

*Zusammenspiel der elektronischen Expansionsventile mit der Leistungsregelung des Gesamtsystems*

# Kältetechnische Regelung von VRV-Systemen

Ingo Langgartner, Unterhaching

*Mit VRV-Systemen können komplexe Multisplitanlagen zur Versorgung ganzer Gebäude realisiert werden. Mit einer Außeneinheit in Modulbauweise werden heute bis zu 48 Inneneinheiten versorgt. Während durch die Leistungsregelung des bzw. der Verdichter der gesamte Kältemittelstrom der Anlage geregelt wird, wird der Kältemittelstrom und damit die Leistung der einzelnen Inneneinheiten mit Hilfe von elektronischen Expansionsventilen geregelt, die an jedem Innengerät angebracht sind. Das Energiemanagement und die innovative Regelung im Vergleich zu konventionellen Regelungen wird im Folgenden ausführlich dargestellt.*

Der japanische Hersteller DAIKIN brachte bereits im Jahre 1982 als weltweite Neuheit die erste Generation des VRV-Systems zur dezentralen Gebäude-Klimatisierung mittels eines Multi-Split-Kompressionskreislaufs auf den Markt. Seither wurde das Angebot ständig weiterentwickelt und ergänzt, so dass heute verschiedene, höchst ausgereifte Geräteserien zur Verfügung stehen.

VRV bedeutet „Variable Refrigerant Volume“, d. h. das System arbeitet mit variablen Kältemittel-Volumenströmen und kann dadurch den unterschiedlichen Teillastfällen besser gerecht werden als herkömmliche Klimatisierungssysteme mit konstanten Kältemittel Volumenströmen. Durch modernste Elektronik ist die Kompressor-einheit von 15 bis 100% leistungsregelbar. Die Energieeinsparung durch das sehr gute Teillastverhalten und der sehr geringe Wartungsaufwand führen zu niedrigen Betriebskosten.

Die leichten und kompakten Außeneinheiten können in Maschinenzeilen z. B. auf dem Dach aufgestellt werden, ein separater Maschinenraum ist nicht erforderlich. Zusammen mit dem speziell entwickelten REFNET-Rohrleitungssystem für flüssiges bzw. gasförmiges Kältemittel (maximaler Rohrdurchmesser 42 mm) besteht nur ein sehr geringer Platzbedarf sowohl an Stellfläche, als auch an Leitungsquerschnitt.

Die Steuerung der Anlage erfolgt an Fernbedienungen, die über ein zweiadriges Buskabel an die Innengeräte angeschlossen werden und alle Funktionen

einschließlich der Eigendiagnose (nach Art und Ort einer Störung) erlauben. Damit können bis zu 16 Zonen pro Außengerät individuell geregelt werden. Auch die Gruppenregelung mehrerer Innengeräte ist möglich. Für größere Gebäude können mehrere Gruppen über ein gesplittetes Zentralmodul oder Gebäude-Management-System bedient werden. Weiterhin ist eine Gebäudeleittechnik in zwei Versionen erhältlich, mit der bis zu 1024 Inneneinheiten gesteuert und verwaltet (Kostenabrechnung) werden können.

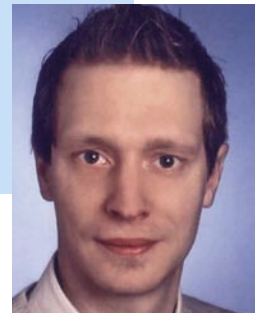
Mit den so genannten Totalwärmeaustauschern (Rekuperatoren) als Zubehör kann dezentrale Frisch-/Außenluft eingebracht werden, wobei ein weitgehender Temperatur- und Feuchtigkeitsausgleich zwischen der Raumluft und der Frisch-/Außenluft erreicht wird. Dies trägt zu einer weiteren Verringerung des Energieaufwands bei.

