



WISSEN

Regeln und Steuern von Lüftungs- und Klimaanlagen

[siemens.com/buildingtechnologies](https://www.siemens.com/buildingtechnologies)

SIEMENS

Inhaltsverzeichnis

1	Temperaturregelung von lufttechnischen Anlagen	7
1.1.	Innere Wärmequellen.....	7
1.2.	Die Zulufttemperaturregelung	7
1.3.	Die Raumtemperaturregelung.....	9
1.4.	Die Ablufttemperaturregelung.....	10
1.5.	Die Raum-Zulufttemperatur-Kaskadenregelung	11
1.5.1.	Aufbau.....	11
1.5.2.	Arbeitsweise PI-PI-Kaskadenregelung.....	11
1.6.	Sequenzschaltung von Heizventil und Kühlventil.....	12
1.7.	Führen einer Temperaturregelung nach der Außentemperatur	13
1.8.	Minimalbegrenzung der Zulufttemperatur	14
2	Feuchteregelelungen	15
2.1.	Allgemeines.....	15
2.2.	Direkte, stetige Feuchteregelelung	15
2.2.1.	Allgemeines.....	15
2.2.2.	Klimaanlage mit Verdunstungsbeefeuchter	16
2.2.3.	Stetig regelbare Dampfbeefeuchtung	22
2.3.	Taupunktregelung	24
2.3.1.	Aufbau und Funktionsweise	24
2.3.2.	Anwendung	24
2.3.3.	Vergleich Direkte Feuchte- & Taupunktregelung	24
3	Bedarfsgeführte Luftqualitätsregelung.....	27
3.1.	Hoher Komfort bei tiefen Betriebskosten	27
3.2.	Raumluftqualität (Indoor Air Quality, IAQ).....	27
3.3.	Messgrößen CO ₂ , VOC.....	27
3.3.1.	CO ₂ (Kohlendioxid).....	27
3.3.2.	Mischgase / VOC	29
3.4.	Andere Indikatoren.....	30
3.5.	Luftqualitäts-Regelung	31
3.5.1.	Freigabestrategien	33
4	Regelung der Wärmerückgewinnung WRG.....	35
4.1.	Allgemeines.....	35
4.2.	Platten- oder Röhren-Wärmeübertrager (rekuperative WRG)	36
4.2.1.	Regelung.....	36
4.2.2.	Sequenzschaltung von WRG – Heizventil – Kühlventil.....	37
4.3.	Rotations-Wärmeübertrager (regenerative WRG)	38
4.3.1.	Regelung.....	38
4.4.	Kreislaufverbund System KVS (regenerative WRG).....	39
4.4.1.	Regelung.....	39

4.5.	Wärmerohre (Heat pipes).....	40
4.6.	Vereisungsschutz	40
4.6.1.	Platten- oder Röhren-Wärmeübertrager.....	40
4.6.2.	Kreislaufverbundsysteme (KVS).....	43
4.6.3.	Rotationswärmetauscher.....	44
4.7.	Kombination von WRG mit Umluftbeimischung.....	44
4.7.1.	Umluftbeimischung nach der WRG	44
4.8.	Umluftbeimischung	45
4.9.	Wärmepumpen.....	46
5	Teilklima-Anlagenkonzepte	47
5.1.	Aufbau und Anwendungsbereiche.....	47
5.1.1.	Temperaturregelung	47
5.1.2.	Feuchteregelung.....	47
5.1.3.	Zustandsänderungen im h,x-Diagramm	48
5.2.	Teilklimaanlage mit WRG - Heizen - Kühlen	51
5.3.	Teilklimaanlagen für Räume mit hohem innerem Feuchte-Anfall (Schwimmbad- Lüftungsanlagen).....	52
5.3.1.	Schwimmbad-Raumtemperatur- und Feuchteregelung mit Sollwertführung der rel. Raumfeuchte und WRG	52
5.4.	Teilklimaanlagen mit adiabater Kühlung.....	56
5.4.1.	Raumtemperaturregelung mit adiabater Kühlung.....	56
6	Vollklima-Anlagenkonzepte mit Wärmerückgewinnung	59
6.1.	Allgemeines	59
6.2.	Vollklimaanlage mit rekuperativer WRG - Kühlen - Heizen - Befeuchten (mit Dampf) - Entfeuchten	60
6.3.	Vollklimaanlage mit regenerativer WRG - Kühlen - Heizen - Befeuchten (stetig, adiab) - Entfeuchten	62
6.4.	Vergleich der verschiedenen Anlagenkonzepte bezüglich Energieverbrauch.....	63
6.5.	h,x-geführte Regelung (Economiser tx2).....	63
6.5.1.	tx2-Regelung	65
6.5.2.	tx2 ERG-Strategie	66
6.6.	DEC-Systeme.....	69
6.6.1.	Regelung von DEC-Systemen.....	70
7	Diverse Steuer- und Regelfunktionen	73
7.1.	Frostschutz	73
7.1.1.	Frostschutzthermostat	75
7.1.2.	Zweistufige Frostschutzfunktion	75
7.1.3.	Spezielle Frostschutz-Anfahrsteuerung.....	77
7.2.	Luftfilter-Überwachung	78
7.2.1.	Überwachung durch Filterwächter.....	78
7.2.2.	Überwachung mittels Druckdifferenzfühler.....	78
7.3.	Lüftungs- und Klimaanlagen mit Elektro-Lufterwärmer	80
7.4.	Quell-Lüftung	81
7.4.1.	Kombination von Quell-Lüftung und Kühldecke (Taupunkt).....	82

7.5.	Druck- und Volumenstromregelungen in Lüftungsanlagen	86
7.5.1.	Regelung des Zuluftdruckes	86
7.5.2.	Überdruck- oder Unterdruckregelung eines Raumes.....	87
7.5.3.	Luftvolumenstromregelung.....	88
7.6.	Kühlung durch intensive Nachtlüftung.....	89
7.7.	Brandfallsteuerung	90
7.7.1.	Brandabschaltung	90
7.7.2.	Entrauchungsbetrieb	90
8	Regeln und Steuern der Luftnachbehandlung	91
8.1.	Allgemeines.....	91
8.2.	Einkanal-Anlage mit Zonen-Nachbehandlung.....	91
8.3.	Mehrzonen-Anlage mit Mehrzonenzentrale	93
8.4.	Zweikanal-Anlagen.....	94
8.5.	VVS (Variabler Volumen-Strom) Anlagen	95
8.5.1.	Einzelraum-Temperaturregelung mit VVS	96
8.5.2.	Bedarfsgeführte Ventilator-Regelung - Fan Opti Control	98
8.5.3.	Konstante statische Druckregelung in den Luft-Kanälen	99
8.6.	Wasseranschlusssysteme.....	101
8.6.1.	Zweileitersystem	101
8.6.2.	Vierleitersystem.....	101
8.7.	Ventilator-Konvektor-Anlagen	101
8.8.	Induktionsanlagen	103
8.9.	Sollwertführung der Vorlauftemperaturen	104
8.10.	Einzelraum-Kompakt-Klimageräte	105
8.10.1.	Fenster-Klimageräte.....	105
8.10.2.	Truhenklimageräte	105
8.10.3.	Split-Klimageräte.....	105
8.11.	VRV- VRF	106

1 Temperaturregelung von lufttechnischen Anlagen

1.1. Innere Wärmequellen

Soll eine Raumtemperatur konstant gehalten werden, so sind die inneren Wärmequellen während der Kühlperiode Störgrößen, welche mit hohem Energieaufwand weggekühlt werden müssen. Während der ganzen Heizperiode hingegen können die inneren Wärmequellen als Heizenergie genutzt werden. Aus regeltechnischer Sicht können dabei die folgenden drei Wärmequellen wirksam sein:

- Wärmeabgabe von Heizkörpern (Grundlastheizung)
- Wärmezufuhr der Lüftungsanlage
- Innere Wärmequellen (Personen, Geräte, Beleuchtung, Sonneneinstrahlung etc.)

Bei richtiger Aufteilung der Wärmezufuhr auf die Grundlastheizung einerseits und die Lüftungsanlage - unter sorgfältiger Berücksichtigung der inneren Wärmequellen - andererseits, sollte es deshalb keine großen regeltechnischen Probleme geben.

1.2. Die Zulufttemperaturregelung

In Fig. 1-1 hat eine einfache Lüftungsanlage die Aufgabe, einen Raum ohne inneren Wärmeanfall mit Außenluft zu versorgen, während die Raumheizung selbst mittels Radiatoren erfolgt. Damit die Raumtemperatur bei der tiefsten Außentemperatur konstant auf z. B. 21 °C bleibt, muss die Radiatorheizung 100 % der Heizlast aufbringen, d.h. alle Wärmeverluste decken, sowie die Zuluft mit einer Temperatur von 21 °C eingeblasen werden. Die Lüftungsanlage trägt in diesem Falle nichts zur Raumheizung bei. Sie hat lediglich die Aufgabe der Lufterneuerung und damit der Außenlufterwärmung auf die Raumtemperatur.

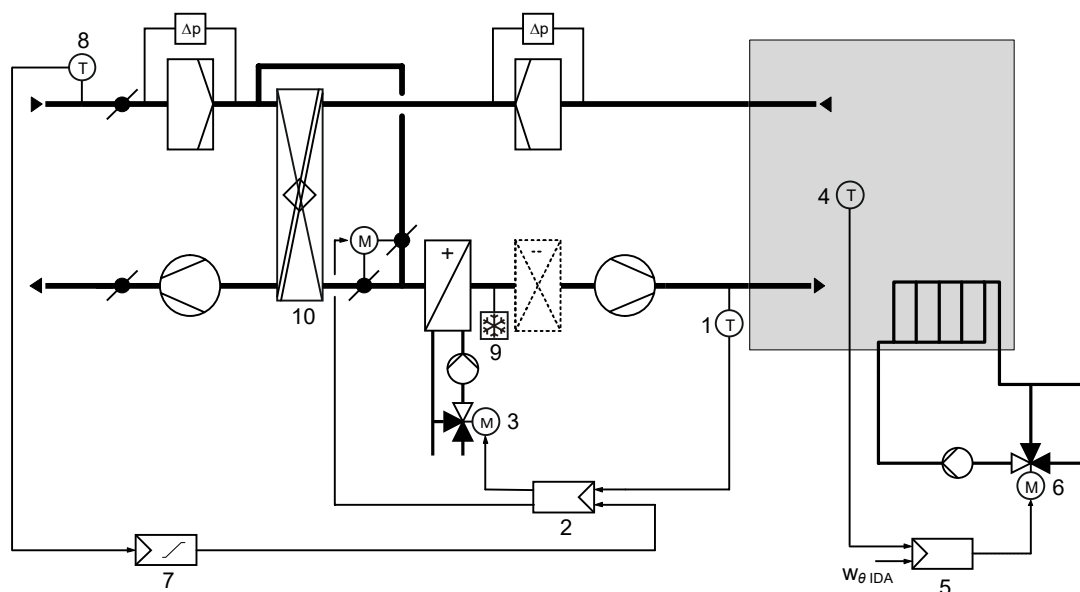


Fig. 1-1 Zulufttemperaturregelung mit Grundlastheizung

- | | | | |
|---|-----------------------------|----|--------------------------------|
| 1 | Zulufttemperaturfühler | 6 | Stellantrieb mit Heizventil |
| 2 | Zulufttemperaturregler | 7 | Zulufttemperatur-Führungsgeber |
| 3 | Stellantrieb mit Heizventil | 8 | Außentemperatur-Fühler |
| 4 | Raumtemperaturfühler | 9 | Frostschutzthermostat |
| 5 | Raumtemperaturregler | 10 | WRG-Plattentaucher mit Bypass |

Die Regelung der ganzen Anlage geschieht wie folgt:

- Für die Lüftungsanlage wird die sogenannte Zulufttemperaturregelung gewählt, d.h. der Temperaturfühler für die Lüftungsanlage ist im Zuluftkanal montiert. Der stetige Temperaturregler (2) vergleicht die vom Fühler (1) gemessene Temperatur mit dem Sollwert. Bei einer Abweichung bewirkt der Regler in einer ersten Sequenz das Verstellen der WRG- Bypass-Klappen(10). In einer zweiten Sequenz bewirkt die Abweichung das Verstellen des Heizventils (3) so, dass eine konstante Zulufttemperatur erreicht wird. Der Sollwert der Zulufttemperatur darf nur dann auf den gleichen Wert wie die Raumtemperatur eingestellt werden, wenn keine innere Wärme anfällt. Andernfalls ist die Zulufttemperatur entsprechend tiefer einzustellen, jedoch nicht so tief, dass Zuglufterscheinungen auftreten. Die Leistung des Lufterwärmers muss so ausgelegt sein, dass sie auch bei tiefster Außentemperatur, den für die Lüftung notwendigen Außenluftvolumenstrom auf den eingestellten Sollwert bringen kann.
- Weil die im Raum eventuell auftretende innere Wärme nur mit einem Raumtemperaturfühler (4) erfasst werden kann, muss für die Radiatorenheizung die Raumtemperaturregelung vorgesehen werden.
- Ist die Zulufttemperatur infolge des inneren Wärmeanfalls tiefer eingestellt als die Raumtemperatur, so sinkt letztere ab, wenn die inneren Wärmequellen ausbleiben. In diesem Falle muss die Radiatorenheizung, nebst der eigentlichen Heizlast, zusätzlich auch die Erwärmung der kälteren Zuluft auf die gewünschte Raumtemperatur übernehmen können.

Diese Art der Regelung darf nur bei Anlagen mit kleinerem innerem Wärmeanfall angewendet werden. Bei größeren und unregelmäßig auftretenden inneren Wärmequellen im Raum senkt der Raumtemperaturregler (5) die Heizkörpertemperatur jeweils entsprechend stark ab. Oftmals ergibt sich dann so mehr oder weniger ein Auf/Zu-Betrieb der Radiatorenheizung mit entsprechender Temperaturschwankung im Raum. Zudem entfällt bei kalten Radiatoren der Warmluftschleier vor den Fenstern, wodurch ein unbehaglicher Zustand entsteht (Zugerscheinung durch Kaltluftabfall an den Fenstern).

