

1. Aufgabenstellung:

Ein repräsentativer Raum soll mit einer Fußbodenheizung und einer Kühldecke klimatisiert werden. Beide Systeme haben einen gemeinsamen Wasserkreislauf mit geregelter Vorlauf-temperatur. Als Stellglied für die Vorlauf-Temperaturregelung ist ein Dreiwegeventil mit analogem Stellmotor (0 ... 10 V) vorgesehen. Die Fußbodenheizung wird unterhalb der *Heizgrenze* und die Kühldecke oberhalb der *Kühlgrenze* betrieben. Zwischen Heiz- und Kühlgrenze findet kein geregelter Betrieb statt.

Als Wärme- bzw. Kälteerzeuger können getrennte Systeme (Heizkessel und Kaltwassersatz) oder eine Wärmepumpe im reversiblen Betrieb (Heizen und Kühlen) angewendet werden. Um den Erzeugerkreis (Primärkreis) und Verbraucherkreis (Sekundärkreis) druckmäßig voneinander zu trennen sollte eine hydraulische Weiche oder ein Pufferspeicher eingesetzt werden. Ein Pufferspeicher hat den Vorteil, dass die Betriebsunterbrechung der Wärmepumpe durch das EVU überbrückt werden kann.

Heizbetrieb:

Für den Heizbetrieb wird die Vorlauftemperatur nach einer Heizkennlinie geregelt. Die maximale Vorlauftemperatur wird auf 45 °C bei -14 °C Außentemperatur festgelegt. Die Spreizung unter Auslegebedingungen soll 10 K betragen.

Während der normalen Nutzungsdauer (Tag) soll die Raumtemperatur auf 22 °C konstant geregelt werden. Außerhalb der normalen Nutzungsdauer (Nacht) wird die Raumtemperatur um 4 K abgesenkt. Als Stellglieder für die Temperaturregelung sind stromlos geschlossene *elektrothermische Ventile* vorhanden.

Kühlbetrieb:

Die Kühldecke soll nur während der normalen Nutzungszeit des Raumes betrieben werden. Bis zu einer Außentemperatur von 28 °C soll die Raumtemperatur auf 22 °C konstant gehalten werden. Aus wärmephysiologischen Gründen und zur Energieeinsparung soll oberhalb einer Außentemperatur von 28 °C die Raumtemperatur so angehoben werden, dass die Differenz zwischen Außen- und Raumtemperatur nicht größer als 6 K wird.

Die Kühldecke wird mit Kaltwasser von 15 °C im Vorlauf betrieben. Als Stellglieder für die Temperaturregelung sind stromlos geschlossene elektrothermische Ventile vorhanden. Um Kondensatbildung an der Kühldecke zu verhindern, soll eine aktive Taupunktüberwachung angewendet werden.

Taupunktunterschreitungen an Kühldecken führen früher oder später zu Schimmelpilzbildung mit allen gesundheitlichen Folgen. Die vielfach angewendete passive Taupunktüberwachung kann eine Taupunktunterschreitung nicht sicher verhindern und führt zeitweise zur Totalabschaltung der Kühldecke. Bei der aktiven Taupunktregelung wird die Kaltwasser-Vorlauf-temperatur so geregelt, dass sie immer unterhalb der Taupunkttemperatur der Raumluft bleibt und somit Kondensatbildung ausgeschlossen wird.

Darüber hinaus soll im Kühlbetrieb ein Signal zur Verfügung gestellt werden, mit dem der Außenluftwechsel minimiert (bei einer Lüftungsanlage), die Fenster geschlossen (bei automatischen Fensterschließsystemen) oder ein Warnsignal ausgegeben werden kann, wenn der Wärme- oder Wasserinhalt der Außenluft größer als der der Raumluft wird. Auf diese Weise wird keine zusätzliche Wärme oder Feuchte mit der Außenluft auf den Raum übertragen.

2. Verwendete Geräte und Kommunikationsobjekte:

In der nachfolgenden Abbildung 1 sind die prinzipiellen hydraulischen und regeltechnischen Zusammenhänge dargestellt. Die hydraulische Schaltung kann im konkreten Fall von dieser Darstellung abweichen (z. B. beim Einsatz einer hydraulischen Weiche).