## Entstehung der Leistungsregelung

Von Beginn an wurde die Anzahl der anschließbaren Innengeräte immer wieder vergrößert. Am Anfang gab es lediglich eine 0%, 50% und 100% Lastregulierung. Es konnten maximal zwei bis vier Innengeräte pro Modul angeschlossen werden. Je nach Anforderung wurden Zylinderköpfe bzw. Kompressoren zu- oder weggeschaltet. Bereits bei diesen Geräten wurden elektronische Einspritzventile verwendet.

zum Autor

**Ingo Langgartner,**  
Kälteanlagenbauer/  
Elektrotechnikmeister  
MSR, Product  
Expert Network  
Solutions, Daikin,  
Unterhaching

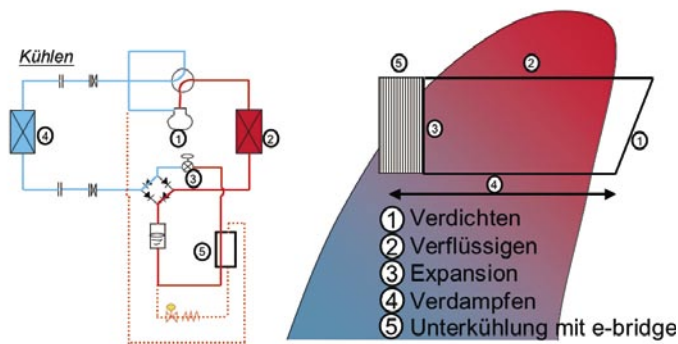


Mit der Einführung der Invertergeregelten Hubkolbenverdichter konnten dann schon bis zu acht Innengeräte angeschlossen werden. Die Bedienung der Geräte erfolgte über Fernbedienungen. Bei acht Geräten mussten natürlich die Rohrleitungslänge und die Verzweigungen erweitert werden, um eine möglichst hohe Flexibilität für die Montage und die Anwendung zu gewährleisten. Hierfür wurden eigens strömungsgeführte Abzweige bzw. T-Stücke entwickelt, um den Druckverlust so gering wie möglich zu halten. Die vertretbare Rohrleitungslänge lag damals bei 100 m.

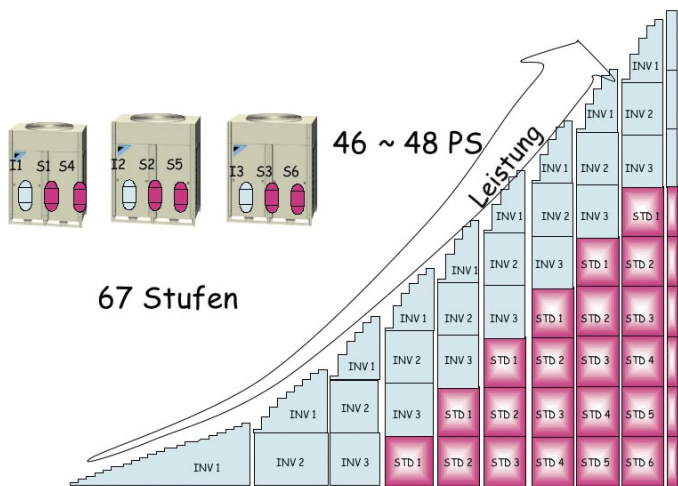
Durch die Entwicklung des Invertergeregelten Scrollverdichters und einer weiteren Optimierung der Regelung im Hinblick auf die Ölrückführung konnten dann schon bis zu 16 Innengeräte angeschlossen werden und über das bewährte System mittels Rohrleitungsabzweigen und elektronischen Einspritzventilen realisiert werden.

Bei der neuesten Entwicklung ist es nun möglich, bis zu 64 Innengeräte anzuschließen. Das bedeutet natürlich auch eine Erweiterung des Rohrleitungsnetzes, welches durch Leckagen nicht negativ auffällt, da die Regelung ein Leckererkennungssystem vorsieht. Die hohe Anzahl der Inneneinheiten wurde möglich durch die Verwendung verbesserter Kompressor-technologie.