Soll im Sommer auch gekühlt werden, so können keine Garantien für die Raumtemperatur abgegeben werden. Meist ist es dann vorteilhaft, den Sollwert der Zulufttemperatur mit einem Führungsgeber (7) in Abhängigkeit von der Außentemperatur zu führen (siehe 1.7).

Die Zulufttemperaturregelung wird dort angewendet, wo die Lüftungsanlage hauptsächlich der Lufterneuerung dient:

- Vor allem mit der Belüftung von Küchen, Restaurants, Garagen, Turnhallen, usw. soll die schlechte Raumlufte erneuert werden. Die Raumtemperatur selbst kann dabei von untergeordneter Bedeutung sein.
- Für andere Räume, wie Werkstätten, Werkhallen, Lagerräume usw. kann während der Heizperiode mit der Zulufttemperaturregelung eine konstante Raumtemperatur gewährleistet werden, wenn im betreffenden Raum keine veränderliche innere Wärmequelle, dafür aber eine regelbare Grundlastheizung vorhanden ist. Diese Grundlastheizung (z. B. Radiatorenheizung) muss nach der Raumtemperatur geregelt werden.
- Zur besseren Anpassung der Zulufttemperatur an die Wärmeverluste des belüfteten Raumes kann die Zulufttemperatur nach der Außentemperatur geführt werden.

1.3. Die Raumtemperaturregelung

Tritt in einem Raum eine größere innere Wärmemenge auf, so muss diese aus wirtschaftlichen Gründen zur Beheizung des Raumes genutzt werden, d.h. sie muss in die Regelung der Lüftungsanlage einbezogen werden. Dies geschieht mit der Raumtemperaturregelung gemäß Fig. 1-2.

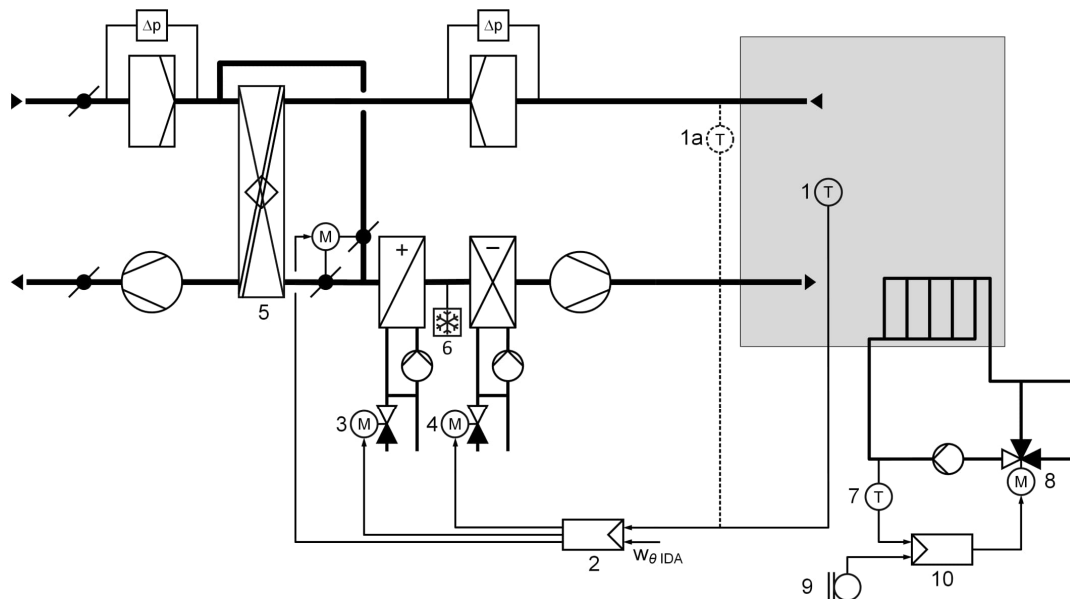


Fig. 1-2 Raumtemperaturregelung mit Grundlastheizung

1	Raumtemperaturfühler	1a	Ablufttemperaturfühler (Alternative zu 1)
2	Raumtemperaturregler	7	Vorlauftemperaturfühler
3	Stellantrieb mit Heizventil	8	Stellantrieb mit Heizventil
4	Stellantrieb mit Kühlventil	9	Außentemperaturfühler
5	WRG-Plattentaucher	10	Vorlauftemperaturregler
6	Frostschutzthermostat		

Die Regelung dieser Anlage funktioniert wie folgt:

- Die Zulufttemperatur wird nicht mehr auf einen konstanten Wert geregelt, sondern raumtemperaturabhängig, d.h. der stetige Regler (2) vergleicht die vom Fühler (1) gemessene Raumtemperatur mit dem Sollwert. Bei einer Abweichung bewirkt der Regler das Verstellen der WRG-Bypass-Klappen (5), des Heizventils (3) oder des Kühlventils (4). Je höher z. B. die Raumtemperatur infolge innerer Wärmequellen ansteigt, desto kälter wird die Zuluft eingeblasen, so dass die Raumtemperatur konstant auf ihrem gewählten Wert bleibt.
- Um Energie einsparen zu können, muss die Grundlastheizung bei einem inneren Wärmeeinfall reduziert werden. Die Heizleistung der Radiatoren wird aber nur so stark reduziert, dass auch bei ungünstigen Verhältnissen der Warmluftschleier vor den Fenstern gerade noch sichergestellt ist. Im Allgemeinen legt man hierfür die Radiatorenheizung für eine Raumtemperatur von etwa 14...16 °C aus. Die Regelung der Radiatorenheizung muss dabei unbedingt witterungsabhängig erfolgen (vgl. 9 in Fig. 1-2).
- Durch die Herabsetzung der Wärmeleistung der Radiatoren kann der Raum bei einem eventuellen Ausbleiben der inneren Wärmequellen nicht mehr genügend geheizt werden. Die fehlende Heizleistung muss deshalb vom Lufterwärmer übernommen werden.
- Die Heizleistung lässt sich demnach wie folgt aufteilen:
 - Wärmeleistung der Radiatorenheizung (Grundlastheizung)
 - + Wärmeleistung der Lüftungsanlage
 - + Innere Wärmequellen
 - = 100 % Heizleistung

Die Raumtemperaturregelung der Lüftungsanlage wird angewendet für die Heizung und Belüftung von Büro-, Konferenz-, Verkaufs- und Lagerräumen, Werkstätten und ähnlichen Räumen mit oder ohne innere Wärmequellen. Die Heizlast kann in einem beliebigen Verhältnis auf die Grundlastheizung und die Lüftungsanlage aufgeteilt werden (Luftschleier!).

Die Regelung der Grundlastheizung darf jedoch nicht auch als Raumtemperaturregelung erfolgen, da sich sonst die beiden Raumtemperatur-Regelkreise gegenseitig störend beeinflussen würden. Der Vorteil der Raumtemperaturregelung gegenüber der Zulufttemperaturregelung liegt vor allem in der Ausregelgeschwindigkeit von Störungen, die innerhalb des belüfteten Raumes auftreten:

- Bei der Zulufttemperaturregelung (vgl. 1.2) wird eine im Raum auftretende Störung vom Temperaturfühler der Radiatorenheizung erfasst. Weil diese Heizung allgemein träge ist, dauert es relativ lange, bis die Störung beseitigt ist.
- Bei der Raumtemperaturregelung hingegen wird die Störung vom Temperaturfühler der Lüftungsanlage erfasst. Da die Luft im Raum pro Stunde mehrmals umgewälzt wird (Luftwechselzahl), erfolgt eine, im Verhältnis zur Radiatorenheizung, schnelle Beseitigung der Störung. Störungen hingegen, die über die Zuluft in den Raum gelangen, werden wegen der Zeitkonstante des Raumes nur relativ träge ausgeregelt. Solche Störungen können unter anderem sein:
 - Schnelle Außentemperatur-Änderung
 - Schwankung der Versorgungstemperatur für die Wärmetauscher
 - Ein- und Ausschalten eines Luftbefeuchters (z.B. Verdunstungsbefeuchter)
 - Stellungsänderung von Luftklappen, die von einem Hygrostaten gesteuert werden.

1.4. Die Ablufttemperaturregelung

Die Ablufttemperaturregelung hat grundsätzlich die gleiche Aufgabe wie die Raumtemperaturregelung, nur ist der Temperaturfühler 1a im Abluftkanal montiert (in Fig. 1-2, gestrichelt gezeichnet). Dazu sind unter anderen folgende Punkte zu beachten:

- Die Ablufttemperaturmessung liefert nur eine aussagekräftige Information, wenn die Anlage in Betrieb ist und Luft umgewälzt wird.
- Der im Abluftkanal montierte Temperaturfühler misst die durchschnittliche Lufttemperatur, während ein Raumtemperaturfühler nebst der Raumlufttemperatur auch einen gewissen Anteil an Strahlungswärme z. B. von der Wandtemperatur erfasst. Dadurch wird den Anforderungen an die Behaglichkeit besser entsprochen. Dafür wird die Ausgleichszeit der Regelstrecke (T_g) bei der Ablufttemperaturregelung kürzer, weil der Fühler bei höherer Strömungsgeschwindigkeit schneller reagiert. Die Verzugszeit T_v der Regelstrecke wird dadurch aber nicht verkürzt und deshalb wird der Schwierigkeitsgrad S der Regelstrecke größer ($S = T_v/T_g$).
- Die Ablufttemperaturregelung wird dort bevorzugt, wo die richtige Platzierung eines Raumtemperaturfühlers problematisch ist oder wo nur die Raumlufttemperatur, ohne Strahlungsanteil, die wesentliche Rolle spielt (z. B. in Labors, Operationssälen usw.).

1.5. Die Raum-Zulufttemperatur-Kaskadenregelung

Wie unter 1.3 erklärt, können bei einer Raumtemperaturregelung Störungen durch die Zuluft erst vom Raumtemperaturfühler erfasst und ausgeglichen werden. Dieser Nachteil wird durch die Kaskadenregelung kompensiert. Zudem ermöglicht sie eine bessere Beherrschung schwieriger Regelstrecken.

1.5.1. Aufbau

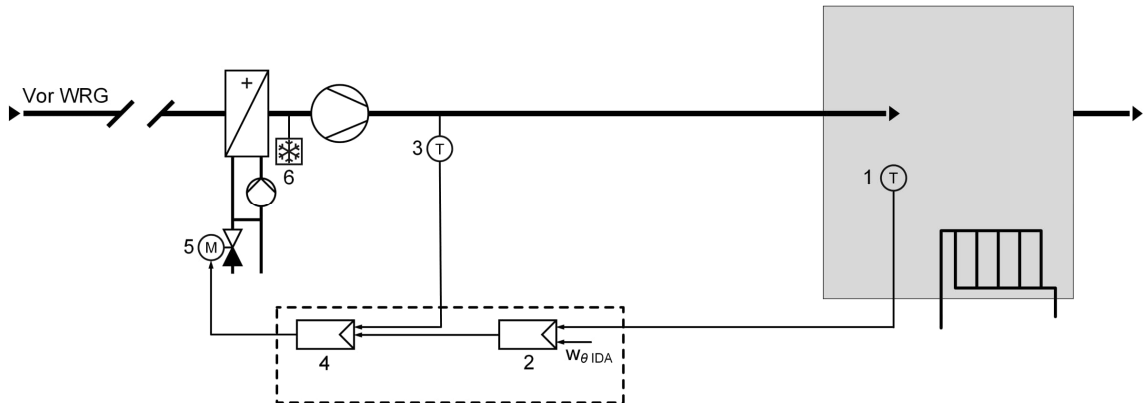


Fig. 1-3 Raum-Zulufttemperatur-Kaskadenregelung

1	Raumtemperaturfühler	5	Heizventil mit Stellantrieb
2	Raumtemperatur-Regler (Hauptregler)	6	Frostschutzthermostat
3	Zulufttemperaturfühler	1-2	Haupt- oder Führungsregelkreis
4	Zulufttemperatur-Regler (Hilfsregler)	3-4-5	Hilfs- oder Folgeregelkreis

Haupt-/Führungsregelkreis

Der Haupt- oder Führungsregelkreis besteht aus dem Raumtemperaturregler (2), dem Raumtemperaturfühler (1), dem zugehörigen Sollwert ($w_{\theta IDA}$) und der Regelstrecke, welche vom Zuluftfühler über das Kanalnetz bis und mit Raumtemperaturfühler verläuft. Die Zulufttemperatur hat also hier die Bedeutung der Stellgröße y des Hauptreglers. Statt einen Stellantrieb zu verstellen, wird der Sollwert der Zulufttemperatur verändert und dadurch eine Korrektur der Raumtemperaturabweichung eingeleitet.

Hilfs-/Folgeregelkreis

Der Hilfs- oder Folgeregelkreis wird gebildet aus dem Zulufttemperaturregler (4), dem Zulufttemperaturfühler (3), dem Heizventil mit Stellantrieb (5) als Stellgerät und der Regelstrecke zwischen Heizventil und Zulufttemperaturfühler, sowie der Stellgröße des Raumtemperaturreglers (2), als Sollwertvorgabe für die Zulufttemperatur.

1.5.2. Arbeitsweise PI-PI-Kaskadenregelung

- Der Hauptregler (2, PI-Regler) erfasst über den Fühler (1) die Raumtemperatur. Sobald eine Abweichung vom Sollwert ($w_{\theta IDA}$) auftritt, ändert der Hilfsregler (4, PI-Regler) die Zulufttemperatur mit Hilfe des Zulufttemperaturfühlers (5) entsprechend dem vom Raumtemperaturregler (2) vorgegebenen Sollwert. Störgrößen der Zulufttemperatur werden vom Zulufttemperaturfühler erfasst und durch den Hilfsregler lastunabhängig auskorrigiert, bevor sie die Raumtemperatur beeinflussen können. Dieses Fernhalten von Störungen der Raumtemperatur durch die Zulufttemperatur erleichtert die Aufgabe des Hauptreglers. Dieser muss folglich nur noch Störungen, die im Raum selbst auftreten, ausregeln.
- Bei einer Differenz der Raumtemperatur (1) zum Sollwert ($w_{\theta IDA}$) verschiebt der Hauptregler (2, PI-Regler) entsprechend dieser Regeldifferenz den Sollwert der Zulufttemperatur in entgegengesetzter Richtung.
- Der Hilfsregler (4) erfasst über den Fühler (3) die Zulufttemperatur, vergleicht sie mit dem neuen Sollwert und verstellt das Ventil (5) so lange, bis die geforderte Zulufttemperatur wieder erreicht ist.