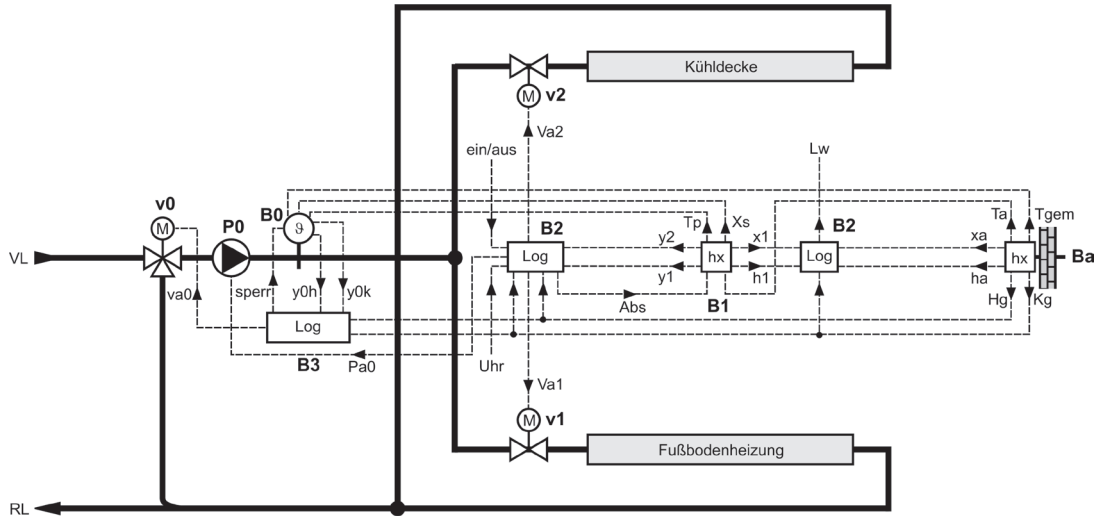


Abbildung 1: Prinzipschema Regelung

Hydraulische Komponenten und Stellglieder (bauseits):

- v1: thermoelektrisches Durchgangsventil, stromlos geschlossen
- v2: thermoelektrisches Durchgangsventil, stromlos geschlossen
- P0: Umwälzpumpe
- v0: Dreiwege-Mischventil mit analogem Stellmotor, 0 ... 10 V

Regel- und steuerungstechnische KNX-Geräte:

- Ba: Enthalpie-Regler HVAC (B12 323 02)
Parameterauswahl für Regleranwendung: Enthalpieregler Außen
- B0: Temperatur-Regler Duplex (B04 346 xx oder B04 347 40 oder B04 347 xx)
- B1: Enthalpie-Regler HVAC (B12 321 02 oder B12 331 xx)
Parameterauswahl für Regleranwendung: Enthalpieregler Raum
- B2: Logik-Baustein (bauseits)
- B3: Logik-Baustein (bauseits)

Zusätzliche KNX-Komponenten (bauseits):

- Schaltfaktor vierfach (Ansteuerung für v1, v2, P0, Lw)
- Analog-Aktor einfach (Ansteuerung v0)

KNX Regel- und Steuersignale:

Signal/Telegramm			Sendendes Gerät			Zielgerät		
Nr.	Name	Typ	Nr.	Name	Objekt	Nr.	Name	Objekt
y1	Stellgröße (PWM) Heizen	1 Bit	B1	Enthalpie-Regler Raum	22	B2	Logik-Baustein	
y2	Stellgröße (PWM) Kühlen	1 Bit	B1	Enthalpie-Regler Raum	23	B2	Logik-Baustein	
Va1	Ansteuerung Ventil v1	1 Bit	B2	Logik-Baustein			Schaltfaktor-Kanal für v1	
Va2	Ansteuerung Ventil v2	1 Bit	B2	Logik-Baustein			Schaltfaktor-Kanal für v2	