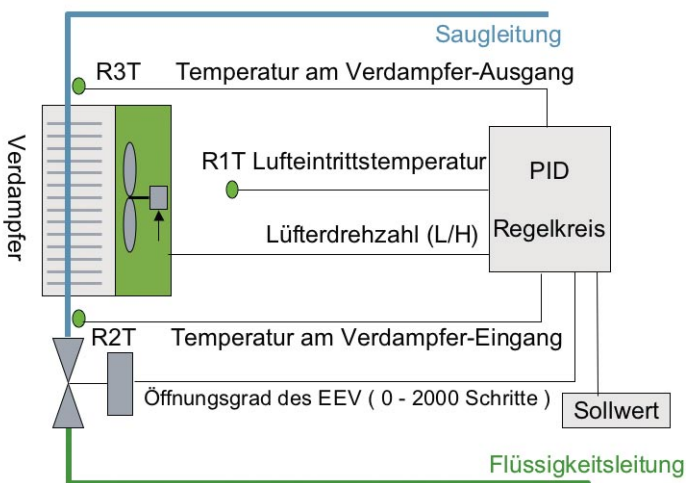
Als Vortrag gehalten anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV am 18. November 2005 in Würzburg.



Die zusätzliche Kältemittelunterkühlung (5) verhindert, dass bei großen Leitungslängen gasförmiges Kältemittel vor dem Einspritzventil ansteht.



Leistungsstufen der Verdichter



Der Regelkreis der VRV-Innengeräte

logien und die kontinuierliche Kommunikation zwischen der Außeneinheit und den Innengeräten.

### Teillastbetrieb

Eine Leistungsanpassung ist je nach interner Heiz- bzw. Kühllast immer gegeben, was zur Folge hat, dass die gesamte Anlage nur zu einem Bruchteil der Betriebszeit im Volllastbetrieb arbeiten muss. Der optimale Wirkungsgrad wird also nicht bei 100% erreicht. Da aber über das ganze Jahr

gesehen nur ein geringer Bedarf bei Volllast vorhanden ist, entwickelt das VRV-System gerade im Teillastbereich seine wirkliche Stärke. Es werden Leistungszahlen von über 6,5 erreicht.

### Energiemanagement für Kälteanlagen

Es sind verschiedene Arten der Leistungsregelung von Kältemaschinen möglich, jedoch sind nicht unbedingt alle wirtschaftlich.

### Leistungsregelungen am Kompressor

#### An-/Ausschalten des Verdichters:

Bei dieser Art der Leistungsanpassung kann man vor allem erkennen, dass eine Anpassung an die innere Last nicht möglich ist. Weiterhin entstehen Stromspitzen während der Anlaufphase.

#### Mehrere Verdichter:

Durch die Stufigkeit der Verdichter ist eine Anpassung an das Lastverhalten möglich, allerdings fallen auch hier die hohen Anlaufströme vor allem bei Lastschwankungen negativ auf (→ Übergangszeit).

#### Zylinderabschaltung:

Durch die Abschaltung der Zylinder können häufige Anlaufströme vermieden werden, da diese Funktion auch zur Anlaufentlastung verwendet werden kann. Die Einsatzgrenzen der so geregelten Verdichter werden eingengt, weil die Reibungswärme durch den verbleibenden Massenstrom abgeführt werden muss und dadurch die Verdichtungsendtemperatur steigt.<sup>1</sup>

#### Drehzahlregelung:

Die Drehzahlregelung ermöglicht eine schnelle Anpassung an die Last. Gerade bei Lastschwankungen kommt es hier nicht zu Stromspitzen, sondern zu einer Angleichung der Kälte- bzw. Heizleistung. Weiterhin kann die Stromaufnahme durch die Verringerung der Drehzahl stark gesenkt werden.<sup>1</sup>