Zusammenfassend kann über die PI+PI-Kaskadenregelung also gesagt werden:
Der Hauptregler verschiebt den Sollwert der Zulufttemperatur basierend auf der Abweichung der Raumtemperatur zum gewünschten Raumtemperatur-Sollwert.
Die Zulufttemperatur wird vom PI-Hilfsregler lastunabhängig ausgegeregelt. Störgrößen der Zuluftstrecke werden auskorrigiert, bevor sie die Raumtemperatur beeinflussen können. In der HLK-Technik werden der Haupt- und der Hilfsregler zu einem einzigen Regelgerät oder Funktionsblock (in der Regler-Software) zusammengefasst (Fig. 1-3, gestrichelte Umrandung).

1.6. Sequenzschaltung von Heizventil und Kühlventil

Die Anlage gemäß Fig. 1-4 ist mit einem Lufterwärmer und einem Luftkühler ausgerüstet. Dadurch kann die Raumtemperatur nicht nur im Winter, sondern auch im Sommer und bei innerem Wärmeanfall auf einem gewünschten Wert ($w_{\theta IDA}$) gehalten werden.

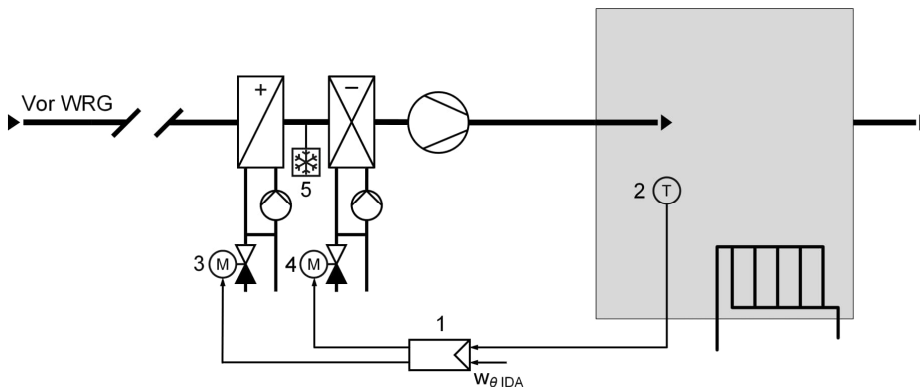


Fig. 1-4 Lüftungsanlage mit Lufterwärmer und Luftkühler

- | | | | |
|---|----------------------|---|-----------------------|
| 1 | Temperaturregler | 4 | Kühlventil |
| 2 | Raumtemperaturfühler | 5 | Frostschutzthermostat |
| 3 | Heizventil | | |

Der Temperaturregler (1) vergleicht die vom Fühler (2) gemessene Raumtemperatur mit dem eingestellten Sollwert $w_{\theta IDA}$. Bei einer Abweichung (Fig. 1-5 a) verstellt der Regler das Heizventil (3) bzw. das Kühlventil (4) so lange, bis der Raumtemperatur-Sollwert wieder erreicht ist. Die Raumtemperatur wird somit im Heiz- und Kühlbetrieb auf denselben Sollwert $w_{\theta IDA}$ geregelt. Das Stellsignal wird aufgeteilt und die Reihenfolge (Sequenz), in der die Aggregate (Lufterwärmer resp. Luftkühler) bedient werden, festgelegt. Das Stellsignal wird gezeichnet, als ob es ein P-Regler wäre (Regelkennlinie).

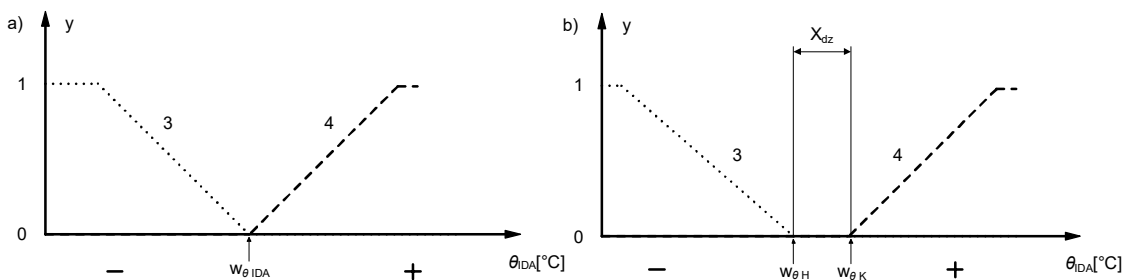


Fig. 1-5 Sequenzschaltung Heizventil – Kühlventil

a) Heizen - Kühlen ohne energiefreie Zone (Totzone)

b) Heizen - Kühlen mit energiefreier Zone (Totzone)

- θ_{IDA} Raumlufttemperatur (- = Heizlast, + = Kühllast)
3 Stellsignal Heizventil
4 Stellsignal Kühlventil
 $w_{\theta IDA}$ Raumtemperatur-Sollwert

- $w_{\theta H}$ Heiz-Sollwert
 $w_{\theta K}$ Kühl-Sollwert
 X_{dz} energiefreie Zone (Totzone)

Heute wird meistens die Möglichkeit genutzt, im Kühlbetrieb die Raumtemperatur, um z.B. 4 K über den Heiz-Sollwert w_H ansteigen zu lassen, bevor das Kühlventil zu öffnen beginnt (Fig. 1-5 b). Das Trennen von Heiz- und Kühlbetrieb durch die sogenannte energiefreie Zone x_{dz} (Totzone) hat zum Zweck, Kühlenergie zu sparen. Dies bedeutet, dass der Regler im Heizbetrieb auf den tieferen Heiz-Sollwert ($w_{\theta H}$) und im Kühlbetrieb auf den höheren Kühl-Sollwert ($w_{\theta K}$) regelt.

1.7. Führen einer Temperaturregelung nach der Außentemperatur

In Lüftungs- und Klimaanlage kann der Sollwert einer Raum-, Abluft-, Zuluft- oder Kaskadenregelung nach der Außentemperatur geführt werden. Dies bedeutet, dass der Sollwert der Temperaturregelung, innerhalb eines bestimmten Bereiches der Außentemperatur, stetig verändert wird.

Das Führen eines Raumtemperatur-Sollwertes nach der Außentemperatur hat folgende Gründe:

- Im Sommerbetrieb wird der betreffende Temperatur-Sollwert, während einem Außentemperaturanstieg von z. B. 20 °C auf 32 °C, stetig erhöht (Sommer-Kompensation), um zu große Temperatur-Unterschiede zwischen Raum- und Außentemperatur und damit die Gefahr eines Hitze-/Kälteschocks zu vermeiden. Außerdem wird dadurch der Kühlernergieaufwand substantiell reduziert.
- Gemäß VDI-Lüftungsregeln soll bei einer Außentemperatur von 32 °C die Raumtemperatur auf max. 26 °C angehoben werden. Für den Außentemperatur-Bereich von 20 °C bis 32 °C gelten nach VDI folgende Raumtemperatur-Sollwerte:

Außentemperatur [°C]	20	22	24	26	28	30	32	34
Raumtemperatur [°C]	20	21	22	23	24	25	26	26

- Im Winterbetrieb wird in gewissen Fällen (schlecht gedämmt Gebäude) bei Außentemperaturen unter z. B. 0 °C der Sollwert der Raumtemperaturregelung ebenfalls stetig erhöht (Winter-Kompensation), um den Einfluss der tieferen Oberflächentemperaturen von Raumwänden und Fenstern auf die Behaglichkeit (Wärmeabstrahlung) zu kompensieren.
- Fig. 1-6 zeigt das Prinzipschema einer Raumtemperaturregelung mit Führung nach der Außentemperatur. Die vom Temperaturfühler (3) gemessene Außentemperatur bewirkt im Temperaturregler (1) eine gleitende Sollwertveränderung. Im Regler (1) können die temperaturabhängigen Sollwerte eingestellt werden.

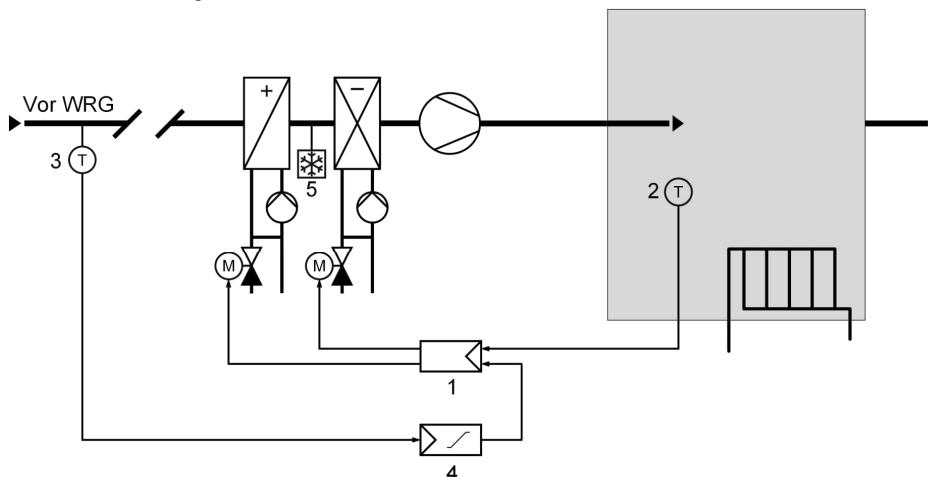


Fig. 1-6 Raumtemperaturregelung, geführt nach der Außentemperatur

- 1 Temperaturregler mit Außentemperatur-Führung
- 2 Raumtemperaturfühler
- 3 Außentemperaturfühler
- 4 Sollwert-Führungsgeber
- 5 Frostschutzthermostat

Fig. 1-7 zeigt das Wirkdiagramm einer Raumtemperaturregelung mit Führung nach der Außentemperatur für den Kühlfall.

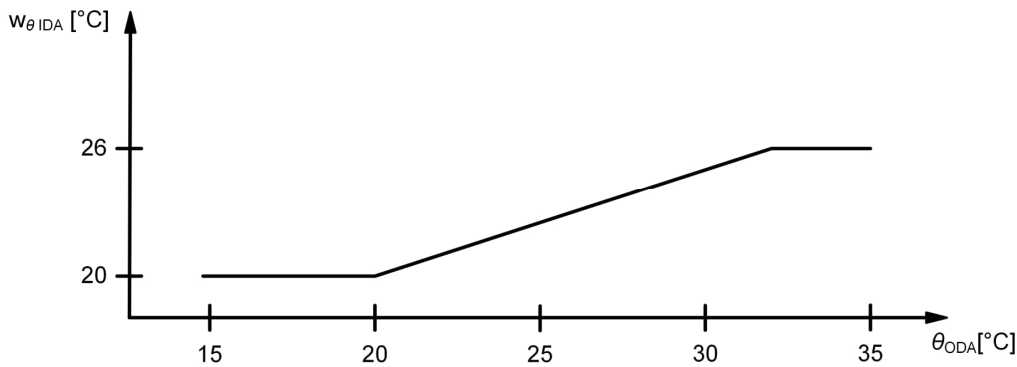


Fig. 1-7 Außentemperatur-Führungseinfluss (Kühlfall gem. VDI)

θ_{ODA} Außentemperatur
 $w_{\theta IDA}$ Raumtemperatur-Sollwert

1.8. Minimalbegrenzung der Zulufttemperatur

In Lüftungs- und Klimaanlage mit Raumtemperaturregelung begrenzt ein Temperaturregler mit seinem Fühler im Zuluftkanal die Zulufttemperatur auf einen minimalen Wert (Fig. 1-8). Dies ist dort erforderlich, wo infolge großen inneren Wärmeeinflusses der Regler die Zulufttemperatur stark absenken will, um die eingestellte Raumtemperatur einzuhalten. Ohne diese Begrenzung würde die Zulufttemperatur so tiefe Werte erreichen, dass unbehagliche oder gar gesundheitsschädigende Zugerscheinungen auftreten.