Signal/Telegramm			Sendendes Gerät			Zielgerät		
Nr.	Name	Typ	Nr.	Name	Objekt	Nr.	Name	Objekt
Pa0	Ansteuerung Pumpe P0	1 Bit	B2	Logik-Baustein	32		Schaltaktor-Kanal für P0	
ein/aus	Einschaltbefehl	1 Bit				B2	Logik-Baustein	
Hg	Heizgrenze	1 Bit	Ba	Enthalpie-Regler Außen	15	B2	Logik-Baustein	
						B3	Logik-Baustein	
Kg	Kühlgrenze	1 Bit	Ba	Enthalpie-Regler Außen	16	B2	Logik-Baustein LA 2	
						B3	Logik-Baustein LA 1	
Uhr	Schaltuhr	1 Bit				B2	Logik-Baustein	
Abs	Sollwert-Absenkung	1 Bit	B2	Logik-Baustein		B1	Enthalpie-Regler Raum	21
xa	Absolute Feuchte Außenluft	4 Byte	Ba	Enthalpie-Regler Außen	38	B2	Logik-Baustein	
x1	Absolute Feuchte Raumluf	4 Byte	B1	Enthalpie-Regler Raum	38	B2	Logik-Baustein	
ha	Enthalpie Außenluft	4 Byte	Ba	Enthalpie-Regler Außen	41	B2	Logik-Baustein	
h1	Enthalpie Raumluf	4 Byte	B1	Enthalpie-Regler Raum	41	B2	Logik-Baustein	
Lw	Luftwechsel	1 Bit	B2	Logik-Baustein			Schaltaktor für Lüftung	
Ta	Außentemperatur aktuell	4 Byte	Ba	Enthalpie-Regler Außen	0	B1	Enthalpie-Regler Raum	37
Tgem	Außentemperatur gemischt	4 Byte	Ba	Enthalpie-Regler Außen	48	B0	Temperatur-Regler Vorlauf	65
Tp	Taupunkttemperatur Raumluf	4 Byte	B1	Enthalpie-Regler Raum	40	B0	Temperatur-Regler Vorlauf	37
Xs	Sollwert-Temperatur Raum	4 Byte	B1	Enthalpie-Regler Raum	19	B0	Temperatur-Regler Vorlauf	66
y0h	Stellgröße Heizen Vorlauf	1 Byte	B0	Temperatur-Regler Vorlauf	22	B3	Logik-Baustein	
y0k	Stellgröße Kühlen Vorlauf	1 Byte	B0	Temperatur-Regler Vorlauf	34	B3	Logik-Baustein	
Va0	Stellsignal 0 ... 255	1 Byte	B3	Logik-Baustein			Analog-Aktor 0 ...255 / 0 ... 10 V	
sperr	Regler Heizen und Kühlen sperren	1 Bit	B3	Logik-Baustein		B1	Temperatur-Regler Raum	24
						B0	Temperatur-Regler Vorlauf	24
							Temperatur-Regler Vorlauf	36

3. Beschreibung der Steuerung

Raumtemperatur-Regelung

Die Raumtemperatur wird über den PI-Reglers des Enthalpie-Raumreglers (B1) geregelt. Dieser Regler hat zwei pulsweitenmodulierte Ausgänge (einen für Heizen und einen für Kühlen), die durch einen Totzonenbereich voneinander getrennt sind. Wenn die Ausgänge durch den Einschaltbefehl (ein/aus) und die Heiz- bzw. Kühlgrenze freigegeben wurden, steuert der Ausgang y1 das Durchgangsventil v1 und der Ausgang y2 das Durchgangsventil v2 an. Die

Pumpe P0 läuft, wenn einer der beiden Ausgänge geschaltet ist.

Der Sollwert des Reglers wird über die aktuelle Außentemperatur (T_a) so geführt, dass er bis 28 °C Außentemperatur konstant auf 22 °C bleibt und bei höheren Außentemperaturen jeweils um 1 K pro 1 K Außentemperatursteigerung erhöht wird. Auf diese Weise wird zwischen Außen und Innen immer ein Temperaturunterschied von 6 K gehalten. Abbildung 2 erläutert diesen Zusammenhang. Der obere Punkt der Führungskurve sollte so gelegt werden, dass er im Bereich der maximal zu erwartenden Außentemperatur liegt.

Im Heizbetrieb (Hg) wird außerhalb der normalen Betriebszeit der Sollwert des Reglers über den Schaltuhrbefehl (Uhr) um 4 K abgesenkt.

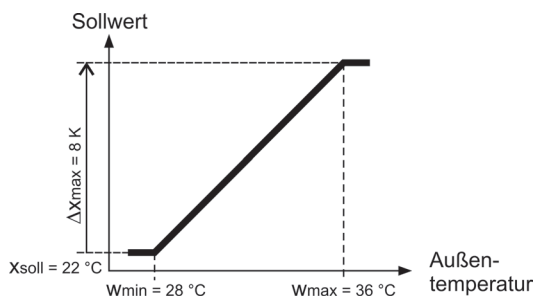


Abbildung 2: Sollwertanhebung Raumtemperatur

Vorlauftemperatur-Regelung

Als Stellglied zur Regelung der Wassertemperatur wird ein stetiges Dreiwegeventil verwendet, das Vorlaufwasser (VL) mit Rücklaufwasser (RL) mischt. Der Stellantrieb des Dreiwegeventils wird vom Vorlauf-Temperaturregler (B0) unter Zwischenschaltung eines Analogaktors zur Umsetzung des 1 Byte-Reglersignals in ein Analogsignal (0 ... 10 V) angesteuert.

