderten Gefriereschwindigkeit oder der Kühllast einer Klimaanlage. Diese Wärmemenge muss über verschiedene Schritte abtransportiert werden. Von der Kühlstelle in den Verdampfer, von dort durch den Verdichter in den Verflüssiger, und so weiter. Es finden also an verschiedenen Stellen Wärmeübergänge und Energieumwandlungen statt. Im Idealfall stimmen Kühllast, Verdampferkälteleistung, Verdichterleistung und die Wärmeabgabe am Verflüssiger zu jedem Zeitpunkt überein. Bei indirekter Kühlung kommen noch der Wärmetransport des Kälteleiters und der Wärmeübergang von diesem auf die Kühlstelle sowie bei einer Rückkühlung des Verflüssigers noch die entsprechenden Leistungen von Kühlwasserstrom, Kühlturm, etc. und bei Wärmerückgewinnung die entnommene Heizleistung hinzu. Alle diese Größen sollten im Gleichgewicht stehen. In der Praxis begnügt man sich damit, wenn diese Leistungen wenigstens zeitlich gemittelt im Gleichgewicht stehen.

Regelungen, Steuerungen und Leitsysteme sorgen zusammen dafür, dass die Anlage optimal läuft.

Diese komplexe Regelungsaufgabe wird durch ein System aus übergeordneten Regelungen und Steuerungen, Primär- und Sekundärreglern und diversen Mess-, Schalt- und Steuergeräten bewerkstelligt, von denen hier nur einige exemplarisch vorgestellt werden können. Der wesentliche Unterschied zwischen Reglern und Steuerungen ist, dass Regler eine kontinuierliche Rückmeldung ihrer Regelgröße bekommen und daraus über einen Regelalgorithmus ständig einen Korrekturwert für ihre Stellgröße berechnen. Steuerungen hingegen berechnen ihre Ausgangssignale aus Programmen und externen Vorgaben. Sie können z.B. dafür sorgen, dass bei einer bestimmten Außentemperatur von Klimakälte auf freie Lüftung umgestellt wird, um Energie zu sparen. Steuerungen können auch veranlassen, dass die Leistung der Kältemaschine hochgefahren wird, wenn frisches Gefriergut eingelagert wird und dies schon, bevor es überhaupt zu einem Ungleichgewicht kommt. Solche Steuervorgänge beruhen auf in Programmroutinen umgesetzten Erfahrungswerten und eingehenden Signalen, wie z. B. der Information, dass neues Gefriergut eingelagert wird. Eine Rückmeldung über die Erreichung des Steuerziels gibt es oft nicht. Für die „Feinjustierung“ sind Regler zuständig. Steuerungen stehen in der Befehlshierarchie über den Reglern.

Erst die Kombination aus der Intelligenz von Steuerungen und der Genauigkeit von Reglern sorgt für die optimale Umsetzung der Ziele. In großen, industriellen Kälteanlagen gibt es hierarchisch über den Steuerungen noch Prozessleitsysteme. Diese stellen die Schnittstelle zum Bediener dar, übernehmen die wesentlichen Steueraufgaben und überwachen und protokollieren den Anlagenbetrieb. Leitsysteme bestehen aus speziellen Computern und Bedienterminals. Steuerungen können als „Speicherprogrammierbare Steuerungen“ (SPS) ausgeführt sein. In ihnen sind die Steueralgorithmen von fachkundigen Programmierern individuell hinterlegt. Die Programmierung erfolgt durch die elektronische Übertragung des Programmcodes in einen SPS-internen Festspeicher. Die Steuerung kann aber auch über vorprogrammierte digitale Bausteine (EPROMs bzw. EEPROMs) erfolgen. Sie enthalten bereits Programme für spezielle Anlagenteile und können von Kältetechnikern auch ohne Programmierkenntnisse parametrierbar werden.



Beispiele für Regelungen in Kälteanlagen.