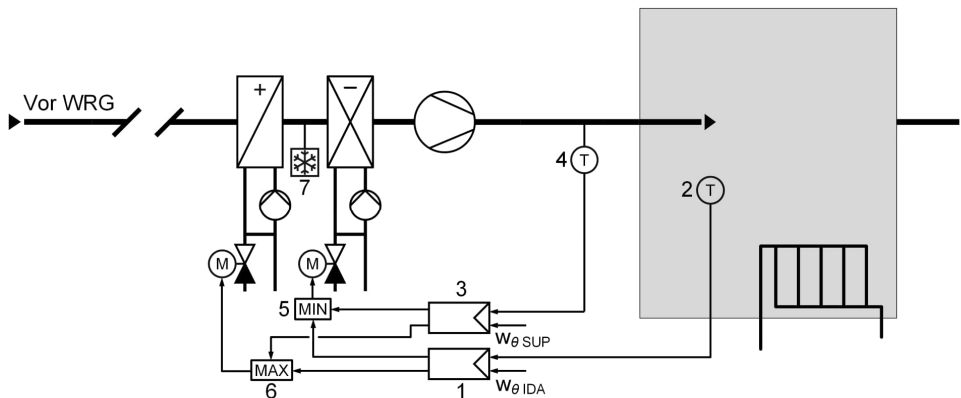


Fig. 1-8 Raumtemperaturregelung mit Minimalbegrenzung der Zulufttemperatur

- | | | | |
|---|--------------------------|---|---------------------------|
| 1 | Raumtemperaturregler | 5 | Vorrangauswahl Heizventil |
| 2 | Raumtemperaturfühler | 6 | Vorrangauswahl Kühlventil |
| 3 | Minimalbegrenzungsregler | 7 | Frostschutzthermostat |
| 4 | Zulufttemperaturfühler | | |

Die Minimalbegrenzung der Zulufttemperatur wird wie folgt verwirklicht:

Der Zulufttemperaturfühler (4) wird im Zuluftkanal in der Nähe der Einblasöffnung montiert und auf den Begrenzungsregler (3) aufgeschaltet. Der Begrenzungswert wird im Regler auf z.B. 17 ... 18 °C eingestellt. Er muss so tief sein, dass einerseits die innere Wärme abgeführt werden kann, andererseits aber noch keine Zugerscheinungen auftreten können. Unterschreitet die Zulufttemperatur den eingestellten Begrenzungswert, so übernimmt der Begrenzungsregler (3) über die Vorrangauswahl „MIN“ das Schließen des Kühlventils und über die Vorrangauswahl „MAX“ das Öffnen des Heizventils und verhindert so ein weiteres Absinken der Zulufttemperatur. Bei Erreichen des Begrenzungswertes schaltet dieses Regelkonzept von Raumtemperatur- auf Zulufttemperaturregelung um, wodurch die Zulufttemperatur auf dem Begrenzungswert konstant gehalten wird.

2 Feuchteregelelungen

2.1. Allgemeines

Eine Klimaanlage hat die Aufgabe, im belüfteten Raum (oder Räumen) die Temperatur und die relative Feuchte der Luft auf vorgegebenen Werten konstant, oder innerhalb vorgegebener Grenzen zu halten, unabhängig vom Zustand der Außenluft und den Vorgängen im Raum. Es werden deshalb Verfahren und geeignete Regelsysteme zum Erwärmen, Kühlen, Be- und Entfeuchten der Luft angewendet.

Die direkte Feuchteregelelung mit einem Relativ-Feuchtefühler im betreffenden Raum kommt heute normalerweise zur Anwendung.

Die indirekte Feuchteregelelung über die Taupunkttemperatur des gewünschten Raumluftzustandes oder über den Wasserdampfgehalt x der Zuluft wird heute nicht mehr ausgeführt. Deshalb wird die Taupunktregelung nur noch der Vollständigkeit halber mit einer kurzen Erklärung unter 2.3 erläutert.

2.2. Direkte, stetige Feuchteregelelung

2.2.1. Allgemeines

Anwendung

Die direkte Feuchteregelelung wird dort angewendet, wo die eingestellten Sollwerte der Raumtemperatur und der relativen Raumfeuchte, bei jedem Außenluftzustand und bei innerem Wärme- und Fremdfeuchte-Anfall im Raum, genau eingehalten werden sollen.

Aufbau

Wenn eine Klimaanlage die Raumtemperatur und die relative Raumfeuchte genau gewährleisten soll, so ist dies nur durch den Einsatz eines Temperatur-Regelkreises mit einem Raumtemperaturfühler, und eines Feuchte-Regelkreises mit einem Feuchtefühler im zu klimatisierenden Raum oder in dessen Abluft möglich (Fig. 2-1). Dabei wirken die Stellsignale des Raumtemperaturreglers (2) in Sequenz auf das Heizventil und das Kühlventil und diejenigen des Feuchtereglers (4) auf das Befeuchterventil und - in Vorrangschaltung (5) zwecks Entfeuchtung - ebenfalls auf das Kühlventil.

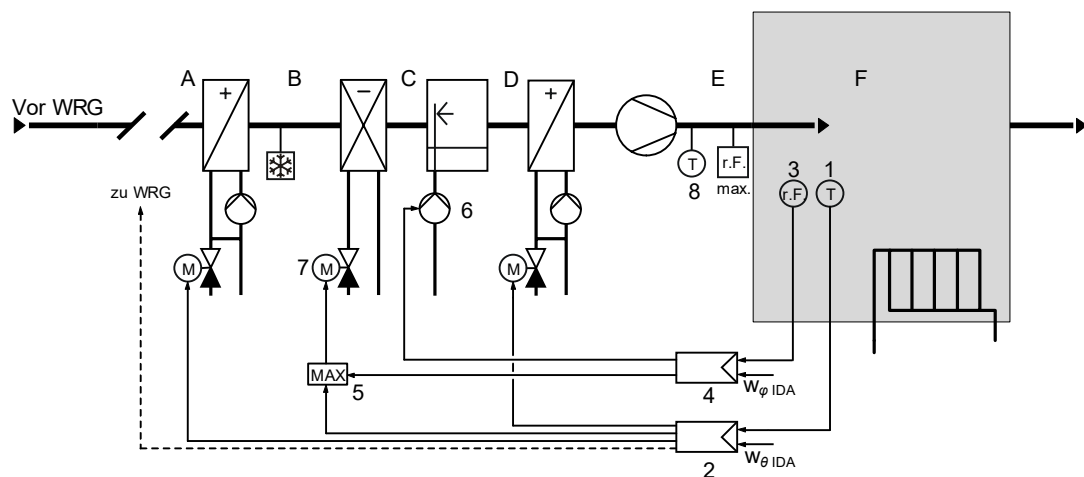


Fig. 2-1 Klimaanlage mit Verdunstungsbefeuchter mit direkter Feuchteregelelung

- | | | | |
|------|----------------------|---|-------------------------|
| 1 | Raumtemperaturfühler | 5 | Vorrangwähler |
| 2 | Raumtemperaturregler | 6 | Befeuchterventil/-pumpe |
| 3 | Raumfeuchtefühler | 7 | Kühlventil |
| 4 | Feuchteregeleler | 8 | Zulufttemperaturfühler |
| A..F | Luftzustände | | |

Die Befeuchtung wird hauptsächlich mit den folgenden Befeuchtertypen ausgeführt:

- Regelbarer Verdunstungsbefeuchter, z.B. Rieselbefeuchter, ... (vgl. 2.2.2)
- Regelbare Dampfbefeuchtung (vgl. 2.2.3)

Beide Arten bieten die Möglichkeit, die Befeuchtung nach absoluter oder relativer Feuchte zu regeln.

Der Luftkühler hat die Doppelfunktion Kühlen (vom Temperaturregler 2 geregelt) und Entfeuchten (vom Feuchteregler 4 geregelt). Deshalb muss er vor dem Nachwärmer und dem Befeuchter angeordnet werden. Je nach Betriebszustand muss gekühlt (Temperaturregler), befeuchtet oder entfeuchtet (Feuchteregler) und nachgewärmt (Temperaturregler) werden können. Die Reihenfolge Befeuchter - Nachwärmer kann auch getauscht werden. Dies führt zu keiner Beeinträchtigung der Anlage, jedoch bedingt es, dass der Lufterwärmer mit höheren Vorlauf- und Rücklauftemperaturen betrieben werden muss.

Für eine konstante Raumtemperatur sorgt der Temperaturregler (2) mit dem Temperaturfühler (1), der das Nachwärmerventil und über den Vorrangwähler (5) das Kühlventil (7) ansteuert. Der Sollwert des Temperaturreglers kann mit einem Führungsgeber nach der Außentemperatur geführt werden. Zusätzlich kann auch ein Minimalbegrenzer der Zulufttemperatur (mit Fühler 8) eingesetzt werden.

Die Feuchteregelung erfolgt durch den Feuchteregler (4) mit dem Feuchtefühler (3), sowie mit dem Befeuchterventil-/pumpe (6) und dem Kühlventil (7, für Entfeuchtung) als Stellgeräte. Weil sowohl der Temperatur- wie auch der Feuchteregler auf das Kühlventil arbeiten, muss dieses über den Vorrangwähler (5) automatisch immer demjenigen Regler mit dem größeren Stellsignal zugeordnet werden, d. h. dem, welcher die größere Kühlleistung fordert.

2.2.2. Klimaanlage mit Verdunstungsbefeuchter

Durch den Feuchteregler (4, Fig. 2-1) werden in Abhängigkeit der relativen Raumfeuchte (3) die Wassermenge und die internen Sprühkreise geregelt. Um eine präzise Feuchteregelung sicherzustellen, werden z.B. in einer ersten Phase die einzelnen Sprühkreise durchfahren, bevor die drehzahlgeregelte Befeuchtungspumpe eingeschaltet wird (Fig. 2-3).



Fig. 2-2 Hybrid-Verdunstungsbefeuchter (Quelle: Condair)

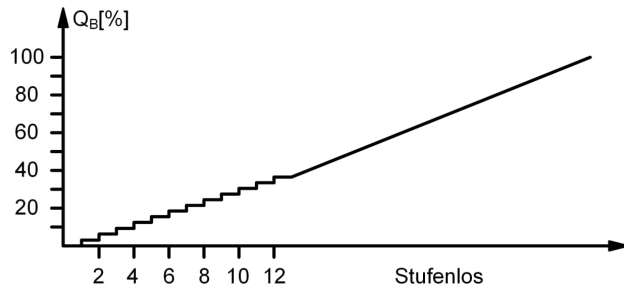


Fig. 2-3 Regelung des Verdunstungsbefeuchters (zuerst einzelne Sprühkreise, dann Pumpe stufenlos)

Q_B Befeuchtungsleistung

Luftzustandsänderungen im Winter (Lufterwärmung, vgl. Fig. 2-4)

Im Vorwärmer wird die angesaugte Luft mit Zustand A (nach WRG) auf den Zustand B erwärmt.

Weil das Kühlventil geschlossen ist, ist Zustand B gleich Zustand C.

Danach setzt die Befeuchtung ein. Diese ändert den Luftzustand vom Zustand C, auf die vom Feuchteregler bestimmte absolute Feuchte im Zustand D. Weil das Wasser verdunsten muss, wird der Luft Wärme entzogen. Deshalb kühlt sich die Luft bei diesem Befeuchtungsvorgang von C nach D auch entsprechend stark ab. Dieser Befeuchtungsvorgang wird auch als „adiabat“ bezeichnet.

Im Nachwärmer wird die Luft wieder erwärmt, und zwar so hoch, dass die Zuluft (Zustand E) eine, dem gewünschten Raumlufzustand F entsprechende, notwendige Einblas-Temperatur hat. Wird mit der Luft auch ein Teil der Heizlast des Raumes abgedeckt, kühlt sich die eingebrachte Luft im Raum entsprechend ab.

Weiter entsteht durch die Personen, welche sich im Raum befinden eine Feuchtelast. Dieser Eintrag der Feuchtelast bewegt sich bei einem hygienischen Luftwechsel bei ca. 1,8 g/kg. Dieser Feuchte-eintrag wird durch den Feuchteregler (4) mitberücksichtigt. Deshalb wird die Zuluft (E) trockener ein-geblasen als der gewünschte Raumlufzustand (F).

Ist die Temperatur der angesaugten Luft A höher als der Zustand B, so bleibt das Vorwärmerventil geschlossen.

Luftzustandsänderungen im Sommer (Luftkühlung, vgl. Fig. 2-5)

Die angesaugte Luft A (Zustand A gleich Zustand B, weil das Vorwärmerventil geschlossen ist) wird durch den Luftkühler und den Luftbefeuchter (adiabat) auf die vom Raumtemperaturregler geforderte Zulufttemperatur E abgekühlt. Die Aufteilung der Kühlung zwischen Luftkühler und Luftbefeuchter wird dabei durch den Feuchteregler mitbeeinflusst.

Der Zuluftzustand bei E wird, wie oben für den Winterfall erklärt, durch den Wärme- und Feuchte-eintrag im Raum (z.B. durch Personen) abgeleitet vom gewünschten Raumlufzustand F bestimmt.

Weil hier die mittlere Kühlflächentemperatur θ_{Ku} von 10 °C (1) über der Taupunkttemperatur des Luftzustandes B liegt, erfolgt die Kühlung im Luftkühler ohne Entfeuchtung.

Der hier gezeigte Raumlufzustand F ist für einen Anwendungsfall, bei dem exakte Werte im Raum erreicht werden müssen (z.B. Versuchslabor, Kunstmuseum, ...). In weniger anspruchsvollen Räumen (z.B. Büros) darf die Raumlufteuchte innerhalb gewisser Grenzen schwanken (vgl. Behaglichkeitsfeld), was den Kühl- und Befeuchtungsaufwand erheblich reduzieren kann.