Der Vorlauf-Temperaturregler verfügt über zwei voneinander unabhängige PI-Temperatur-Regler (Heizungsregler und Kühlregler) mit eigener Sollwertvorgabe und Sollwertführung. Unterhalb der Kühlgrenze ist das Ausgangssignal des Heizungsreglers (y_{0h}) auf das Dreiwegeventil v_0 geschaltet. Bei Überschreitung der Kühlgrenztemperatur (K_g) wird das Dreiwegeventil vom Ausgang des Kühlreglers (y_{0k}) angesteuert. Wenn weder die Heizgrenztemperatur unterschritten noch die Kühlgrenztemperatur überschritten wird (kein Heizbetrieb und kein Kühlbetrieb), werden beide Temperatur-Regler gesperrt und das Dreiwegeventil geschlossen.

Der Sollwert des Heizungsreglers wird über eine Heizkennlinie geführt, die aus den Auslegedaten der Fußbodenheizung (Vor- und Rücklauftemperatur, Norm-Außen- und -Innentemperatur und Heizflächenexponent) gebildet wird. Als Führungsgröße wird die gemischte Außentemperatur (T_{gem}) des Außen-Enthalpiereglers (B_a) verwendet (siehe Abbildung 3a). Zur Anpassung der Heizkennlinie (Parallelverschiebung) an die geforderte Raumtemperatur wird der Sollwert (X_s) des Raum-Enthalpiereglers (B_1) auf den Heizungsregler aufgeschaltet.

Der Sollwert des PI-Kühlreglers wird von der Taupunkttemperatur so geführt, dass die Kühlwasser-Temperatur in der Kühldecke nie die Taupunkttemperatur unterschreitet. Die Taupunkttemperatur der Raumluft (T_p) wird mit dem Raum-Enthalpie-Regler (B_1) gemessen.

Bis zu einer Taupunkttemperatur von 15 °C wird die Kühlwassertemperatur konstant auf 15 °C gehalten. Bei Steigung der Taupunkttemperatur über 15 °C wird sie um den gleichen Betrag angehoben, so dass der Abstand zwischen Taupunkttemperatur und Kühlwassertemperatur immer gleich bleibt (siehe Abbildung 3b). Der obere Punkt der Führungskurve sollte so gelegt werden, dass er oberhalb der maximal zu erwartenden Taupunkttemperatur liegt.

Wenn Luft an kälteren Flächen unter ihre Taupunkttemperatur abgekühlt wird, kommt es zur Kondensatbildung. Wenn man nicht die Taupunkttemperatur der Raumluft beeinflussen kann (weil z. B. keine Lufttrockner vorhanden sind), muss die Oberflächentemperatur der Kühldecke so geregelt werden, dass sie immer unter der Taupunkttemperatur bleibt und somit Tauwasserbildung ausgeschlossen ist. Das heißt, Kühldecken dürfen nur sensible Wärme abführen. Die Zusammenhänge zwischen den Luftzustandsgrößen Temperatur, Wassergehalt, Taupunkttemperatur und Wärmeinhalt sind aus dem hx-Diagramm ersichtlich. Vertiefende Erläuterungen dazu können in unserer HLK-Broschüre nachgelesen werden.

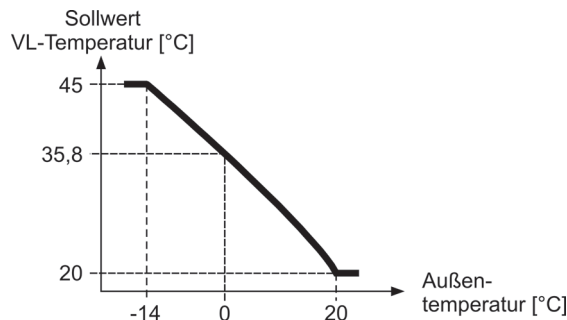


Abbildung 3a: Heizkennlinie

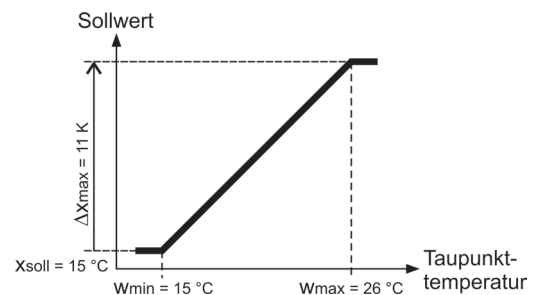


Abbildung 3b: Sollwertanhebung Kühlwassertemperatur

Steuerungslogik:

Zur Realisierung der Steuerung sind folgende logische Verknüpfungen notwendig:

1. Wenn das Einschaltsignal (ein/aus) gegeben, die Heizgrenztemperatur (Hg) unterschritten wurde und das Ausgangssignal y1 geschaltet hat, wird das Ventil v1 über das Signal Va1 (1 Bit) geöffnet.
2. Wenn das Einschaltsignal (ein/aus) gegeben, die Kühlgrenztemperatur (Kg) überschritten wurde und das Ausgangssignal y2 geschaltet hat, wird das Ventil v2 über das Signal Va2 (1 Bit) geöffnet.
3. Wenn Va1 oder Va2 eingeschaltet hat, wird die Pumpe P0 mit dem Signal Pa0 angesteuert.
4. Das Signal Abs (Sollwert-Absenkung) wird ausgegeben, wenn die Heizgrenze unterschritten wurde und das Schaltuhr-Signal eine 1 gesendet hat.
5. Wenn während des Kühlbetriebs (Kg) die absolute Feuchte xa größer als x1 oder die Enthalpie ha größer als h1 werden, wird ein Signal zur Minimierung des Luftwechsels (Lw) ausgegeben.
6. Wenn die Kühlgrenze (Kg) überschritten wurde, wird das 1 Byte-Regler-Ausgangssignal y0k auf das Signal V0a und damit auf das stetige Dreiwege-Stellventil v0 geschaltet. Anderenfalls wird das Dreiwegeventil vom Regler-Ausgang y0h angesteuert.
7. Wenn weder Hg noch Kg eine 1 sendet, wird über das 1 Bit-Signal sperr an beide Sperrobjekte der Regler eine 0 gesendet.

4. Parametereinstellungen:

In der nachfolgenden Tabelle werden nur Parameter-Einstellungen erwähnt, die zur Durchführung des beschriebenen Projektes erforderlich sind. Parameter, die für andere Funktionen der Enthalpie- oder Temperaturregler benötigt werden, bleiben unberücksichtigt.

Die konkreten Sollwerte für die Raum- und Vorlauf-Temperatur hängen von den Planungsvorgaben und von der Bemessung ab und sind hier nur beispielhaft zu betrachten.

Aufgrund der vielen unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Dynamik von Regelstrecken sind die genannten Einstellwerte für die PI-Regler (Proportionalbereich, Nachstellzeit) nur als Anfangswerte zu betrachten. Eine Qualifizierung der Einstellwerte bezüglich Regelgenauigkeit und Stabilität ist in der Anfangsphase des Normal-Betriebs (z. B. über ein Datenlogging) sehr zu empfehlen.

Die Einstellungen für die automatische, witterungsabhängige Umschaltung auf Heiz- bzw. Kühlbetrieb sind für ein mittelschweres Gebäude angegeben. Da die örtlichen Bedingungen (thermisch aktive Masse, innere und äußere Wärmegewinne, Verschattung u. a.) stark abweichen können sind die Parameter in Übereinstimmung mit dem Betreiber entsprechend zu korrigieren.

