

Denkanstöße zur

# Energieoptimierung komplexer Verbundanlagen mittels unscharfer (Fuzzy-)Regelung\*

Norbert Ludwig, Springe

*Die auf klassisch-mathematischen Rechenoperationen basierende PI(D-T1)-Regelung offenbart speziell bei Regelstrecken mit Verzögerungsverhalten höherer Ordnung und ungünstigen Verzugs-Ausgleichszeit-Verhältnissen und der damit verringerten Phasenreserve sowie Nichtlinearitäten, Unstetigkeiten und Totzeiten diverse Schwächen, insbesondere im Führungs- und Störverhalten.*

Dadurch bedingt wird eine bezüglich des Energieverbrauchs und der Anlagen-Betriebspunkte erforderliche vermaschte Regelung von Kühlraumkonditionen, Überhitzungen und Saugdruck (Verdichter) unso komplizierter und unpräziser, je mehr Kühlstellen in die Verbundanlage einbezogen werden. Kernproblem der Regelung muss hier sein, tendenzielle Änderungen aller Regelgrößen im Verbund zentral zu erfassen und regelungstechnisch so zu interpretieren, dass die Approximation an die Führungsgrößen nach neuen Gesichtspunkten erfolgt:

- Möglichst gleichbleibende optimierte Betriebspunkte.
- Intelligente Steuerung in Richtung „gleichbleibender niedriger bis mittlerer Energiebedarf“.
- Definierte Regeldifferenz- Toleranzfenster.

Gerade bei solchen Regelstrategien zeigt die unscharfe Regelung bestehende Vorzüge, da sie auch Vorgaben wie „etwas mehr“, „fast gut“ usw. berücksichtigen kann, und dabei nicht um jeden (Energie-) Preis bei Störeinflüssen unnötigerweise sofort allen Führungsgrößen auf ein Zehntel „hinterherläuft“.

## Einleitung

Bei der Regelung von Kälteanlagen werden bis heute klassische stetige Regelungsverfahren bevorzugt eingesetzt. Als Beispiele hierzu mögen Überhitzungsregelung in Verdampfern, Verflüssigungsdruckregelungen und Leistungsregelungen, jeweils mit Frequenzumrichtern als Stellglied, dienen.

Werden nun, wie praxisüblich, solche Regelkreise vermascht, so ist jeder Kreis für sich bemüht, ein Optimum an Regeldifferenz ( $x_d = 0$ ) zu erzielen, was energetisch betrachtet für die gesamte Anlage aber nicht nur ungünstig sein kann, sondern mit zunehmender Komplexität der Anlage auch die Stabilität der gesamten Regelung verschlechtert.

Hier würde eine anlagenspezifische Zentralkontrolle aller Regelgrößen in Verbindung mit einer unscharfen Regelung (Fuzzy-Regelung) deutliche Vorteile bringen, da der Fuzzycontroller auch Aussagen wie „etwas mehr“, „fast gut“ usw. verarbeiten kann, und damit ähnlich wie ein erfahrener Mensch (nur sehr viel schneller und genauer) auf unterschiedliche Anforderungen im Gesamtsystem reagiert und dabei eben auch dieses Gesamtsystem „überblickt“.

Das Ergebnis wäre eine Anlage mit gleichmäßigeren Betriebspunkten, nivellierter Energieaufnahme mit weitgehender Vermeidung von Spitzenlasten sowie besserer Energieausnutzung.

## Das Problem der klassischen Verbundregelung – ein Praxisbeispiel

Allen klassischen Verfahren liegen exakte lineare sowie Differentialgleichungen zugrunde, mit deren Hilfe die messtechnisch erfasste jeweilige Regelgröße zu einer diskreten Stellgröße rechnerisch (analog oder digital) verarbeitet wird. Die benannten Beispielstrecken haben dabei Verzö-

zum Autor

**Norbert Ludwig,**  
Schulleiter  
Norddeutsche  
Kälte-Fachschule,  
Springe



rungsverhalten höherer Ordnung, und sind aufgrund ungünstiger Verzugs- Ausgleichszeit- Verhältnisse, Nichtlinearitäten sowie beachtlicher ähnlich wirkender Totzeiten oft schwierig sauber zu regeln.

Parasitäre Energiespeicher wie träge, großvolumige Temperaturfühler, möglicherweise noch an dickwandigen Rohrleitungen in der Nähe von Verbindungselementen montiert, verringern die Phasenreserve der Regelkreise weiter, so dass insbesondere die Störverhalten solcher Schleifen recht unbefriedigend sein können.