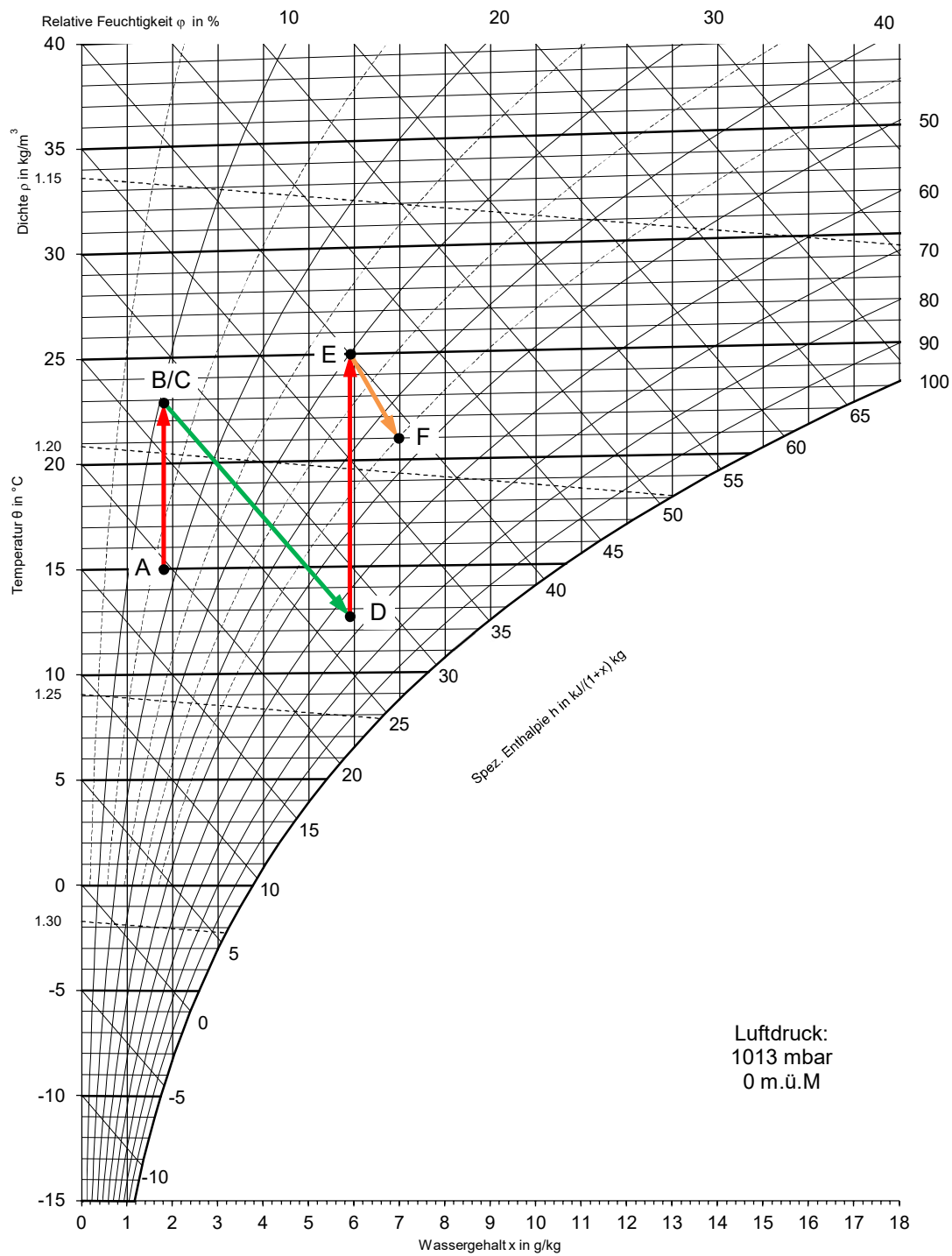


Fig. 2-4 Zustandsänderungen bei direkter Feuchteregelung im Winter auf 45 % r.F. (und 21 $^{\circ}\text{C}$)

- | | | | |
|-----|--|---|---|
| A | Vorwärmer-Eintrittszustand | D | Nachwärmer-Eintrittszustand |
| B | Luftbefeuchter-Eintrittszustand (auch C) | E | Erforderlicher Zuluftzustand bei Raumeintritt |
| B→D | Adiabate Befeuchtung | F | Sollzustand der Raumluft (θ , φ) |

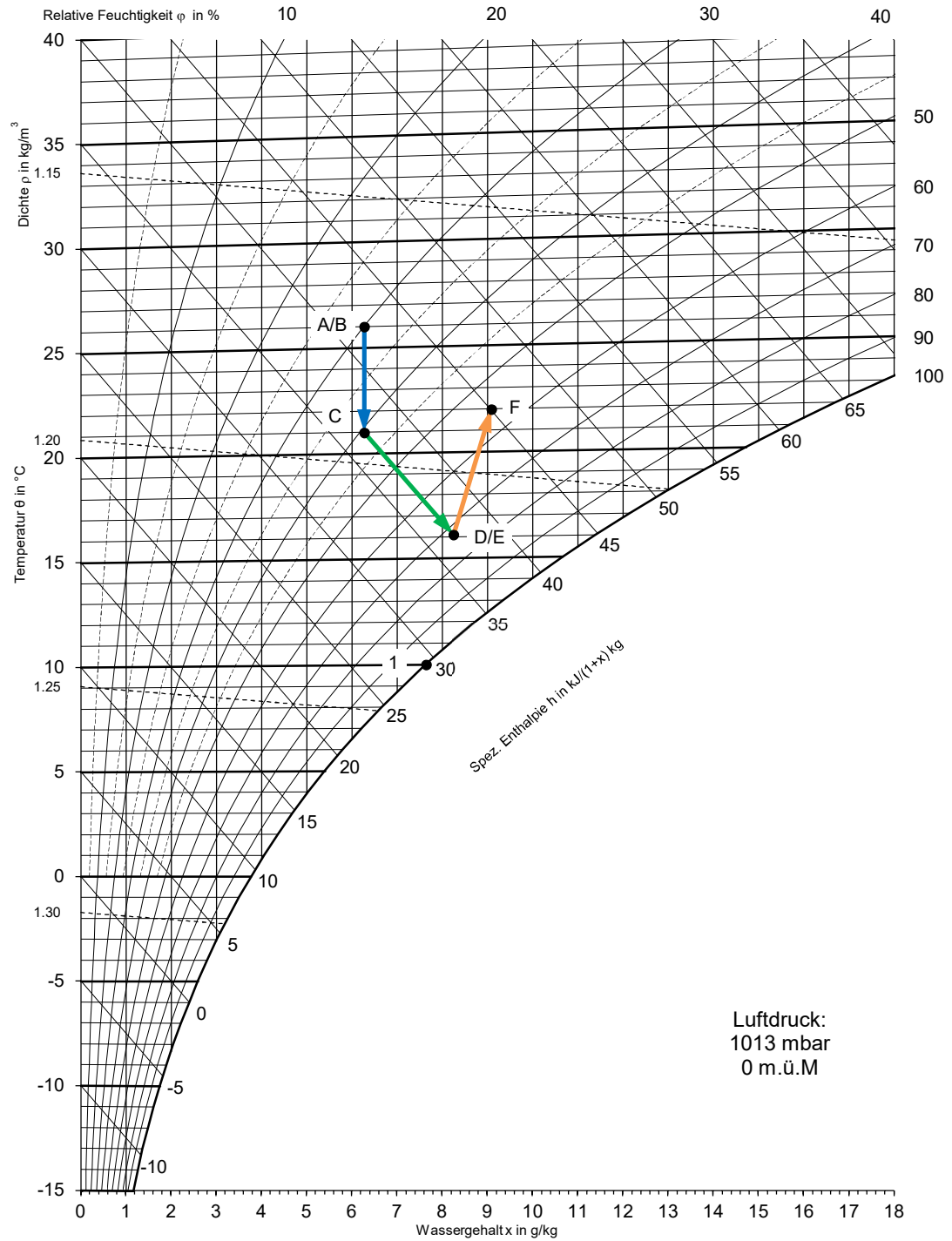


Fig. 2-5 Zustandsänderungen beim Kühlen mit direkter Feuchteregelung auf 55 % r.F. (und 22 °C)

- | | | | |
|-----|---------------------------------|---|---|
| A | Vorwärmer-Eintrittszustand | D | Nachwärmer-Eintrittszustand |
| B | Kühler-Eintrittszustand | E | Erforderlicher Zuluftzustand bei Raumeintritt |
| C | Luftbefeuchter-Eintrittszustand | F | Sollzustand der Raumluft (θ , φ) |
| C→D | Adiabate Befeuchtung | 1 | mittlere Kühlflächentemperatur $\theta_{Kü}$ |

Kühlen/Entfeuchten (z.B. feucht-warmes Klima, vgl. Fig. 2-6)

Beim Luftzustand A sind sowohl die Temperatur wie auch die absolute Feuchte zu hoch. Deshalb muss hier gekühlt und zugleich entfeuchtet werden.

In der ersten Phase fordert der Temperaturregler „Kühlen“ und der Feuchteregler „Entfeuchten“. Dabei bestimmt der Regler mit dem größeren Ausgangssignal – über die Vorrangfunktion – die Stellung des Kühlventils.

Der Temperaturregler fordert so lange „Kühlen“, bis die Zulufttemperatur den, für die Aufrechterhaltung der gewünschten Raumtemperatur, erforderlichen Wert erreicht (Zustand E'). Dieser Luftzustand E' ist aber noch zu feucht, weshalb der Feuchteregler weiterhin „Entfeuchten“ (und damit „Kühlen“) fordert. Durch diese weitere Kühlung wird zwar die Luft trockener, die Zuluft wird dabei aber unter die erforderliche Einblastemperatur abgekühlt. Der Feuchteregler fordert so lange Entfeuchten, bis der für die Einhaltung der relativen Raumfeuchte erforderliche Wasserdampfgehalt x erreicht ist (Zustand C/D).

Der Raumtemperaturregler muss nun mit Hilfe des Nacherwärmers die zu starkabgekühlte Luft wieder auf die erforderliche Zulufttemperatur E erwärmen. Dabei ist sicherzustellen, dass der Vorerwärmer nicht freigegeben oder gesperrt ist, da dieser zuerst aktiviert würde in der Regelsequenz für den Heizfall.

Der Zuluftzustand bei E wird, wie vorgängig erklärt, durch den Wärme- und Feuchteeintrag im Raum (z.B. durch Personen) abgeleitet vom gewünschten Raumlufzustand F bestimmt.

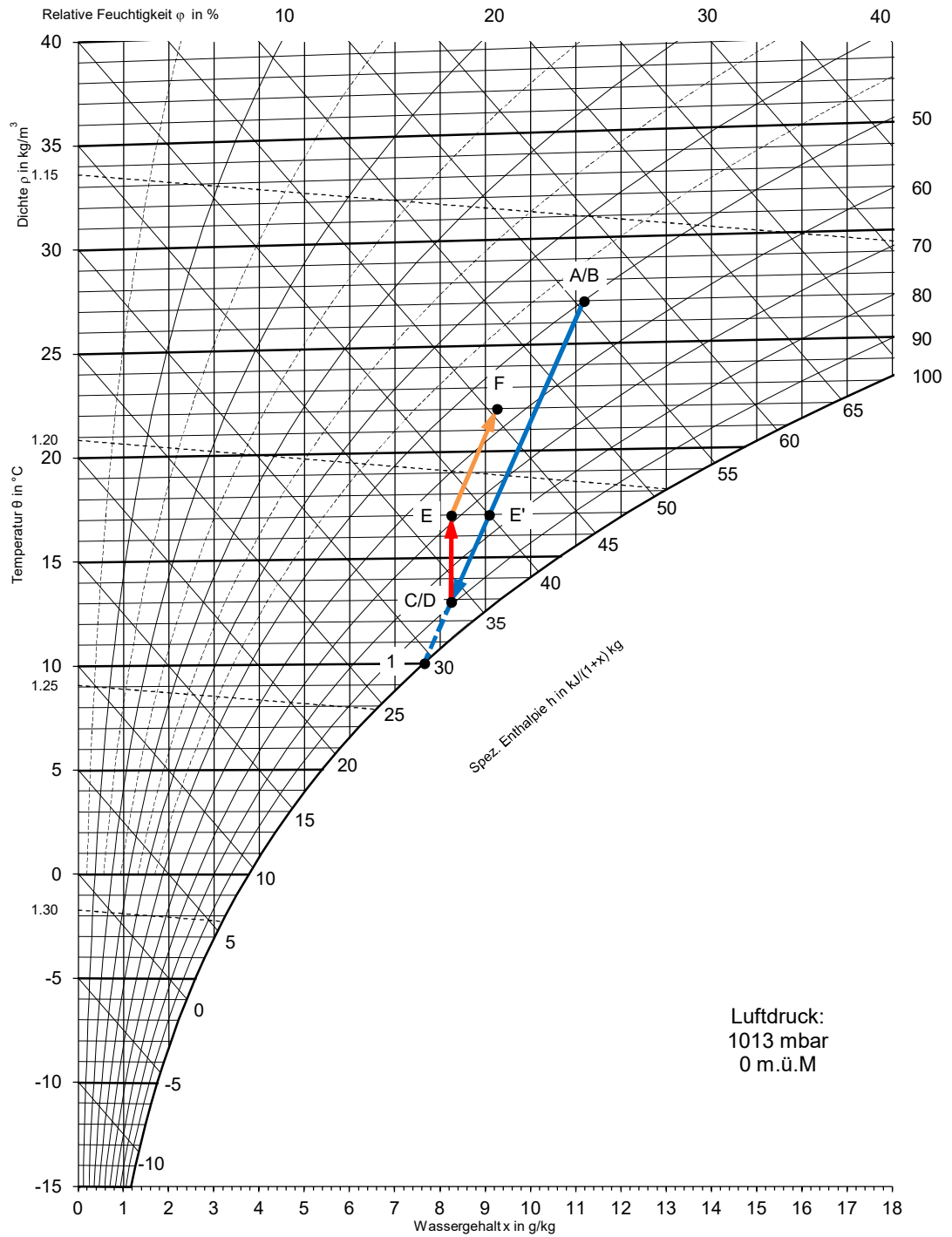


Fig. 2-6 Zustandsänderungen Kühlen/Entfeuchten bei direkter Feuchteregelung auf 55 % r.F. (und 22 °C)

- | | | | |
|---|---------------------------------|----|--|
| A | Vorwärmer-Eintrittszustand | E | Erforderlicher Zuluftzustand bei Raumeintritt |
| B | Kühler-Eintrittszustand | E' | Schnittpunkt des Kühlverlaufs mit der Solltemperatur |
| C | Luftbefeuchter-Eintrittszustand | F | Sollzustand der Raumluft (θ , ϕ) |
| D | Nachwärmer-Eintrittszustand | 1 | mittlere Kühlflächentemperatur θ_{Ku} |

2.2.3. Stetig regelbare Dampfbefeuchtung

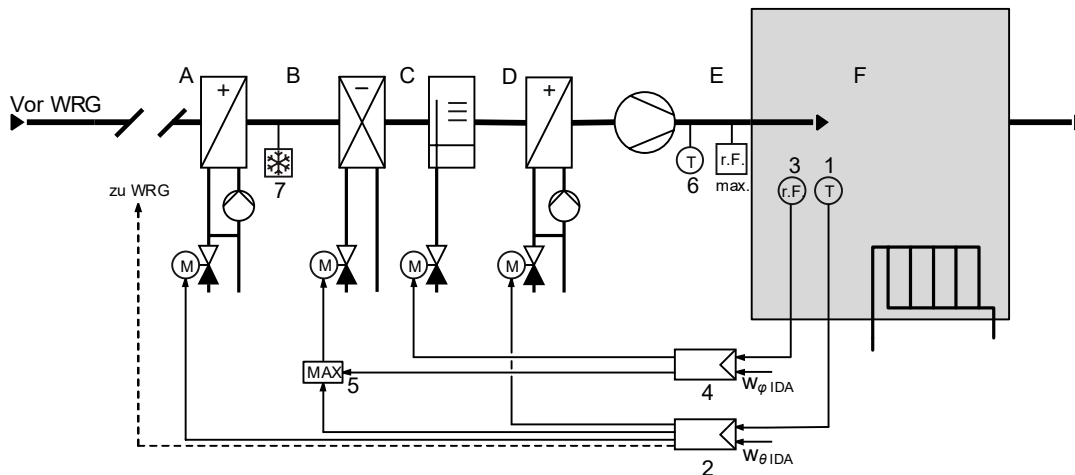


Fig. 2-7 Klimaanlage mit Dampfbefeuchter mit direkter Feuchteregelung

- | | |
|------------------------|---|
| 1 Raumtemperaturfühler | 4 Feuchteregler |
| 2 Raumtemperaturregler | 5 Vorrangwähler |
| 3 Raumfeuchtefühler | 6 Zulufttemperaturfühler z.B. für Minimalbegrenzung |
| A..F Luftzustände | |

Bei Befeuchtung mit Wasserdampf erfolgt die Richtung der Zustandsänderung im h,x -Diagramm entsprechend dem Wärmeinhalt des eingesprühten Dampfes. Man kann z.B. mit Hilfe der Dampftafel die Enthalpiezunahme Δh in kJ ermitteln, die der Luft mit der Dampfmenge Δx in Gramm zugeführt wird.