### Leistungsregelung über den Verdampfungsdruck

#### Keine Verdampfungsdruckregelung:

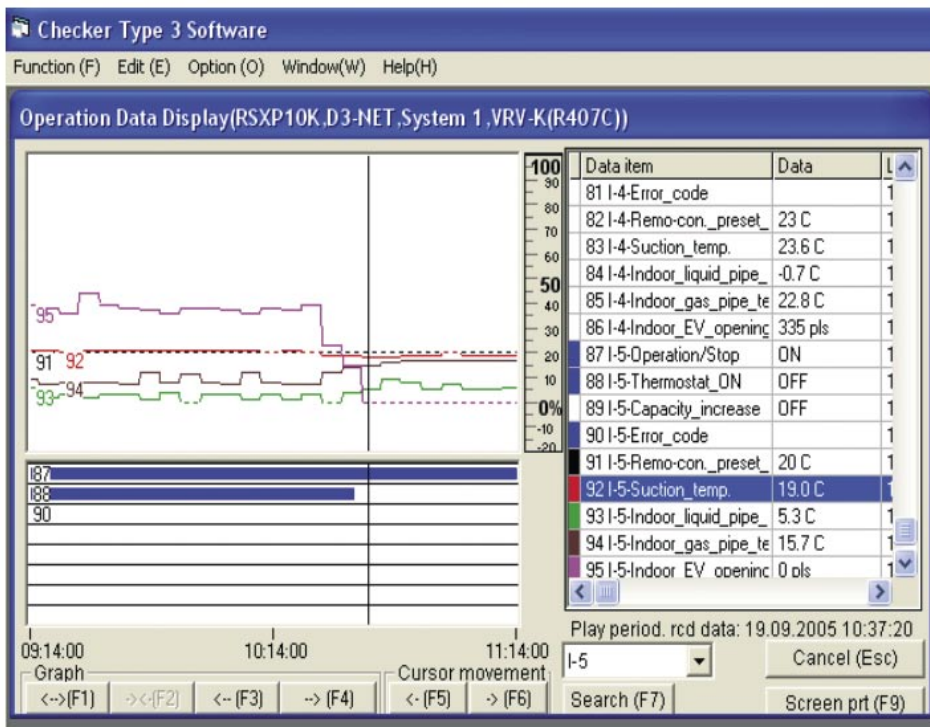
Wenn keine Verdampfungsdruckregelung vorhanden ist, darf sich die Last kaum ändern, d.h. die Anlage muss permanent unter Nominalbedingung betrieben werden. Flexibilität im Nutzerverhalten ist kaum gegeben.

#### Heißgasregelung:

Bei der Heißgasregelung läuft die Anlage permanent unter Vollast. Durch den Bypass für das Heißgas wird lediglich die Leistung während der Teillastanforderung vernichtet. Meist ist eine akkurate Einstellung im Feld nur schwer durchzuführen. Durch das Überströmen von Heißgas auf die Saugseite steigt die Verdichtungsendtemperatur. Der Regelbereich ist deshalb sehr klein.<sup>1</sup>

#### Saugdruckregelung:

Die Saugdruckregelung beruht auf der Veränderung der volumetrischen Kälteleistung. Durch die Drosselung vergrößert sich das spezifische Dampfvolumen bei konstanter Entalpiendifferenz. Bei starker Drosselung steigt die Verdichtungsendtemperatur. Dies begrenzt den Einsatzbereich



Regelverhalten eines einzelnen Innengerätes.