Ein besonderes Problem tritt auf, wenn solche Regelkreise vermascht werden. Als Beispiel diene hier eine Verbund-Kälteanlage, wie sie zu Ausbildungs- und Versuchszwecken in unserem Hause betrieben wird.

Zehn Kühlstellen für den Normalkühlbereich werden mit drei identischen Verdichtern betrieben (Plus-Verbund), zwei Tiefkühlstellen mit zwei weiteren Verdichtern (Minus-Verbund). Hierbei wird das Heißgas aller fünf Verdichter einem gemeinsamen Verflüssiger zugeführt, und das entstehende Kondensat wiederum ei-

\* als Vortrag gehalten am 21. November 2003 anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV in Bonn

nem gemeinsamen Sammler. Die Flüssigkeit für die Tiefkühlstellen wird in einem vom Plusverbund betriebenen Koaxialverdampfer zur Enthalpiedifferenzerhöhung zusätzlich unterkühlt.

Wird die Anlage betrieben, arbeiten folgende klassische Regelkreise:

- 12 × Kühlstellen-Temperaturregelung (Zweipunktregelung),
- 10 × Überhitzungsregelung mit thermostatischem Expansionsventil (TEV) in den Kühlstellen des Plusverbundes (P-Regelung),
- 2 × elektronische Überhitzungsregelung in den beiden Kühlstellen des Minusverbundes (geschaltetes quasistetiges PI-Verfahren),
- 1 × Überhitzungsregelung des Unterkühlers (TEV, P-Regelung),
- Verflüssigungsdruckregelung (Dreipunktregelung über Druckschalter),
- Leistungsregelung der Plusverdichter (quasistetige Stufenregelung),
- Leistungsregelung der Minusverdichter (quasistetige Stufenregelung).

In diesem Beispiel ist zu erkennen, dass nicht weniger als 28 (!) autarke und dennoch miteinander verwobene Regelkreise versuchen, ihre Regelgrößen in der Nähe der jeweiligen Führungsgröße zu halten, und das bei

- gegenseitigen Rückwirkungen über das gesamte System,

- empirischen Störgrößen (auch Abtauung),
- stark unterschiedlichem Kältebedarf mit empirischen Leistungsspitzen und Leistungslöchern der Anlage.

Sicher ist auch eine solche Kälteanlage unterm Strich ein adaptives System, das seiner primären Aufgabe in der Praxis gerecht wird und „kalt macht“. Dennoch lassen diverse Ansätze der Industrie aus den letzten Jahren (Frigotakt, Adap-Kool usw.) erkennen, dass hier Handlungsbedarf herrscht.

### Neuer Lösungsansatz – der Aufbau

Zunächst müssen sämtliche Regelgrößen des Gesamtsystems sowie alle relevanten Randbedingungen (Umgebungs- und Außentemperaturen, Vereisungszustände, offene Kühlraumtüren usw.) messtechnisch erfasst und per Funk oder auf die Netzspannung aufmoduliert (den drahtgebundenen Bus halte ich für überholt) einem Zentralrechner zugeführt werden.

Hierzu werden dezentral statt herkömmlicher Kühlstellen- und Verbundregler Datentransfercontroller eingesetzt, die Messumwandler für die Sensorik sowie die Aktortreiber (Relais, 4–20mA- und 0–10V- Ausgänge) beinhalten. Der Mikrocomputerteil muss den bidirektionalen