Als generelles Regelziel einer Kältemaschine lässt sich formulieren, dass ein Gleichgewicht der verschiedenen Energieflüsse (Verdampferleistungen, Verdichterleistungen, etc.) herzustellen ist. Diese Leistungen werden aber nicht direkt gemessen. Vielmehr werden andere gut messbare und für einen stabilen Prozess wichtige Größen herangezogen, die dieses Gleichgewicht und den Einfluss von Störgrößen abbilden. Eine nahe liegende Messgröße an der Kühlstelle ist die Temperatur. Stehen Kältebedarf und Kälteerzeugung nicht im Gleichgewicht fällt oder steigt die Temperatur an der Kühlstelle. Auch an anderen Stellen werden Temperaturen zur Überprüfung des Gleichgewichts herangezogen, aber ebenso auch Drücke oder Kältemittelfüllstände. Regelungen können entweder stetig, durch eine kontinuierliche Anpassung der Stellgrößen oder unstetig durch Ein/Aus-Schalten oder durch mehrere Schaltstufen erfolgen.

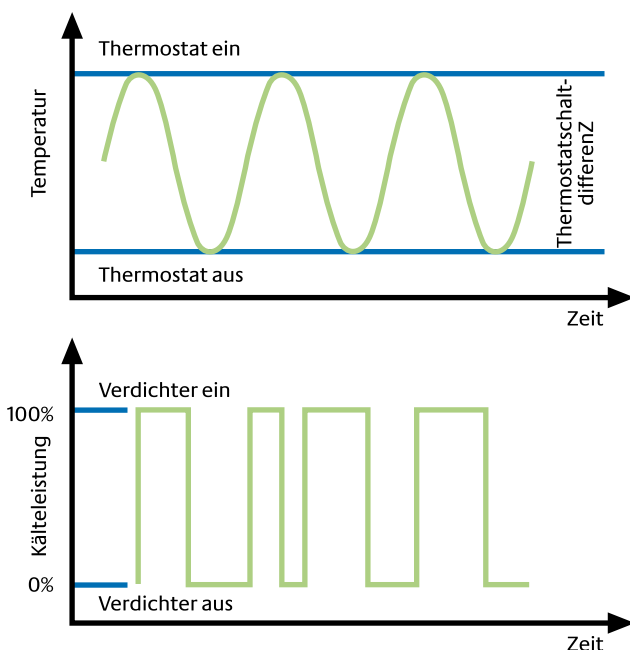
Drei wichtige übergeordnete Regelungen in Kälteanlagen sind folgende:

- Kühlstellentemperaturregelung
- Verdampferfüllungsregelung
- Verdichterleistungsregelung

Die Kühlstellenregelung sorgt dafür, dass die Temperatur stimmt.

Als Kühlstelle wird der Verdampfer mit seiner Umgebung (z. B. Kühlraum) bezeichnet. Bei einer Kühlstellentemperaturregelung wird die Temperatur des mit dem Verdampfer in Berührung stehenden Mediums geregelt. Dies kann ein Kälteträger wie z. B. Wasser oder Luft oder bei direkter Kühlung die Temperatur eines Kühlguts sein. In manchen Fällen, wie bei Kühlschränken, wird auch die Oberflächentemperatur der Kühlrauminnenwand geregelt. Dadurch soll bei Kühlschränken beispielsweise vermieden werden, dass die Regelung auf jeden Luftaustausch durch Öffnen der Tür sofort reagiert.

Abb. 1: **Thermostatische Zweipunktregelung**



Die einfachste Form einer **unstetigen Kühlstellentemperaturregelung** ist das An- und Ausschalten des Verdichters mit einem Thermostat. Diese Zweipunktregelung funktioniert aber nur bei Haushaltsgeräten und einfachen Gewerkekälteanlagen, bei denen an der Kältemaschine nur eine einzige Kühlstelle hängt. Bei Anlagen mit mehreren Kühlstellen kann die Kühlstellentemperatur jeweils gesondert mit thermostatisch gesteuerten Magnetventilen in den Verdampferleitungen geregelt werden. Um das Gleichgewicht zwischen der gesamten Verdampferleistung und der Verdichterleistung zu halten, braucht es dann noch eine unabhängige Verdichterleistungsregelung. Diese wird weiter unten vorgestellt.