- 87 Innengerät eingeschaltet
- 88 Thermostat
- 91 Solltemperatur (eingestellt)
- 92 Raumtemperatur (Luftansaug)
- 93 Temperatur WT Eingang
- 94 Temperatur WT Ausgang
- 95 Öffnungsgrad Expansionsventil

der Saugdruckregelung. Der Verdichter läuft mit voller Drehzahl weiter und die Stromaufnahme kann nicht deutlich reduziert werden.<sup>2</sup>

**Integrale Druckregelung:**

Durch Verwendung der integralen Druckregelung ist es mittels elektronischem Expansionsventil möglich, die Verdampfungstemperatur lastabhängig zu gestalten. Ein Aufrechterhalten des Kältekreislaufs (Überhitzung bzw. Unterkühlung) wird durch die Anpassung der Verdichterdrehzahl vorgenommen.

**Leistungsregelung über den Verflüssigungsdruck**

**Keine Verflüssigungsdruckregelung:**

Die Anlage kann nur unter Nominalbedingung betrieben werden. Da Verflüssigung und Verdampfung proportional zueinander sind, kommt es bei niedrigen Außentemperaturen zu einer sehr geringen Unterkühlung und die Leistung wird stark beeinträchtigt.

**Lüfterregelung:**

Bei der Verflüssigungsdruckregelung kann ein guter Wirkungsgrad aufgrund der lastunabhängigen Kondensationsdruckerhaltung

verloren gehen, da der Verdichter nahezu permanent gegen den hohen Druck arbeiten muss. Somit kann bei geringen Lasten die Stromaufnahme nicht deutlich reduziert werden. Die Unterkühlung kann jedoch konstant gehalten werden.

**Anstauregelung:**

Diese Regelung hat den Nachteil, dass ein größerer Kältemittelsammler verwendet werden muss, da das bei niedrigen Außentemperaturen benötigte flüssige Kältemittel im Sommerbetrieb nicht mehr im Verflüssiger gebraucht wird und deshalb im Sommer aufgenommen werden muss.<sup>1</sup>

**Integrale Druckregelung:**

Bei der integralen Verflüssigungsdruckregelung wird ein bestimmtes Verhältnis zwischen Last, variabler Verdichterdrehzahl, elektronischem Einspritzventil und Verflüssigungsdruck hergestellt. Je nach Zustand kann der Lüfter mit hoher oder niedriger Drehzahl betrieben werden.

**Δp-Regelung**

**Kapillare bzw. automatisches E-Ventil:**

Bei dieser Art von Leistungsregelung kann keine Rücksicht auf die Last genommen werden, da diese die Saugtemperatur nicht erfasst und dementsprechend der Öffnungsgrad nicht verändert wird. Die Anlage kann nur bei nominaler Bedingung betrieben werden.

**Thermostatisches E-Ventil:**

Das Thermostatische Einspritzventil kann immer nur auf eine Kühlstelle wirken; es

regelt nach der eingestellten Überhitzung. Das Ventil kann keine Rücksicht auf andere im Verbund befindliche Verbraucher nehmen und somit die Leistung nur an einer Kühlstelle erbringen.

**Elektronisches E-Ventil:**

Das elektronische Einspritzventil zeichnet sich durch ein schnell ausregelndes Verhalten aus. Durch die im Verbund befindlichen Geräte können an verschiedenen Stellen unterschiedliche Überhitzungen gefahren werden, was wiederum durch die lastabhängige Verteilung ausgeglichen wird.

**Energiemanagement des VRV-Systems**

Von den zuvor dargestellten Regelverfahren werden für das Energiemanagement von VRV-Systemen folgende eingesetzt:

- Drehzahlregelung Verdichter
- Integrale Druckregelung Verdampfung
- Integrale Druckregelung Verflüssigung
- Elektronische Einspritzventile

Ferner muss aufgrund weit verzweigter Rohrleitungen gasförmiges Kältemittel vor den Einspritzventilen vermieden werden. Dies wird durch einen zusätzlichen Unterkühlungskreislauf „e-bridge“ gewährleistet, der dafür sorgt, dass kein gasförmiges Kältemittel vor dem Ventil ansteht.