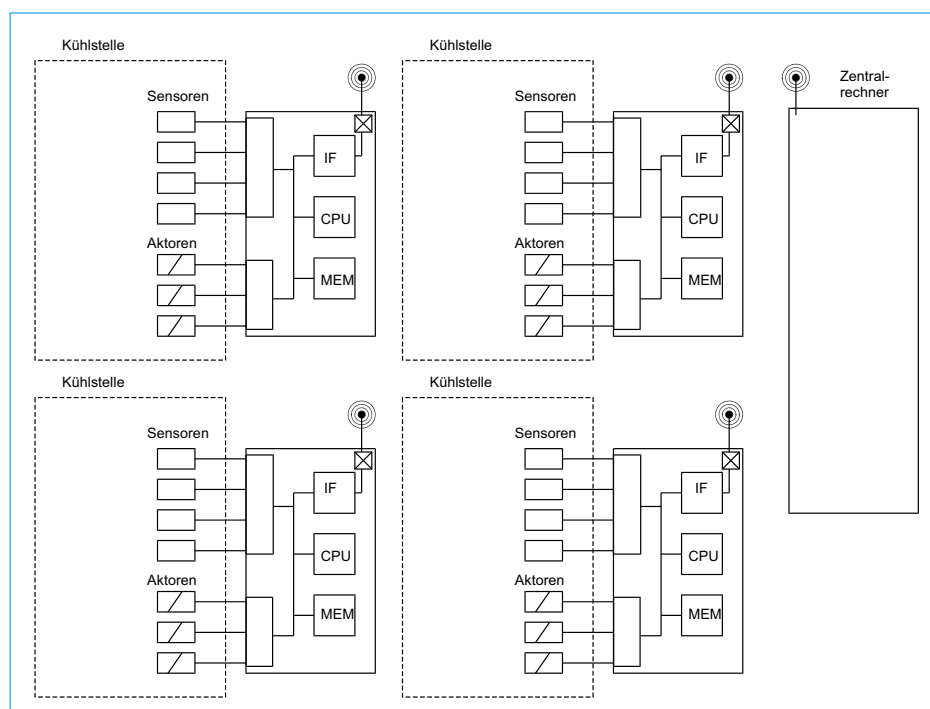


Bild 1 Prinzipieller Aufbau der zentralistischen Regelung

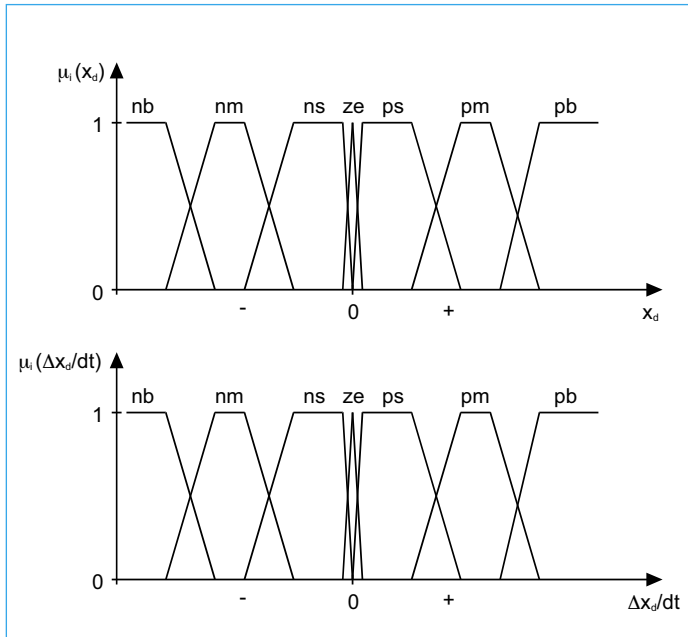


Bild 2 Zugehörigkeitsfunktionen

stimmt, um Tendenzen der Regelabweichungsverläufe zu erkennen.

Die Funktionsmengen werden mit linguistischen Termen hinterlegt, welche die eigentliche Auswertung darstellen. Diese Steuerregeln (Fuzzy-Implicationen) haben im Prinzip eine „WENN dies UND das UND jenes, DANN...“-Struktur, und müssen hier sowohl die Fuzzy-Mengen als auch klassische (Boolesche) logische Aussagen („WENN (Regeldifferenz Temperatur Kühlraum 1 ist negativ groß) UND (Tür Kühlzelle 1 offen) UND...“) miteinander verbinden.

So wird die momentane Regelstrategie jeder Größe auch in jedem Moment von allen anderen abhängig gemacht, was für die gesamte Anlage die erwähnten Vorteile bringt. Man erhält durch dieses Verfahren quasi als Schlussfolgerungen aller Operationen für die Anlage eine Fülle von Partialstellgrößen.

Datentransfer sowie bei fehlender Funkverbindung zum Zentralrechner, Ausfall desselben oder ähnlichen Störungen ein Notlaufprogramm beherrschen. Die erforderliche Rechen- und Speicherkapazität stellen heute bereits billige Einchip-Mikrocontroller zur Verfügung.

Im Zentralrechner liegt nun in jedem Moment ein kompletter Betriebszustandsbericht der Anlage vor, Grundvoraussetzung für die sinnvolle Generierung der Stellgrößen, die dann wiederum an die Datentransfercontroller zwecks Weitergabe an die Aktoren gefunkt werden.