Bei der Befeuchtung mit Sattdampf von ca. 100 °C (Fig. 2-8) verläuft die Zustandsänderung ungefähr parallel zur Isothermen. Es findet somit nur eine geringfügige Erwärmung, aber eine sehr wirksame Befeuchtung der Luft statt. Die anderen Zustandsänderungen verlaufen gleich wie bei der Regelung mit Verdunstungsbefeuchtern (vgl. 2.2.2).

Der Zuluftzustand bei E wird, wie vorgängig erklärt, durch den Wärme- und Feuchteeintrag im Raum (z.B. durch Personen) abgeleitet vom gewünschten Raumlufzustand F bestimmt.

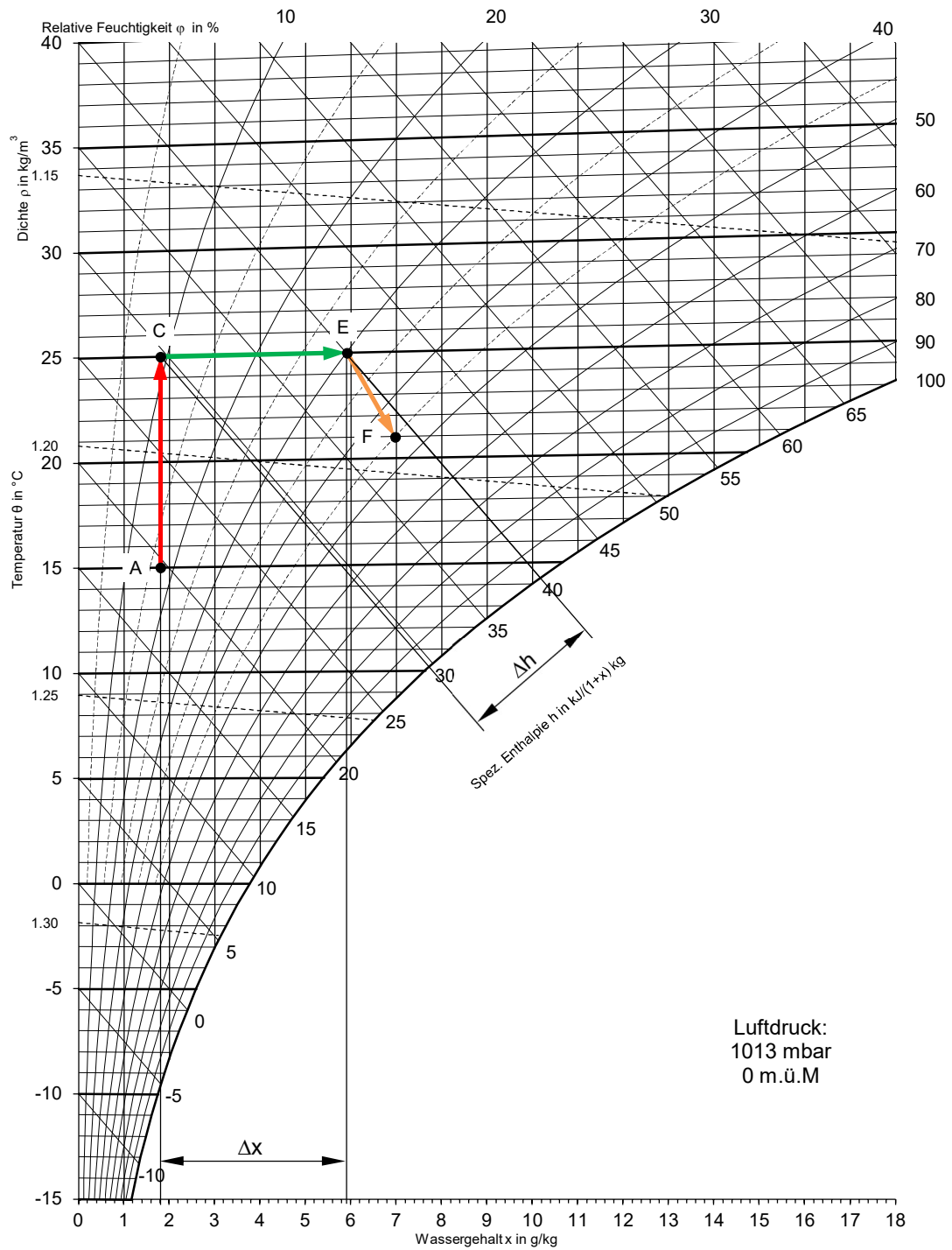


Fig. 2-8 Zustandsänderungen bei stetig regelbarer Dampfbefeuchtung auf 45 % r.F. (und 21 °C)

- A Vorwärmer-Eintrittszustand
- C Dampfbefeuchter-Eintrittszustand (abhängig von Enthalpie des Dampfes)
- E Erforderlicher Zuluftzustand bei Raumeintritt
- F Sollzustand der Raumluft (θ , φ)
- Δx Spezifische Dampfungabe in g/kg Luft
- Δh Erhöhung des Wärmeinhaltes (Enthalpie) durch Sattdampf von ca. 100 °C

2.3. Taupunktregelung

Aus wirtschaftlichen Gründen (Energiekosten) wird diese Lösung nicht mehr angewandt. Für konventionelle Klimaanlage wird die direkte Feuchteregelung vorgezogen. Voraussetzung zur Taupunktregelung ist ein Luftwäscher der einen Befeuchtungs-Wirkungsgrad von mindestens 95 %, also praktisch den Sättigungszustand der ausströmenden Luft, erreicht. Wird dabei die Temperatur dieser praktisch gesättigten Luft geregelt, dann wird damit auch deren Wasserdampfgehalt fixiert. Der dazu benötigte Regelgeräte-Aufwand ist deshalb relativ gering, was aber mit den heutigen Software-Lösungen nicht mehr ausschlaggebend ist.

2.3.1. Aufbau und Funktionsweise

- Die Taupunktregelung arbeitet mit einem Temperaturregler (2) und mit einem direkt nach dem Luftbefeuchter (Luftwäscher) eingesetzten Temperaturfühler (1). Mit seinen Ausgangssignalen betätigt er das Vorwärmer- und Kühlventil. Die beiden Ventile sind in Sequenz geschaltet.
- Die Wasserumwälzmenge im Befeuchter bleibt konstant und die Befeuchterpumpe ist während des Betriebes der Anlage dauernd eingeschaltet.
- Die Regelung der Raumtemperatur und damit indirekt auch der relativen Raumfeuchte nach der Taupunktregelung erfordert in konventionellen Anlagen einen Nachwärmer, dessen Heizleistung vom Raumtemperaturregler (4) bestimmt wird.
- Die Anlage kann mit einem Zulufttemperatur-Minimalbegrenzungsfühler (6) und einem Außen-temperatur-Führungsfühler (7), sowie Außenluft-/Umluftklappen ergänzt werden.

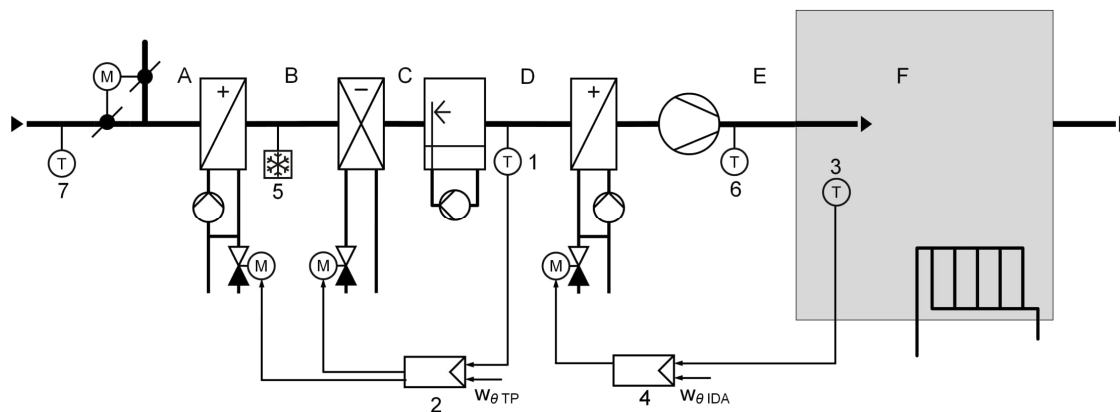


Fig. 2-9 Taupunktregelung

1	Taupunkttemperaturfühler	5	Frostschutzthermostat
2	Taupunkttemperaturregler	6	Zulufttemperaturfühler z.B. für Minimalbegrenzung
3	Raumtemperaturfühler	7	Außen-temperaturfühler z.B. für Führungsgeber
4	Raumtemperaturregler	A..F	Luftzustände

2.3.2. Anwendung

Die Taupunktregelung wurde in Anlagen angewendet, wo die relative Raumfeuchte innerhalb bestimmter Grenzen schwanken durfte. Sie wurde hauptsächlich im Industriebereich eingesetzt, wo Maschinen-Abwärme zur Nacherwärmung im Raum genutzt werden konnte. Im Komfortbereich wurde sie zur zentralen Luftaufbereitung in Zweikanal-, Induktions- oder Fan-Coil-Anlagen eingesetzt.

2.3.3. Vergleich Direkte Feuchte- & Taupunktregelung

Bei der direkten Feuchteregelung kann die relative Raumfeuchte (und die Raumtemperatur) bei jedem Außenluftzustand, bei Sollwertverstellung der Raumtemperatur, bei inneren Wärmequellen, bei Fremdfuchteanfall im Raum oder Feuchteverlust konstant gehalten werden.

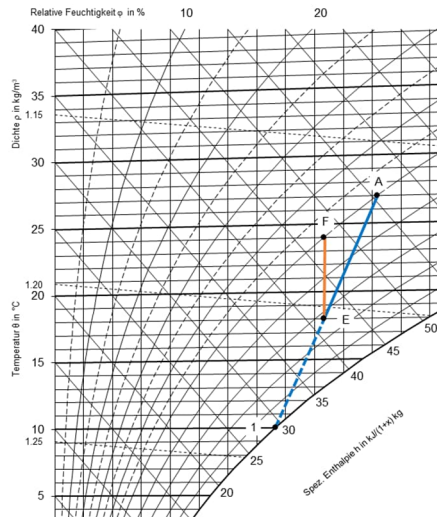
Bei der Verdunstungs-Befeuchtung genügt ein Befeuchtungswirkungsgrad, der wesentlich niedriger ist als derjenige eines Taupunkt-Luftwäschers. Dazu kann ein entsprechend preisgünstiges Gerät eingesetzt werden. Wichtig ist jedoch, dass der Befeuchter innerhalb eines genügend großen Leistungsbereiches regelbar ist.

Ungünstige Betriebszustände, wie sie sich bei der Taupunktregelung im Teillastbereich einstellen können, werden vermieden. Es wird nur so viel gekühlt, befeuchtet und nachgewärmt wie notwendig ist. Daraus resultieren tiefere Betriebskosten.

Fig. 2-10 zeigt hierzu zwei verschiedene Luftzustandsänderungen im Vergleich zwischen direkter Feuchteregelung mit einem regelbaren adiabatischen Verdunstungs-Befeuchter (links) und der Taupunktregelung (rechts):

- Direkte Feuchteregelung (links) mit regelbarem adiabatischem Befeuchter.
(Es wird nur so viel gekühlt wie erforderlich ist).
- Taupunktregelung (rechts) mit Energieverschwendung von $2x \Delta h$ unnötiges Kühlen/Nachwärmen plus Befeuchten.