Eine **stetige Kühlstellentemperaturregelung** passt die Verdampferkälteleistung ständig proportional zur Regelabweichung an. Der Betrieb kennt keinen Ausschaltzustand, abgesehen von sehr kleinen Nutzkälteleistungen, bei denen es sich aus anlagentechnischen Gründen dann doch empfiehlt, die Kälteanlage abzuschalten. Das Stellglied ist ein Regelventil in der Saugleitung des Verdampfers an der jeweiligen Kühlstelle. Es kann sich auch um einen elektronischen Verdampfungsdruckregler handeln. Hierbei ist dann die Stellgröße der Druck, welcher durch einen weiteren kleinen Regelkreis über eine Ventilstellung eingestellt wird. Der Effekt ist prinzipiell der gleiche. Da die Temperatur im Zwei-Phasen-Bereich (also bei „siedendem“ Kältemittel) direkt mit dem Druck zusammenhängt, kann auf diese Art und Weise die Temperaturdifferenz zwischen Kältemittel und Kühlstelle und damit der Wärmeübergang geregelt werden.

Eine Verdampferfüllungsregelung steigert die Energieeffizienz.

Die Verdampferfüllungsregelung hat das Ziel, die Fläche für den Wärmeübergang im Verdampfer zu maximieren. Da der Wärmetransport durch eine Wand von der Fläche und der Temperaturdifferenz abhängt, ergibt sich folgendes: Je größer die Wärmetauscherfläche, desto kleiner ist die für eine bestimmte Kühlleistung erforderliche Temperaturdifferenz zwischen Kühlstelle und Kältemittel. Benötigt man eine geringere Temperaturdifferenz, kann die Verdampfungstemperatur entsprechend höher gewählt werden. Eine höhere Verdampfungstemperatur ist im Zwei-Phasen-Bereich gleichbedeutend mit einem höheren Verdampfungsdruck, was wiederum bedeutet, dass der Kompressor weniger Verdichtungsarbeit leisten muss. Eine Verdampferfüllungsregelung sorgt also dafür, dass der benötigte Energieaufwand für eine geforderte Kühlleistung minimiert wird und optimiert somit die Energieeffizienz der Kälteanlage.

In einem Verdampfer gibt es drei Bereiche: Der erste enthält noch flüssiges Kältemittel, das auf die Verdampfungstemperatur vorgewärmt wird. Im mittleren Bereich befindet sich das Zwei-Phasen-Gebiet, in dem die Verdampfung stattfindet. Im letzten Abschnitt ist das Kältemittel schon komplett gasförmig und wird noch etwas überhitzt. Der Energiefluss ist im mittleren Bereich am intensivsten, da die Zwei-Phasen-Strömung einen sehr guten Wärmeübergang ermöglicht und das verdampfende Kältemittel besonders viel Energie (Verdampfungsenthalpie) aufnehmen kann. Eine Verdampferfüllungsregelung versucht daher, den mittleren Bereich möglichst groß und den Überhitzungsbereich eher klein



Foto: www.pixelio.de

zu halten. Um zu erkennen, wie lang die Überhitzungsstrecke ist, kann der Grad der Überhitzung als Temperaturdifferenz zwischen Zwei-Phasen-Gebiet und Verdampferausgang gemessen werden.