### Auswertung aller Daten im Zentralrechner – Fuzzyverfahren

Im Gegensatz zu klassischen, durch lineare und Differentialgleichungen zur Stellgröße konvertierten Regeldifferenzen, werden bei der unscharfen Regelung die Regeldifferenzen (= Eingangsgrößen der eigentlichen Regler) im Fuzzykomparator so genannten Funktionsmengen zugeordnet. Im weiteren Gegensatz zu klassischen Zweipunkt- oder Mehrpunktverfahren (= Boolesche Logik), wo die Zugehörigkeit nur 100% oder 0% sein kann (ja oder nein), besitzt ein Element der Fuzzymenge  $i$  einen Grad an Zugehörigkeit  $\mu_i$  zu einer bestimmten Funktionsmenge, z. B. zwischen 0 und 100 %.

Die Übergänge der Zugehörigkeitsfunktionen können diverse Kurvenverläufe

(Fermi-Kurven, Exponentialfunktionen usw.) haben, für Regelungsaufgaben empfehlen sich jedoch Polygone mit linearen Seitenformen, da auch der zur Defuzzifizierung nötige Rechenaufwand reduziert wird.

### Defuzzifizierung

Die jedem Stellglied zuordnungsfähigen Partialstellgrößen (= unscharfe Mengen) müssen nun noch in eine diskrete Stellgröße umgewandelt werden (= Defuzzifizierung).

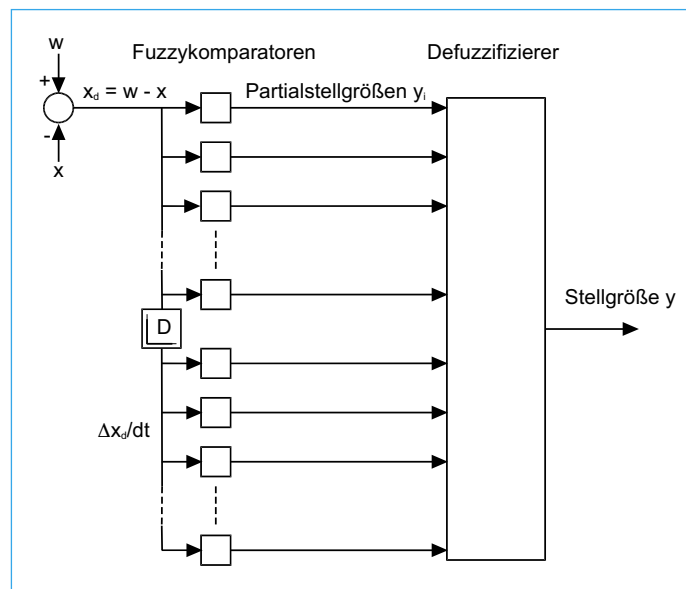


Bild 3 Fuzzifizierung und Defuzzifizierung

Um eine möglichst gute Regelung der Anlage zu erreichen, wird zum einen die Zugehörigkeit jeder Regeldifferenz ( $x_d$ ) selbst zu den Funktionsmengen kontinuierlich bestimmt, was eine Aussage über den Momentanzustand aller Kreise erlaubt. Zum anderen wird aber auch die Zugehörigkeit ihrer ersten Differentiation ( $x_d' = \Delta x_d / dt$ ) zu weiteren Funktionsmengen be-

on). Hierzu werden sie gewichtet und miteinander verrechnet. Dabei kann man sich verschiedener Verfahren bedienen, ich denke aber, dass sich hier das Schwerpunktverfahren eignen dürfte, da einfachere Verfahren die Fülle an unscharfen Informationen schlechter verarbeiten würden.

### Wie Fuzzy funktioniert – zwei einfache Beispiele

Stellen Sie sich einen unregelmäßig, in der Heizleistung stufenlos verstellbaren Heizkörper in einer kalten Skihütte im Winter vor, den ein Mensch, der von Regelungstechnik keine Ahnung hat, von Hand bedienen soll. Die Stellung des Bedienhebels (0% - 100% stufenlos) bestimmt dabei die Heizleistung.