Gerät		Parameter		
Nr.	Name	Fenster	Name	Wert
B1	Enthalpie-Regler Raum	Allgemein	Regleranwendung	Enthalpieregler Raum
B1	Enthalpie-Regler Raum	Allgemein	Dateityp für Fließkommawerte	4 Byte
B1	Enthalpie-Regler Raum	Allgemein	Temperatur-Messwert senden bei Änderung von (K)	0,3
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur Soll/Ist	Auswahl Reglersequenz	Heizen und Kühlen
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur Soll/Ist	Totzone zwischen Heizen und Kühlen (K)	1
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur Soll/Ist	Sollwert (°C)	22
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur Soll/Ist	Sollwertabsenkung (K)	4
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur-Regler	Regler Ausgang Heizen	PI-Reglung, PWM
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur-Regler	Betriebsart (bei steigender Temperatur)	sinkende Stellgröße (Heizen normal)
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur-Regler	Proportionalbereich (K)	3
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur-Regler	Nachstellzeit (min)	120
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur-Regler	Zykluszeit für PWM (min)	15
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur-Regler	Regler Ausgang Kühlen	PI-Reglung, PWM
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur-Regler	Betriebsart (bei steigender Temperatur)	steigende Stellgröße (Kühlen normal)
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur-Regler	Proportionalbereich (K)	3
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur-Regler	Nachstellzeit (min)	120
B1	Enthalpie-Regler Raum	Temperatur-Regler	Zykluszeit für PWM (min)	15
B1	Enthalpie-Regler Raum	Werte-Nachführung und Frostschutz	Führungsgröße Minimum	28
B1	Enthalpie-Regler Raum	Werte-Nachführung und Frostschutz	Führungsgröße Maximum	36
B1	Enthalpie-Regler Raum	Werte-Nachführung und Frostschutz	Sollwertänderung bei maximaler Führungsgröße	8
B1	Enthalpie-Regler Raum	Werte-Nachführung und Frostschutz	Objektauswahl für Nachführung	Temperatur Sollwert
B1	Enthalpie-Regler Raum	Rechenwerte	Absolute Feuchte in g/kg	senden

Gerät		Parameter		
Nr.	Name	Fenster	Name	Wert
B1	Enthalpie-Regler Raum	Rechenwerte	Taupunkttemperatur	senden
B1	Enthalpie-Regler Raum	Rechenwerte	Enthalpie	senden
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Allgemein	Regleranwendung	Enthalpieregler Außen
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Allgemein	Dateityp für Fließkommawerte	4 Byte
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Allgemein	Alle Messwerte zyklisch senden (min)	10
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Allgemein	Temperatur-Messwert senden bei Änderung von (K)	0,3
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Auswahl Zusatzfunktionen	Statistik	ja
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Rechenwerte	Absolute Feuchte in g/kg	senden
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Rechenwerte	Enthalpie)	senden
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Statistik	gedämpfte und gemischte Temperatur senden	senden
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Statistik	Zeitkonstante Temperaturdämpfung (h)	20
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Statistik	Wichtungsfaktor Temperaturmischung	0,80
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Statistik	Heizgrenztemperatur (°C)	15
Ba	Enthalpie-Regler Außen	Statistik	Kühlgrenztemperatur (°C)	24
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Allgemein	Dateityp für Fließkommawerte	4 Byte
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Allgemein	Temperatur-Messwert senden bei Änderung von (K)	0,3
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Auswahl Zusatzfunktionen	Heizkurve	ja
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Regler Heizen	Sollwert (°C)	45
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Regler Heizen	Regler Ausgang	PI-Reglung, stetig
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Regler Heizen	Betriebsart (bei steigender Temperatur)	sinkende Stellgröße (Heizen normal)
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Regler Heizen	Proportionalbereich (K)	2
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Regler Heizen	Nachstellzeit /min)	15
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Regler Kühlen	Sollwert (°C)	15
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Regler Kühlen	Regler Ausgang	PI-Reglung, stetig
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Regler Kühlen	Betriebsart (bei steigender Temperatur)	steigende Stellgröße (Kühlen normal)
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Regler Kühlen	Proportionalbereich (K)	2
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Regler Kühlen	Nachstellzeit (min)	15
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Werte-Nachführung und Frostschutz	Führungsgröße Minimum	15

Gerät		Parameter		
Nr.	Name	Fenster	Name	Wert
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Werte-Nachführung und Frostschutz	Führungsgröße Maximum	26
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Werte-Nachführung und Frostschutz	Sollwertänderung bei maximaler Führungsgröße	11
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Werte-Nachführung und Frostschutz	Parameterauswahl für Nachführung	Sollwert Regler Kühlen
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Heizkurve	Norm-Innentemperatur (°C)	20
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Heizkurve	Norm-Außentemperatur (°C)	-14
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Heizkurve	Norm-Vorlauftemperatur (°C)	45
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Heizkurve	Norm-Rücklauftemperatur (°C)	35
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Heizkurve	Heizflächenexponent	1,15
B0	Temperatur-Regler Vorlauf	Heizkurve	Raumaufschaltung	Führungsraum