Direkte Feuchteregelung



Taupunktregelung

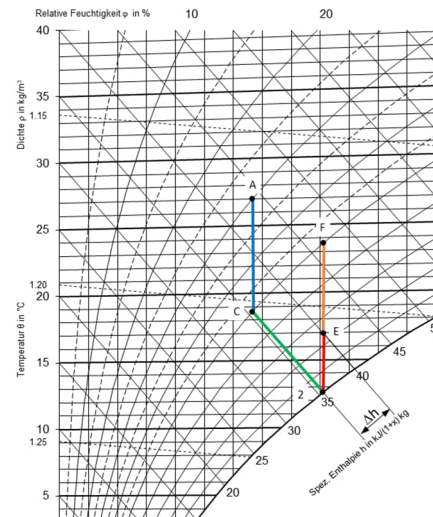
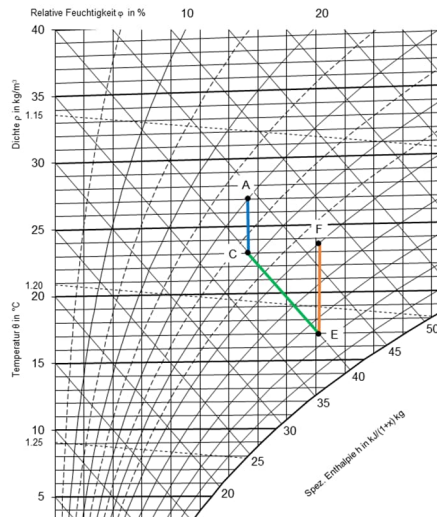
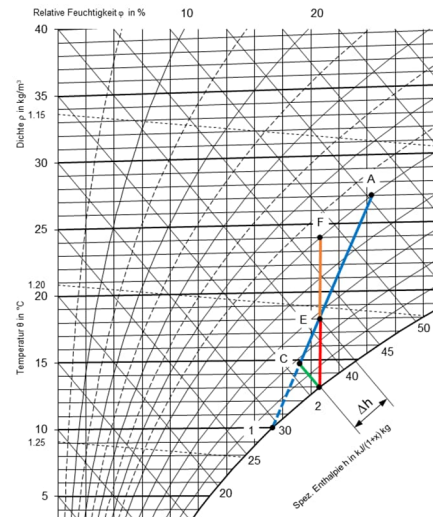


Fig. 2-10 Direkte Feuchteregelung (links) und Taupunktregelung (rechts) und im Vergleich

A	Außenluftzustand	C	Eintrittszustand vor Luftbefeuchter
F	Gewünschter Raumluftzustand	1	mittlere Kühlflächentemperatur
E	Erforderlicher Zuluftzustand	2	Taupunkttemperatur der Raumluft
Δh	zusätzliche Energie (2x) bei Taupunktregelung		

3 Bedarfsgeführte Luftqualitätsregelung

3.1. Hoher Komfort bei tiefen Betriebskosten

Bei dieser Regelstrategie wird die Leistung der Raumlufteinlage entsprechend der Raumlufthqualität geregelt mit dem Ziel, den Komfort zu verbessern und die Betriebskosten der Anlage möglichst tief zu halten. Diese Anlagen arbeiten nach dem „Verdünnungsprinzip“, d.h. belastete Raumlufth wird durch weniger stark belastete Außenlufth verdünnt.

3.2. Raumlufthqualität (Indoor Air Quality, IAQ)

International wird Raumlufthqualität mit dem Begriff Indoor Air Quality (IAQ) beschrieben. Dieser Begriff wurde hauptsächlich durch die World Health Organization (WHO) und die American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) geprägt und wird so auch in den entsprechenden Normen und Richtlinien geführt.

Durch den Einsatz einer bedarfsgeführten Luftqualitätsregelung wird der Komfort in einem Raum sichergestellt, in dem die Raumlufthqualität als Regelgröße in der Regelstrategie mitberücksichtigt wird.

Vorteile der bedarfsgeführten Luftqualitätsregelung sind:

- Gute Raumlufthqualität reduziert SBS (Sick Building Syndrome)
⇒ höhere Produktivität der Mitarbeiter, weniger Krankheitsabsenzen
Eine Produktivitätssteigerung von nur 1 % kann 50 % höhere Investitionen für Heizungs- und Lüftungssysteme rechtfertigen. Studien haben gezeigt, dass Büroarbeiter in einem Gebäude mit SBS bis zu 30 % mehr Fehler unterlaufen und bis zu 10 % langsamer arbeiten.
- Genügend tiefer CO₂-Gehalt erhöht die Konzentrationsfähigkeit
⇒ wichtig in Schulen und Bürogebäuden
- Gute Luftqualität in Restaurants und Einkaufszentren erhöht die Verweildauer der Kunden in den Räumlichkeiten
⇒ höherer Umsatz.
- Anlage regelt automatisch entsprechend Raumlufthqualität
⇒ Personal muss sich nicht um Anlage kümmern, keine Probleme mit vergessenen oder zu spätem Ein- bzw. Ausschalten (z. B. in Restaurants).
- Energiekosteneinsparung
- Es können teilweise beträchtliche Energiekosteneinsparung realisiert werden (30 % bis teilweise 50 % belegt durch Fallstudien). Dies ist vor allem durch zwei Faktoren begründet:
 - Anlage läuft nur bei Bedarf
⇒ Einsparungen bei Aufbereitung der Außenlufth (z. B. Lufterwärmer, Luftkühler).
 - Leistungsaufnahme der Ventilatoren wird erheblich reduziert (z.B. durch Stufenschaltung oder durch stetige Ansteuerung über einen Frequenzumrichter) weil sich die Leistungsaufnahme annähernd mit der 3. Potenz zum Luftmengenverhältnis verändert (vgl. Theorie Proportionalitätsgesetze).

3.3. Messgrößen CO₂, VOC

Die Luftqualität wird mit zwei verschiedenen Messgrößen gemessen. Es sind dies:

- CO₂ (Kohlendioxid)
- Mischgase / VOC (Volatile Organic Compounds, flüchtige organische Verbindungen)

3.3.1. CO₂ (Kohlendioxid)

CO₂ ist ein geruchloses Gas das bei der Verbrennung, (z. B. Heizöl, Benzin) aber auch bei der Atmung entsteht. Für die Raumlufthqualität ist CO₂ eine entscheidende Größe, weil der Mensch beim Ausatmen CO₂ produziert und so die CO₂- resp. Sauerstoff-Konzentration (O₂) in Räumen ansteigt
⇒ CO₂ Konzentration im Raum ist ein Maß für die Anzahl Personen in Räumen

CO₂ hat auch gesundheitliche Auswirkungen (Atmung des Menschen durch CO₂-Gehalt gesteuert) und somit Einfluss auf das Wohlbefinden, Konzentration etc., falls gewisse Belastungs-Werte überschritten werden.

CO₂ wird in Volumen % oder in ppm (parts per million) gemessen.

Normale Außenluft enthält heute rund 0,04 Volumen % CO₂, resp. 400 ppm. Dabei ist aber zu beachten, dass in urbanen Umgebungen der Konzentrationslevel einiges höher sein kann (z.B. 550...700 ppm) auf Grund von Abgasen von Fahrzeugen, Heizungen, usw.

Konzentration [ppm]	
400 - 450	Konzentration in normaler Außenluft, oft höher in urbanen Umgebungen
1.000	20 % der in einen Raum eintretenden Personen sind mit der herrschenden Luftqualität unzufrieden
1.500	Grenzwert gemäß DIN 1946
2.000	Sensible Personen klagen über Kopfweh
4.000	Maximalwerte im Klassenzimmer nach Unterricht
5.000	MAK Wert (zulässige maximale Arbeitsplatzkonzentration)
100.000	Erlöschen einer Kerze im Raum, Bewusstseinsverlust

Fig. 3-1 CO₂-Konzentrationen und -Grenzwerte

3.3.1.1. Messprinzip mit optischer Infrarot-Absorptionsmessung

Beim CO₂-Messprinzip mit optischer Infrarot-Absorptionsmessung, wird die Veränderung der Wellenlänge einer Infrarot-Lichtquelle durch die CO₂-Konzentration gemessen (vgl. Fig. 3-2).

Diese Infrarot-Lichtquelle altert, wodurch sich die ausgesandte Wellenlänge verändert. Damit die Messung über die Lebensdauer des Sensors stabil und zuverlässig bleibt, wird mit einer zweiten Infrarot-Lichtquelle sporadisch eine Vergleichsmessung gemacht. Dadurch kann die Messung nachkalibriert und der Alterungseffekt der Infrarot-Lichtquelle kompensiert werden.

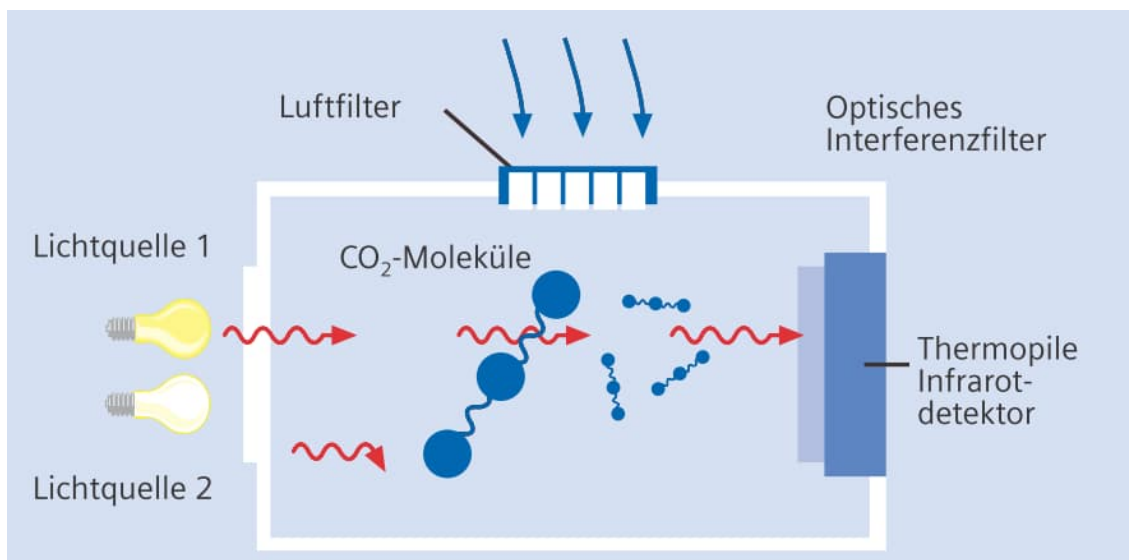


Fig. 3-2 CO₂-Messung mit optischer Infrarot-Absorptionsmessung

CO₂ gegenüber CO (Kohlenmonoxid)

CO₂ (Kohlendioxid) ist nicht zu verwechseln mit CO (Kohlenmonoxid), welches bei unvollständiger Verbrennung entsteht (z. B. in Autoabgasen) und das, im Gegensatz zu CO₂, auch in sehr kleinen Konzentrationen giftig ist. CO muss überall dort gemessen werden, wo dieses in gefährlichen Konzentrationen auftreten kann (z.B. Parkgarage). Diese Messung ist dann Bestandteil eines Warnsystems- und nicht eines Luftqualität-Regelsystems.

3.3.2. Mischgase / VOC

Quellen für Mischgase / VOC sind:

- Menschen, besonders Raucher
- Ausdünstungen von Materialien, Möbeln etc.
- Raumluftanlagen, besonders falls schlecht gewartet

Mischgase (Gerüche) treten eher punktuell auf und sind viel schwieriger zu messen als CO_2 . Es gibt keinen Sensor, der die menschliche Nase komplett ersetzt. Für schlechte Luft sind hauptsächlich VOCs (volatile organic compounds, flüchtige organische Verbindungen) verantwortlich.

Schwierigkeiten, die bei der Messung von VOC auftreten, sind:

- verschiedene Gerüche, z.B. Tabakrauch oder Ausdünstungen von Materialien werden unterschiedlich gewichtet, nicht unbedingt dem Empfinden der menschlichen Nase entsprechend
- Vergleich Außenluft/Innenluft notwendig für Messung → Probleme bei schlechter Außenluft

Ohne zusätzliche Signalbearbeitung sind die handelsüblichen VOC-Sensoren für Anwendungen in der Klimatechnik allerdings nicht genügend genau und zuverlässig, da hier schon kleinste VOC-Konzentrationen gemessen werden müssen. Mit einem intelligenten Algorithmus lässt sich das VOC-Signal an die aktuelle Zuluftqualität adaptieren und auch sehr kleine VOC-Konzentrationen zuverlässig und stabil messen.

3.3.2.1. Messprinzip

Die VOC-Erfassung erfolgt mit einem Gassensor nach dem Taguchi-Prinzip (Fig. 3-3). Dieser besteht im Wesentlichen aus einem gesinterten Keramikrohr mit innen liegender Heizwendel. Neuere Ausführungen werden auch in Flachbauweise in Dickfilmtechnologie ausgeführt. Das Sensorröhrchen ist hochporös und hat dadurch eine sehr große Oberfläche. Es besteht aus dotiertem Zinndioxid (SnO_2). Das sensitive Material arbeitet nach einem Redox-Vorgang.

Durch Aufheizen des Sensor-Röhrchens auf 400°C bilden sich freie Elektronen an der Sensoroberfläche. Durch diese angezogen, lagern sich Sauerstoffatome an der Oberfläche an. Gase oder Dämpfe, die mit der Sensoroberfläche in Berührung kommen werden im Idealfall zu CO_2 und Wasserdampf oxidiert. Der zur Oxidation benötigte Sauerstoff wird dabei der Sensoroberfläche entzogen. Dabei werden Elektronen frei, was den Widerstand des Halbleiters verändert. Diese Widerstandsänderung kann als Spannungsänderung gemessen werden. Der verbrannte Sauerstoff wird durch Luftsauerstoff wieder ersetzt. Alle oxidierbaren Gase können somit durch den Mischgassensor proportional zur Konzentration und ihrem Redoxpotential erfasst werden.

Das Taguchi-Messprinzip wird für Gas-Leckmessungen seit langem erfolgreich eingesetzt. Für Luftqualitäts-Messungen in HLK-Anlagen wurde das Messprinzip wenig eingesetzt. Ein Grund ist sicher, dass der nötige Messbereich in die unterste sensitive Zone des Taguchi-Sensors fällt, wo der Grundwert des Sensorsignals relativ stark streut und driftet. Außerdem existieren über Geruch und Luftqualität außer für CO_2 keine verbindlichen, messbaren Aussagen in der Literatur.