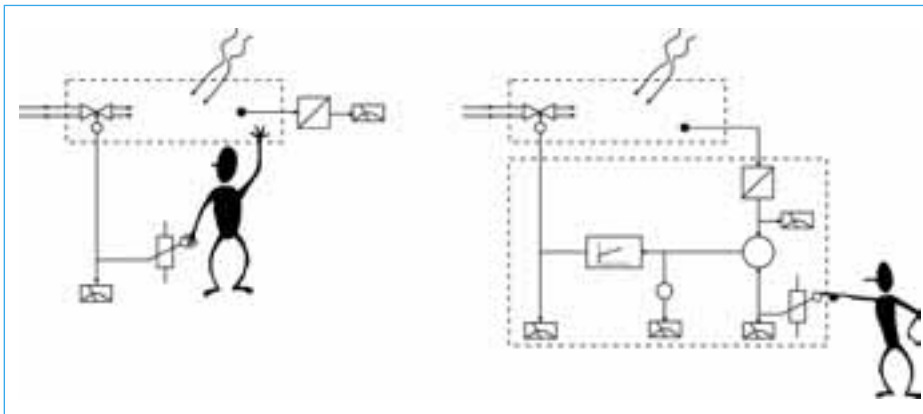


Bild 4 Offener Wirkungsablauf des Beispiels, Vergleich mit PI-Regelung

Anfangs würde der Bediener zu der Hauptkenntnis gelangen, es sei viel zu kalt, und den Hebel auf 100% stellen. Nähert sich die Temperatur dem Behaglichkeitsbereich, würde er vielleicht sagen, die Temperatur ist fast angenehm, und die Heizleistung drosseln. Da der Heizkörper kräftig nachheizt, wird es dann noch wärmer, und er würde in Konsequenz daraus die Leistung weiter drosseln. Nimmt die Temperatur dann wieder langsam ab, würde er umgekehrt die Leistung ein wenig erhöhen.

Wenn nun aber ein eisiger Wind durch die plötzlich geöffnete Tür hereinweht, wäre der maßgebliche Auslöser einer drastischen Leistungserhöhung nicht eine an sich niedrige Raumtemperatur, sondern die Tatsache, dass die Temperatur rasch abnimmt. Und je mehr dieser Mensch das Regeln übt (das hier im regelungstechnischen Sinn eigentlich ein Steuern ist!), desto präziser werden seine Ergebnisse im Erreichen und Halten des Sollwertes sein.

Was beobachtet dieser Mensch also instinktiv? Die Regelgröße (wie warm ist es?) und ihr Differential (wie stark ist die Änderung?). Dieser Vorgang lässt sich neben der schon erwähnten klassischen Methode (hier wäre z.B. eine stetige PI-Regelung angebracht) wunderbar mit

einer Fuzzy-Logik „menschähnlich“ beherrschen. Denn Begriffe wie „sehr kalt“, „fast gut“, „etwas zu warm“, fast angenehm und „ein wenig mehr“ sind in sich unscharf und somit Fuzzy-Begriffe.

Vergleichen wir in diesem Beispiel die Fuzzyregelung mit einer stetigen PI-Regelung, stellen wir fest, dass dem Fuzzykomparator im Gegensatz zum PI-Regler die Regeldifferenz  $x_d$  sowohl direkt als auch differenziert ( $\Delta x_d/dt$ ) zugeführt

wird (Bild 3). Für beide Signale erfolgt die Ermittlung der Zugehörigkeit  $\mu_i$  zu den Fuzzymengen i:

- nb = negative big
- nm = negative medium
- ns = negative small
- ze = zero
- ps = positive small
- pm = positive medium
- pb = positive big

		$x_d$							
		$y_i$	nb	nm	ns	ze	ps	pm	pb
$\Delta x_d/dt$	nb	ns			pm				
	nm	nm							
	ns				ze				
	ze	nb							pb
	ps								pm
	pm								
	pb								ps

Tabelle 1 Fuzzy-Implikationen am Heizungsbeispiel

Nun folgen auszugsweise einige der erforderlichen linguistischen Terme oder Fuzzy-Implikationen, die so genannten WENN-DANN-Regeln (zur Beachtung sei angemerkt, dass  $x_d = nb$  hier z. B. bedeutet, dass der Raum viel zu warm ist bzw.  $\Delta x_d/dt$  is nb bedeutet, dass die Temperatur schnell sinkt, s. Bild 5!):

IF ( $x_d$  is nb) AND ( $\Delta x_d/dt$  is nb)  
THEN ( $y_i$  is ns)

(viel zu warm, Temp. sinkt schnell)

IF ( $x_d$  is nb) AND ( $\Delta x_d/dt$  is ns)  
THEN ( $y_i$  is nm)

(viel zu warm, Temp. sinkt langsam)

IF ( $x_d$  is nb) AND ( $\Delta x_d/dt$  is ze)  
THEN ( $y_i$  is nb)

(viel zu warm, Temp. ist konstant)

IF  $x_d$  is ns AND ( $\Delta x_d/dt$  is nb)  
THEN ( $y_i$  is pm)

(etwas zu warm, Temp. sinkt schnell)