Mit dem VRV System besteht somit die Möglichkeit, auch lange Rohrleitungswege zu überwinden; eine Gesamtleitungslänge von 1000 m (einfach) stellt heutzutage bei direktverdampfenden Klimaanlage keine Hürde mehr dar. Durch intelligente Erfassung der Unterkühlung kann die Maschine selbstständig erfassen, ob an den Innengeräten flüssiges Kältemittel ansteht. Sollten hier Defizite erkannt werden, wird automatisch der Unterkühlungskreislauf am Außengerät aktiviert, um die Versorgung mit flüssigem Kältemittel sicher zu stellen.

Durch den Unterkühlungskreislauf wird in allen Leistungsbereichen gasförmiges Kältemittel vermieden. Somit ist für jedes Innengerät, auch an den entferntesten Stellen, die Nennleistung sichergestellt. Vorteil dieser Regelung ist die dem Bedarf angepasste Aktivierung dieser Funktion.

**Zieldrücke des VRV-Systems**

Durch die unterschiedlichen Lasten an den einzelnen Innengeräten, also durch verschiedene Öffnungsgrade der Einspritzventile, wird die Leistung jeweils den Vorgaben angepasst. Der dadurch geänderte Massenstrom wirkt sich natürlich auf

die Verdampfungstemperatur am Außengerät aus. An der Außeneinheit ist eine Zielverdampfungstemperatur eingestellt. Diese entspricht dann dem Wunschdruck (lastabhängig) innen minus dem aktuellen Druckverlust. Der Zieldruck wird durch die PID-Regelung über die Vorgabe der Kompressordrehzahl aufrecht gehalten.

### Komfortregelung

Die Komfortregelung erfolgt nach einem vom System berechneten Zielwert. Eine Unterscheidung der Zielwerte erfolgt je nach Betriebsart (Heizen/Kühlen).

Kühlen → erreichen der Zielverdampfungstemperatur durch Verändern der:

- Verdichterdrehzahl
- Kondensationstemperatur über Lüfterregelung

Heizen → erreichen der Zielkondensationstemperatur durch Verändern der:

- Verdichterdrehzahl
- Verdampfungstemperatur über Lüfter und elektronisches Einspritzventil

Im Mikroprozessor ist folgende Formel für den Kühlfall hinterlegt (gilt sinngemäß auch für das Heizen):

**Zielverdampfungsdruck = eingestellter Verdampfungsdruck – Druckdifferenz  $\Delta p$**

Die Druckdifferenz nimmt bei steigender Verdichterdrehzahl bzw. großen Rohrleitungsnetzen zu; sie errechnet sich wie folgt:

$$\Delta p = \alpha \times \text{total Frequenz} - \beta$$

$\alpha$  = Druckabfall im Gesamtsystem (die Anlage errechnet den Druckabfall selbstständig durch eine eigene Betriebsart)

$\beta$  = Korrekturfaktor bei erhöhtem Leistungsbedarf bzw. niedrigen Außentemperaturen.

### Leistungsstufen der Verdichter

Durch den modularen Aufbau des VRV Systems ist eine feine Leistungsabstufung möglich. Mit der Regelung des Inverterverdichters und Ab- bzw. Zuschalten des Standardverdichters ergeben sich bis zu 67 Leistungsstufen.