Abb. 2: Verdampferfüllstandsregelung



Eine moderne Methode der Füllstandsoptimierung ist die Detektion des „Minimalen stabilen Sauggastemperatursignals“ (MSS). Hier wird mikroprozessorgesteuert die Füllung so lange erhöht, bis ein Messfühler unmittelbar am Austritt aus dem Verdampfer ein instabiles Signal misst. Dieses ist ein Kennzeichen dafür, dass sich geringe unverdampfte Flüssigkeitsanteile an der Messstelle befinden. Ist dieser Punkt erreicht, wird der Füllstand so weit abgesenkt, bis die Messstelle gerade wieder stabile Werte misst. Da der optimale Betriebspunkt abhängig vom Betriebszustand ist, sucht der Mikroprozessor immer wieder während des Betriebs den sich möglicherweise ändernden Instabilitätspunkt. Das Stellglied für die Füllstandsregelung ist das Drosselorgan. Wird dieses weiter geöffnet, steigen Druck und Temperatur im Verdampfer. Der Wärmeübergang sinkt mit der Temperaturdifferenz und die Verdampfung wird langsamer. Dadurch steigt der Füllstand solange, bis der Mikroprozessor das Stopp-Signal gibt. Nun ist der Punkt erreicht, an dem der Wärmeübergang mit minimaler Temperaturdifferenz und maximaler Wärmeübertragungsfläche stattfindet.

Eine Verdichterleistungsregelung sorgt für stabilen Betrieb und reduziert den Energieverbrauch.

Bei Kälteanlagen mit mehreren unabhängig voneinander geregelten Kühlstellen ändert sich abhängig von der Zahl der jeweils in Betrieb befindlichen Kühlstellen der Gesamtkältemittelmassenstrom. Würde nun der Verdichter mit einer konstanten Leistung arbeiten, hieße dies zum einen, dass an dieser Stelle unnötig Antriebsenergie vergeudet würde. Zum anderen würde jeder Regelvorgang in einer der Kühlstellen auch eine Störung für die anderen bedeuten, weil beim Schließen eines Ventils in einem Verdampfer aus den anderen Verdampfern mehr Kältemittel abgesaugt würde. Dadurch würden der Druck und die Temperatur in den Verdampfern fallen, was einen höheren Wärmedurchgang zur Folge hätte. Sobald ein anderer Regelkreis dies in Form eines Temperaturabfalls an der Kühlstelle detektierte, müsste er ebenso ein Ventil schließen, was den Effekt für die anderen Verdampfer

noch verstärken würde. Es ist absehbar, dass dies Probleme für die Stabilität mit sich brächte. Das Ziel der Verdichterleistungsregelung ist es, diese Störeinflüsse abzuschwächen und eine annähernd gleich bleibende Verdampfungstemperatur zu erzielen. Die gebräuchlichsten Möglichkeiten hierzu sind:

- Zylinderabschaltung bei Kolbenverdichtern über integrierte Magnetventile
- Abschaltung einzelner Verdichter im Verbundbetrieb
- Schiebergesteuerte Schraubenverdichter
- Drehzahlregelung
- Heißgas-Bypassregelung

Diese Regelungsarten haben für verschiedene Anlagenkonfigurationen ihre jeweils spezifischen Vorteile. Die Abschaltung von einzelnen Verdichtern im Verbundbetrieb kann z. B. sehr vorteilhaft sein. Besonders, wenn in einem größeren Verbund die Verdichtungsleistung auf mehrere Verdichter unterschiedlicher Größe aufgeteilt wird. Dann kann mit einer modernen Druckbandregelung dafür gesorgt werden, dass die Verdichter so angesteuert werden, dass sie immer mit der maximalen Energieeffizienz laufen.

Bei der Heißgas-Bypassregelung wird komprimiertes Gas in einem Bypass um den Verdichter zurückgeführt. Dadurch lässt sich zwar auch der Kältemittelmassenstrom reduzieren, die Verdichterleistung sinkt aber kaum. So können zwar zu geringen Investitionskosten die Stabilitätsprobleme gelöst werden. Der Energieverbrauch bleibt aber unnötig hoch, so dass diese „Sparmaßnahme“ mit hohen Kosten verbunden sein kann.