IF  $x_d$  is ns AND ( $\Delta x_d/dt$  is ns)  
THEN ( $y_i$  is ze)

(etwas zu warm, Temp. sinkt langsam)

IF  $x_d$  is pb AND ( $\Delta x_d/dt$  is ze)  
THEN ( $y_i$  is pb)

(viel zu kalt, Temp. ist konstant)

IF  $x_d$  is pb AND ( $\Delta x_d/dt$  is ps)  
THEN ( $y_i$  is pm)

(viel zu kalt, Temp. steigt langsam)

IF  $x_d$  is pb AND ( $\Delta x_d/dt$  is pb)  
THEN ( $y_i$  is ps)

(viel zu kalt, Temp. steigt schnell)

Das lässt sich auch einfacher als Tabelle darstellen. Zur besseren Nachvollziehbarkeit sind nur die oben genannten Beispielsterme in die Tabelle eingetragen:

Die durch Auswertung der jeweilig gültigen Regeln ermittelten und gewichteten Partialstellgrößen  $y_i$  werden nun noch zu einer einzigen diskreten Stellgröße  $y$  verrechnet (Defuzzifikation durch Schwerpunktbildung), die statt des Menschen das Stellglied (symbolisch: „Hebel“) bedient

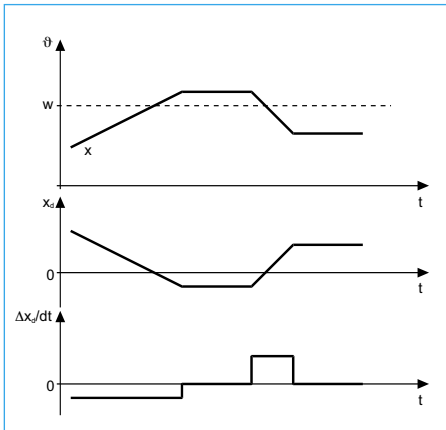


Bild 5 Beispiel eines Temperaturverlaufs

und dabei jeden Wert von 0% bis 100% annehmen kann.

Schon haben wir eine „menschliche“ Regelung realisiert, allerdings ohne die menschlichen Nachteile von Ungenauigkeit, Subjektivität, Reaktionsträgheit, Unaufmerksamkeit usw.

Am Beispiel einer einfachen Verbundregelung will ich das Gezeigte noch einmal durch Anwendung verdeutlichen:

- Gegeben seien drei kalte Räume einer Verbundanlage, geregelt durch hystereselose Temperaturschalter. Im linken Teil des Bildes 6 sieht man, wie jede der drei Temperaturen scharf einer Menge zugeordnet werden. Ergebnis: Zwei Räume zu warm, einer zu kalt. Folge: Zweimal Kälteanforderung. Dabei ist es völlig nachrangig, dass einer der Thermostate gerade erst geschaltet hat und die Sollabweichung des mittleren Raumes am geringsten ist. Wenn also der Raum mit der mittleren Temperatur plötzlich Kälte anfordert, erhöht sich sprunghaft die Anlagenleistung von 33% auf 67%.

Im rechten Teil des Bildes 6 erkennt man die unscharfe Auswertung desselben Sachverhaltes durch Ermittlung der Zugehörigkeit zu lediglich 5 unscharfen Mengen

(nb, ns, ze, ps, pb) und kommt zu einem etwas anderen Ergebnis, wie in Bild 6 dargestellt.

Die Fuzzifizierung der Regelabweichung  $x_w$  ergibt jeweils die ganz rechts dargestellten Zugehörigkeiten  $\mu_i$ , die ihres Differentials die Darstellung in der Mitte.

**Wichtige Anmerkung:**

- Bitte beachten Sie als Leser, dass ich im Gegensatz zum vorherigen Beispiel aus darstellerischen Gründen hier nicht mit der Regeldifferenz  $x_d = w - x$ , sondern mit der Regelabweichung  $x_w = x - w$  arbeite, die das zur Regeldifferenz invertierte Vorzeichen hat (Raum zu warm heißt:  $x_w$  ist positiv)!