### Der Regelkreis einer VRV Inneneinheit

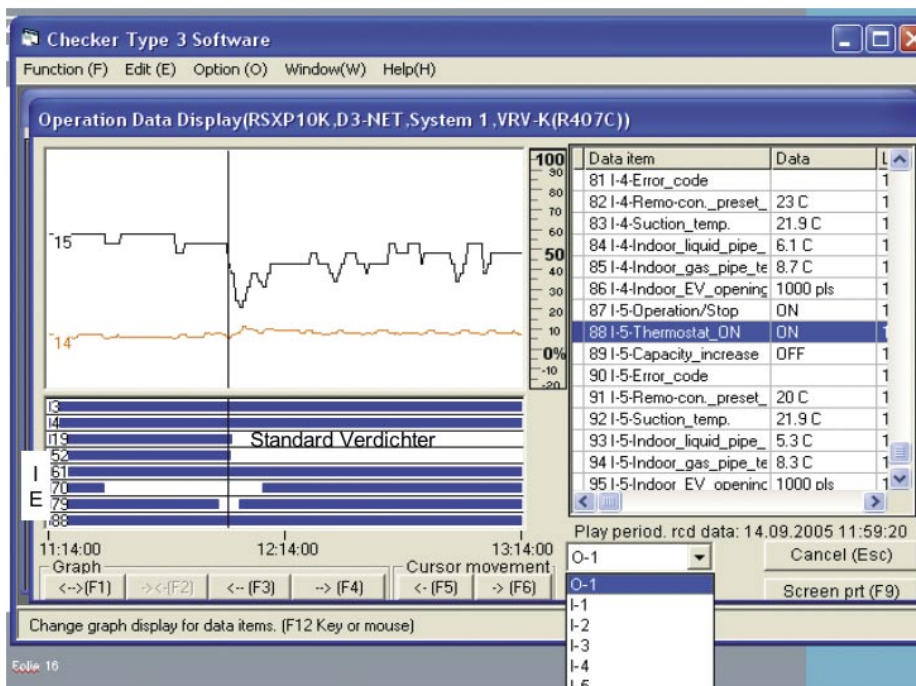
Jedes Innengerät hat eine eigene unabhängige Regelung zur Erhaltung der Komforttemperatur. Die Ermittlung der Kühl- bzw. Heizlast erfolgt über folgende Formel.

$$\text{Luftansaugtemperatur} - \text{Sollwert} = \text{Zielüberhitzung bzw. Unterkühlung}$$

Folgende Faktoren wirken über die PID-Regelung auf das Leistungsverhalten bzw. den Öffnungsgrad des elektronischen Einspritzventils (s. Abbildung Seite 38):

- Temperatur Wärmetauscher Eingang (R2T)
- Temperatur Wärmetauscher Ausgang (R3T)
- Temperatur des Raumes (R1T)
- Lüfterdrehzahl

Um ein Optimum an Komfort zu gewährleisten, wird nur ein geringer Anteil der Leistungsanpassung über die Luftmenge reguliert. Dem Bedarf entsprechend, wird die Wärme dem Raum durch Regulierung des Kältemittelvolumenstroms entzogen. Damit wird eine konstante Raumtemperatur realisiert.



Regelverhalten der VRV-Gesamtanlage.

**0-1 Außengerät**

- 15 Frequenz Inverterverdichter
- 14 Verdampfungsdruck
- 4 Betriebsart: Kühlen
- 3 Thermostat
- 19 Standardverdichter

**I-x Innengeräte**

- 52 Innengerät 1: Thermostat
- 61 Innengerät 2: Thermostat
- 70 Innengerät 3: Thermostat
- 79 Innengerät 4: Thermostat
- 88 Innengerät 5: Thermostat

Hoher Kühlbedarf → großer Kältemittelvolumenstrom, geringer Kühlbedarf → kleiner Kältemittelvolumenstrom.

Der Luftvolumenstrom wird dabei konstant gehalten, so dass sich die Luftmenge der Innengeräte nicht verändert.

Bei größerem Leistungsbedarf kann die Lüfterstufe auf eine hohe Drehzahl geregelt werden (z. B. im Power-Modus). Da es dabei jedoch zu Zegerscheinungen kommen kann, wird diese Stufe im Komfortbereich selten als Grundregelung angewandt, bei Technikanwendungen jedoch favorisiert.

Durch einen gleichmäßig niedrigen Luftvolumenstrom kann es selbst bei hohem Kühlbedarf nicht zu Zegerscheinungen kommen. Ein konstanter Volumenstrom steht zudem für eine gleichbleibende Schallemission; selbst bei erhöhtem Kühlbedarf kommt es nicht zu störenden Geräuschen.