Fazit:

Die optimierte Regelung von kältetechnischen Anlagen ist eine komplexe Aufgabe. Hier trennt sich die Spreu vom Weizen. Allein das Erreichen der gewünschten Zieltemperatur ist kein ausreichendes Kriterium für die Güte einer Regelstrategie. Durch moderne Steuerungen lassen sich im erheblichen Maß Betriebskosten einsparen. Dafür müssen jedoch Regelungstechnik, Anlagenkonfiguration und Betriebsbedingungen optimal aufeinander abgestimmt sein.

Tipps:

- Die Qualität einer Regelung zeigt sich nicht im Vollastfall, sondern erst im – in der Praxis wesentlich häufiger auftretenden – Teillastbetrieb. Lassen Sie sich von Ihrem Anlagenbauer Teillastwirkungsgrade und durchschnittliche Wirkungsgrade garantieren.
- Bevorzugen Sie elektronische Ventile und Regelungen gegenüber mechanischen. Investieren Sie, wenn die Größe der Anlage es erlaubt, in optimierte Steuerungen und Leittechnik.
- Investieren Sie bei der Inbetriebnahme sowie nach Umbauten an der Anlage in eine Optimierung der Regelung. Wirkliche Energieeffizienz lässt sich erst mit optimierten Reglerparametern erzielen.

Die Angebote der Initiative EnergieEffizienz.

Die Kältetechnik ist eine in Industrie und Gewerbe weit verbreitete Technologie. Dabei bestehen in diesem Bereich erhebliche Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz: meist können in den Betrieben der Stromverbrauch – und damit die Kosten – um 5 bis 50 Prozent gesenkt werden. Die meisten Effizienzmaßnahmen sind mit Amortisationszeiten von weniger als zwei Jahren und hohen Kapitalrenditen von über 20 Prozent wirtschaftlich sehr attraktiv für die Unternehmen. Die *Initiative EnergieEffizienz* will mit diesen Faktenblättern einen Beitrag zur Erschließung dieser Potenziale leisten.

Neben der Kältetechnik bestehen auch in weiteren Bereichen oft große Effizienzpotenziale in Industrie- und Gewerbebetrieben aller Branchen. Daher bietet die *Initiative EnergieEffizienz* über das Thema Kältetechnik hinaus auch in weiteren Bereichen umfassende Informationen und praxisnahe Unterstützung für Unternehmen, die Strom effizienter nutzen und Kosten einsparen möchten. Näheres zu diesen Angeboten finden Sie im Internetportal www.industrie-energieeffizienz.de.

Die *Initiative EnergieEffizienz* steht für effiziente Stromnutzung in allen Verbrauchssektoren und ist eine in dieser Form einmalige Public-Private-Partnership: Mit zielgruppenspezifischen Kampagnen und Projekten werden Endverbraucher in privaten Haushalten, in Industrie und Gewerbe sowie im Dienstleistungssektor über die Möglichkeiten des effizienten Stromeinsatzes informiert und zum energieeffizienten Handeln motiviert.

Näheres zu den Angeboten in diesen Sektoren finden Sie unter www.initiative-energieeffizienz.de.

Die *Initiative EnergieEffizienz* wird getragen von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) sowie den Unternehmen der Energiewirtschaft – EnBW Energie Baden-Württemberg AG, E.ON AG, RWE AG und Vattenfall Europe AG und wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

Eine Initiative von



Gefördert durch das



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Impressum:
Informationsblätter
Kältetechnik

Herausgeber:
Deutsche Energie-Agentur
GmbH (dena)
Energieeffizienz im
Elektrizitätsbereich
Chausseestraße 128a, 10115 Berlin

Kontakt:
Tel.: +49 (0) 30 - 72 61 65 - 600
Tel.: +49 (0) 30 - 72 61 65 - 699
E-Mail: info@dena.de

Internet:
www.industrie-energieeffizienz.de
www.dena.de