**a) Beispiel des Raumes mit der höchsten Temperatur:**

Regelabweichung is positive big (= Temp. viel zu hoch)  
 $\Delta$  Regelabweichung/dt is negative big (= Temp. sinkt schnell)

Eine passende Fuzzyimplikation dazu wäre:

IF  $x_w$  is pb AND  $\Delta x_w/dt$  is nb THEN  $y_i$  is ps

**b) Beispiel des Raumes mit der tiefsten Temperatur:**

Regelabweichung is negative small (= Temp. etwas zu niedrig)  
 $\Delta$  Regelabweichung/dt is 50% zero (= Temp. ist konstant)  
 $\Delta$  Regelabweichung/dt is 50% positive small (= Temp. steigt langsam)

Passende Fuzzyimplikationen dazu wären:

IF  $x_w$  is ns AND  $\Delta x_w/dt$  is ze THEN  $y_i$  is ps

IF  $x_w$  is ns AND  $\Delta x_w/dt$  is ps THEN  $y_i$  is ze

**c) Beispiel des Raumes mit der mittleren Temperatur:**

Regelabweichung ist 50% zero (= Temp. stimmt)  
 Regelabweichung ist 50% positive small (= Temp. etwas zu hoch)  
 $\Delta$  Regelabweichung/dt is positive small (= Temp. steigt langsam)

Passende Fuzzyimplikationen dazu wären:

IF  $x_w$  is ze AND  $\Delta x_w/dt$  is ps THEN  $y_i$  is ps

IF  $x_w$  is ps AND  $\Delta x_w/dt$  is ps THEN  $y_i$  is pb

Als Schwerpunkte der Partialstellgrößen  $y_i$  ergeben sich so die Stellgrößen  $y$ :

- a) ps
- b) ze ... ps
- c) ps ... pb

Es zeigt sich, dass der Raum mit der höchsten Temperatur (a) in diesem Zustand relativ wenig, der Raum mit der tiefsten Temperatur (b) sehr wenig und der Raum mit der mittleren Temperatur (c) eine mittlere Kälteleistung fordert. Damit bleibt die gesamte nötige Anlagenleistung in diesem Beispiel sicher unter 50%.

**Optimale Stellglieder**

Natürlich ist auch die beste Regelung nur so gut wie die verwendeten Stellglieder. Optimale Ergebnisse sind hier mit stetigen Stellgliedern erreichbar. Die Industrie liefert dazu eine Fülle von standardisierten und brauchbaren Komponenten, so dass hier bereits heute auf eine breite Palette von Standardkomponenten zurückgegriffen werden kann.

Für herkömmliche motorische Antriebe von Verdichtern und Lüftern haben sich Frequenzumrichter bewährt, die preiswert und zuverlässig sind sowie hohe Wirkungsgrade aufweisen. Hier würden ganz einfache Modelle ohne eingebaute Reglerfunktionen, Sensoreingänge, Istwertrückführungen usw. auch den Handwerksbetrieben und ihren Monteuren das Leben deutlich erleichtern.

Auch elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren mit Tastgradsteuerung sind hier zukünftig denkbar, da sie bei gleicher Leistung höhere Anlaufmomente und kompaktere Bauformen erlauben.

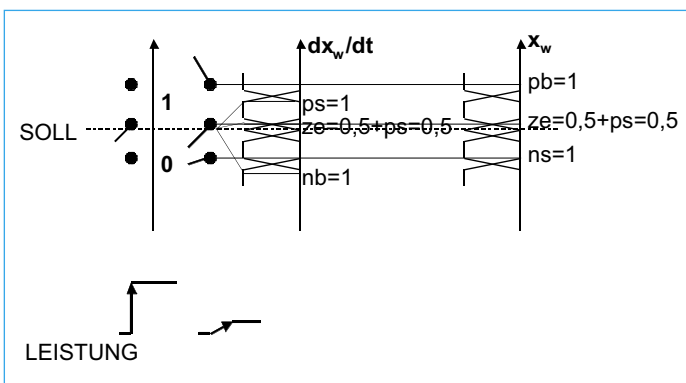


Bild 6 Vergleich einer scharfen mit einer unscharfen Verbundregelung

Als Stellglieder der Verdampfer eignen sich z.B. neuartige stetige Kältemittelventile von Siemens, die mit Einheitssignalen steuerbar und stromlos geschlossen sind. Hierüber kann nicht nur im Volllastbereich die Überhitzung, sondern im Teillastbereich durch Vergrößerung derselben die gesamte Verdampferleistung gesteuert werden (entspricht einer Verringerung der wirksamen Verdampferfläche).

Durch die Vermeidung von Schalt- und Taktvorgängen unterbindet man gleichzeitig zuverlässig Flüssigkeitspulsationen mit allen Nachteilen wie Druckstoßbelastung der Komponenten, Rohrleitungen und Verbindungsstellen sowie die damit verbundene Geräusch- und Körperschallentwicklung. Abzulehnen sind inkremental angesteuerte Ventile (Schrittmotoren), da sie bei Stromausfall nicht ohne Ansteuerung schließen, was zur Kältemittelverlagerung und somit zu Flüssigkeitsschlägen beim Wiederanlauf führen kann.