**Praktisches Messbeispiel**

Für Wartungs- und Servicearbeiten steht der so genannte Servicechecker zur Verfügung. Er ist ein Kommunikationsmodul, welches den internen Bus auslesen und auf

einem PC graphisch darstellen kann. Die Daten aller Außen- und Innengeräte eines realen VRV-Systems können somit in Echtzeit aufgezeichnet werden.

Im Beispiel (Bilder Seite 40 und 42) handelt es sich um eine 28kW-Außeneinheit mit 5 Innengeräten. Die Außeneinheit besitzt einen frequenzgeregelten Inverterverdichter und einen Standardverdichter. Sie befindet sich im Kühlbetrieb.

Betrachten wir das Regelverhalten eines einzelnen Innengerätes. Die Grafik zeigt eine Checker-Aufzeichnung über 2 Stunden. Der blaue Strich „87“ zeigt: Das Gerät ist durchgängig eingeschaltet. Es ist ein digitaler Wert, der nur als „Ein“ oder „Aus“ dargestellt wird. Bei „88“ wird der Zustand des Thermostates dargestellt. Die PID-Regelung ist so programmiert, dass zunächst versucht wird, den Thermostat so lange wie möglich eingeschaltet zu lassen, um ein Takten zu vermeiden. Der Öffnungsgrad des elektronischen Expansionsventils „95“ bestimmt im Kühlbetrieb wie viel Kältemittel in den Verdampfer eingespritzt wird. Beeinflusst

wird das von den Temperaturwerten am Luftansaugfühler als Referenz für die Raumtemperatur, dem Wärmetauschereingangs- und Wärmetauscherausgangsfühler und der eingestellten Solltemperatur. Je größer die Abweichung der Solltemperatur „91“ von der Raumtemperatur „92“, desto größer ist auch der Öffnungsgrad des Ventils. Nähert sich die Raumtemperatur dem eingestellten Sollwert, wird immer weniger Kältemittel eingespritzt, so dass im Beispiel die Raumtemperatur lange Zeit dicht über der Solltemperatur liegt. Bei Unterschreitung des Sollwertes von 20°C um 1K, schaltet der Thermostat „88“ aus und das Expansionsventil „95“ schließt auf 0 Impulse. Bei Überschreiten des Sollwertes um 1K, also bei 21°C, würde der Thermostat wieder einschalten und das Expansionsventil öffnen.

Im zweiten Bild ist die Checker-Aufzeichnung der gesamten Anlage zu sehen. 11:14 Uhr haben alle 5 Innengeräte Leistungsanforderung im Kühlbetrieb. Die unteren blauen Linien „52“ bis „88“ stellen den Thermostatstatus dieser Innengeräte dar. Zunächst schaltet der Thermostat „70“ des Innengerätes Nr. 3 ab, da die Solltemperatur erreicht ist. Anschließend wird die Frequenz des Inverterverdichters „15“ etwas reduziert. Dann schaltet der Thermostat „79“ des Innengerätes Nr. 4 ab und danach der Thermostat „52“ des Innengerätes Nr. 1. Die erforderliche Kühlleistung ist nun so gering, dass der Standardverdichter „19“ abschaltet. Die Frequenz „15“ des Inverterverdichters wird zusätzlich reduziert und der Verdampfungsdruck „14“ steigt nun. Danach schalten die Thermostate der Innengeräte „79“ und „70“ wieder ein. Die Verdichtersfrequenz wird wieder leicht angehoben und der Verdampfungsdruck fällt geringfügig.

**Schlussfolgerung**

Durch das Zusammenspiel der elektronischen Expansionsventile der Innengeräte mit der Leistungsregelung des Gesamtsystems kann ein absolut komfortables und wirtschaftliches System betrieben werden. ■

Quellenverzeichnis:  
 1 Pohlmann Taschenbuch der Kältetechnik  
 2 Bundesfachschule Maintal