### Die Entwicklung der Fuzzy-Logik

Die zugehörige Hardware stellt heute absolut kein Problem mehr dar und ist preiswert mit Standardbauelementen der Elektronik zu realisieren. Auch die erforderliche Rechenkapazität sowie der Speicherplatz sind im Wesentlichen als single-chip-Versionen zu haben. Ebenso ausgereift sind Protokolle zur Datenübertragung und Funksysteme zur Überbrückung kleiner Strecken. Daher muss ein solches System m.E. nicht teurer sein als die am Markt befindlichen Klassiker, zumal bei den in sich relativ langsamen Regelvorgängen der Kältetechnik keine besonders hohe Rechengeschwindigkeit nötig ist.

Softwareseitig erfordert diese Technologie jedoch großen gedanklichen Aufwand. Jede Fuzzyprogrammierung ist eine empirische Entwicklung, die allein auf Erfahrungen, Versuchen usw. fußt. Hier müssen unabdingbar erfahrene Informatiker, Fuzzyprogrammierer und solche Entwickler an einen Tisch, die einerseits hervorragende Kenntnisse in Regelungstechnik haben, aber auch Regelungsvorgänge in Kälteanlagen quantitativ und qualitativ vollkommen verinnerlicht haben und beherrschen.

Unter diesen Bedingungen können mit Sicherheit adaptive Systeme entwickelt werden, die sich in der Praxis sehr einfach montieren und einstellen lassen, und die dann mit nie gekannter Präzision und Effizienz arbeiten werden.

### Schlussfolgerungen

Wer jemals die Regelgrößen in einer umfangreicheren Kälteanlage unter realen Betriebsbedingungen exakt dokumentiert hat, wird mit dem Ergebnis nicht wirklich zufrieden sein. Sicher arbeitet die Anlage, wenn keine Auslegungsfehler gemacht wurden und die Technik einwandfrei mitspielt. Aber wie gut macht sie das?

Sinn einer jeden Regelung ist es, den Istwert der Regelgröße möglichst schnell und präzise auf einen Sollwert zu bringen, und ihn ungeachtet der beeinflussenden Störgrößen auch dort zu halten. Dabei wurde in der Kältetechnik bis heute meist der Weg beschritten, autarke Regelkreise wie Überhitzungsregelung, Verflüssigungsdruckregelung und Leistungsregelung für sich zu optimieren und dann vom Anlagenbauer vermaschen zu lassen.

Durch die dann unweigerlich auftretenden Rückwirkungen wird aber dann das Führungsverhalten von Kreis a zur Störgröße von Kreis b, dessen Störverhalten wiederum Kreis c beeinflusst usw. Hier ist es Zeit, über eine ganzheitliche Regelungsstrategie nachzudenken, wie sie in diesem Beitrag beschrieben wurde.

Die teilweise oder komplette Verwendung von unscharfer (Fuzzy-) Regelung dürfte das Ergebnis dann weiter verbessern, da sie dem Naturell spezieller Kälteanlagen-Regelungsprobleme (empirische Störgrößen, Totzeiten, ungünstige Verzugs-, Ausgleichszeit-Verhältnisse, Nichtlinearitäten) am besten Rechnung trägt.

Daher soll der Beitrag, wie die Überschrift bereits aussagte, einen Denkanstoß vermitteln. Ich bin sehr sicher, dass sich eine Forschung in dieser Richtung lohnen und sowohl das Verhalten der Anlagen als auch die Energieausnutzung weiter deutlich optimieren würde, was letztlich ein wertvoller Beitrag zur Kostensenkung wäre.

### Zusammenfassung

Energieausnutzung und Regelverhalten sind bei komplexen Kälteanlagen aufgrund der Vermaschung vieler beteiligter Regelkreise mit diversen Wechselwirkungen eng aneinander gekoppelt. Außerdem gilt es, Spitzenbelastungen abzubauen und die Energieaufnahme zu nivellieren.

Eine ganzheitliche, gleichsam zentralistische Regelstrategie, in Verbindung mit Möglichkeiten der unscharfen (Fuzzy-) Regelung, erlaubt gerade in Systemen mit empirischen Störeinflüssen sowie Totzeiten, ungünstigen Verzugs-, Ausgleichszeit-Verhältnissen, Nichtlinearitäten usw. die entscheidenden Verbesserungen. □