Mittlerweile gilt die kombinierte CO_2 /VOC-Messung als typische Lösung für Luftqualitätsregelung in Räumen mit Geruchsbelastung.

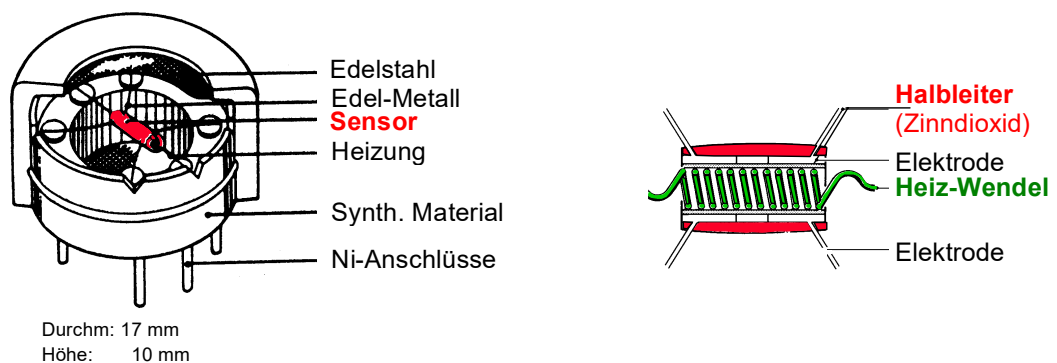


Fig. 3-3 VOC-Messung mit Gassensor nach dem Taguchi-Prinzip

3.4. Andere Indikatoren

Im Zusammenhang mit Gerüchen wird oft über olf, decipol und Prozentzahl Unzufriedene (PD, Percentage Dissatisfied) gesprochen (Theorie Fanger). Diese Größen sind keine messbaren Größen wie CO_2 , zeigen aber den Zusammenhang zwischen Geruch, Luftwechsel und Zufriedenheit der Personen. Sie können deshalb nicht zu Regelzwecken eingesetzt werden, wohl aber um z.B. Sollwerte festzulegen (vgl. Fig. 3-1, Wert für 1.000 ppm CO_2).

olf

1 olf = Verunreinigungslast einer Standardperson.

Eine Standardperson heißt eine erwachsene Person bei sitzender Tätigkeit mit einem Hygienezustand von 0,7 Bädern pro Tag. Die Einheit "olf" gibt die jeweilige Verunreinigungslast von Gegenständen wie von Menschen an. Sie ist als Größe nicht direkt messbar, sondern nur über die empfundene Luftqualität bestimmbar.

decipol

1 decipol = empfundene Luftqualität in einem Raum mit einer Verunreinigungslast von 1 olf und einer Lüftung mit einem Volumenstrom von 10 l/s resp. 36 m^3/h . Decipol ist die Maßeinheit für die empfundene Luftqualität.

PD = Percentage Dissatisfied:

Die empfundene Luftqualität wird mit Hilfe von Testpersonen ermittelt und dabei wird festgelegt, wie viele Personen mit der Luftqualität nicht zufrieden sind (Percentage Dissatisfied resp. Prozentzahl Unzufriedener). Diese Werte werden in Abhängigkeit der personenbezogenen Außenluftfrate festgehalten.

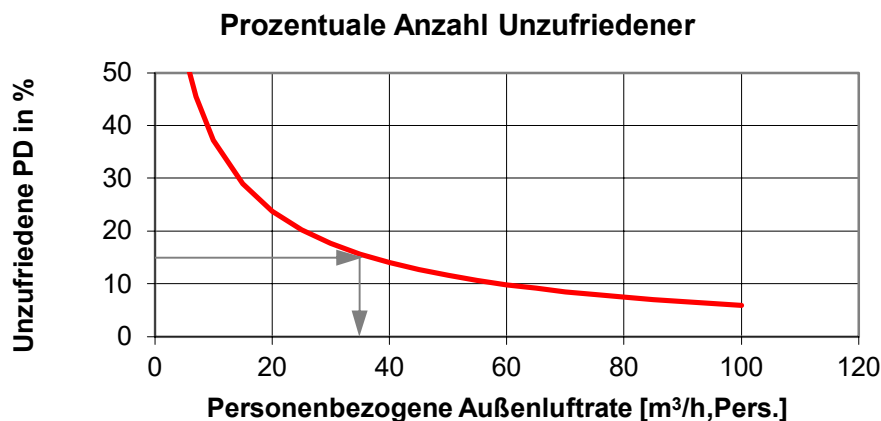


Fig. 3-4 Abhängigkeit der Prozentzahl Unzufriedener (PD) von der personenbezogenen Außenluftfrate

3.5. Luftqualitäts-Regelung

In Anlagen, welche mit Luft kühlen respektive heizen, besteht die Möglichkeit dies mit Umluftklappen zu realisieren, um Energie einzusparen im Gegensatz zu einem reinen Außenluftbetrieb. Dies ist nur dann möglich, wenn die benötigte Luftmenge, um zu heizen, resp. zu kühlen höher ist als der Außenluftbedarf. Um möglichst viel Energie einsparen zu können, ist es notwendig den Anteil der Außenluft bedarfsabhängig zu regeln. Im untenstehenden Beispiel wird dies näher erläutert.

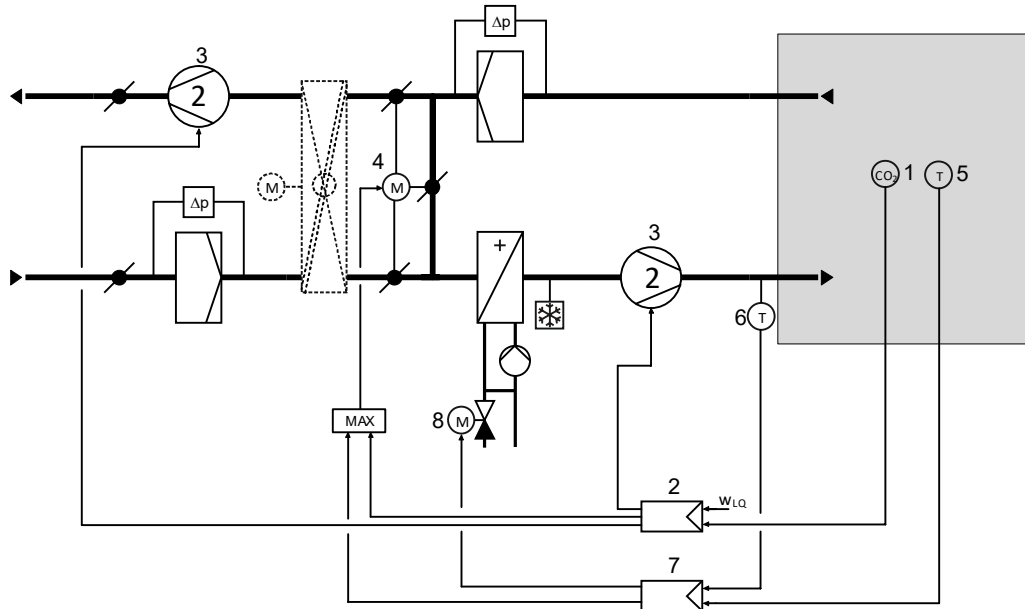


Fig. 3-5 Zweistufige Ventilatoren mit bedarfsgeführter Luftqualitätsregelung

1	Luftqualitätsfühler (CO ₂)	5	Raumtemperaturfühler
2	Luftqualitätsregler	6	Zulufttemperaturfühler
3	Zweistufiger Ventilator	7	Temperaturregler
4	Umluftklappe	8	Lufterwärmer Stellgerät

Anlage mit 2-stufigen Ventilatoren und direkter Umluft-Beimischung:

- Verschlechtert sich die Luftqualität, so wird die Anlage vorerst auf der 1. Ventilatorstufe (I) eingeschaltet.
- die Außenluftklappe fährt auf die eingestellte Minimalstellung und öffnet stetig bei einer weiteren Verschlechterung der Luftqualität.
- Die 2. Ventilatorstufe (II) wird erst dann eingeschaltet, wenn die Luftklappe voll geöffnet ist.
- Bei tiefen Außentemperaturen kann die Außenluftmenge begrenzt werden ($\Rightarrow$ max.), damit sichergestellt wird, dass der Lufterwärmer die benötigte Zulufttemperatur erreichen kann.

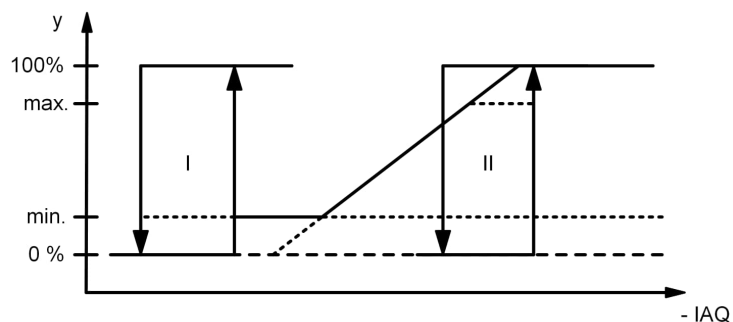


Fig. 3-6 Bedarfssignale für Anlage mit 2-stufigen Ventilatoren (I, II) und direkter Umluft-Beimischung

y Stellsignal Außenluftklappe -IAQ sich verschlechternde Raumluftqualität

Wenn nun jedoch nicht mit der Luft geheizt oder gekühlt werden muss, können z.B. Ventilatoren mit Frequenzumformern stetig angesteuert werden. Dadurch kann die Luftmenge anstelle einer Außenluftkappe geregelt werden.

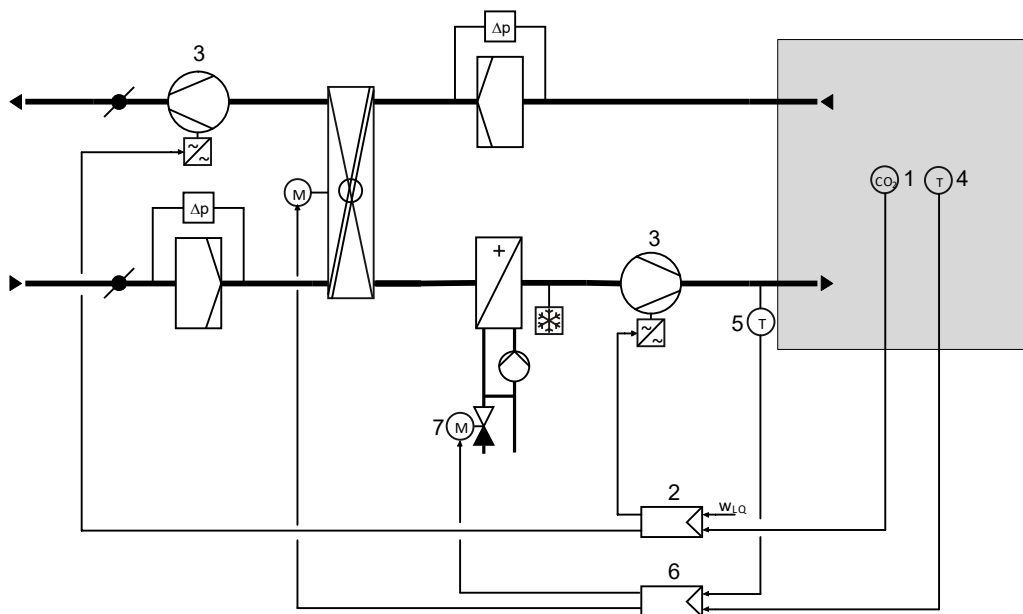


Fig. 3-7 Frequenzgesteuerte Ventilatoren mit bedarfsgeführter Luftqualitätsregelung

- | | | | |
|---|--|---|------------------------|
| 1 | Luftqualitätsfühler (CO ₂) | 5 | Zulufttemperaturfühler |
| 2 | Luftqualitätsregler | 6 | Temperaturregler |
| 3 | Drehzahl geregelter Ventilator | 7 | Lufterwärmer-Ventil |
| 4 | Raumtemperaturfühler | | |

Anlage mit drehzahlgeregelten Ventilatoren:

- Verschlechtert sich die Luftqualität, so schalten die Anlage und damit die Ventilatoren (I) ein. Die Ventilatoren laufen auf minimaler Drehzahl.
- Die Außen-/Fortluftklappe öffnet 100 %.
- Bei einer weiteren Verschlechterung der Luftqualität wird die Drehzahl des Ventilators stetig erhöht (Stellsignal y).

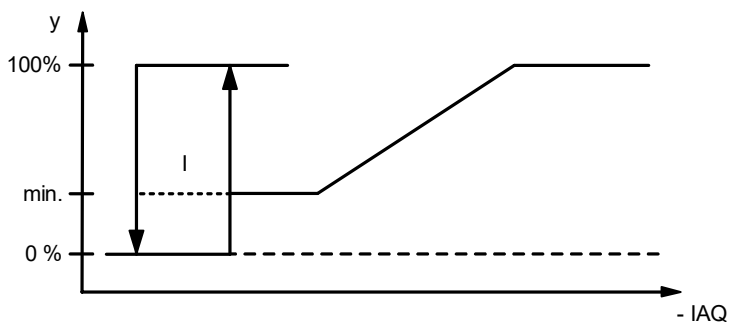


Fig. 3-8 Bedarfssignale für Anlage mit drehzahlgeregelten Ventilatoren

- | | | | |
|---|--------------------------------|------|--|
| y | Stellsignal Ventilatordrehzahl | -IAQ | sich verschlechternde Raumluftqualität |
|---|--------------------------------|------|--|

3.5.1. Freigabestrategien

Eine Anlage mit bedarfsgeführter Luftqualitätsregelung kann auf Grund verschiedener Kriterien ein-/ausgeschaltet werden. Die nachfolgende Grafik zeigt eine Anlage im Tagesverlauf mit verschiedenen Möglichkeiten zum Ein-/Ausschalten der Anlage.

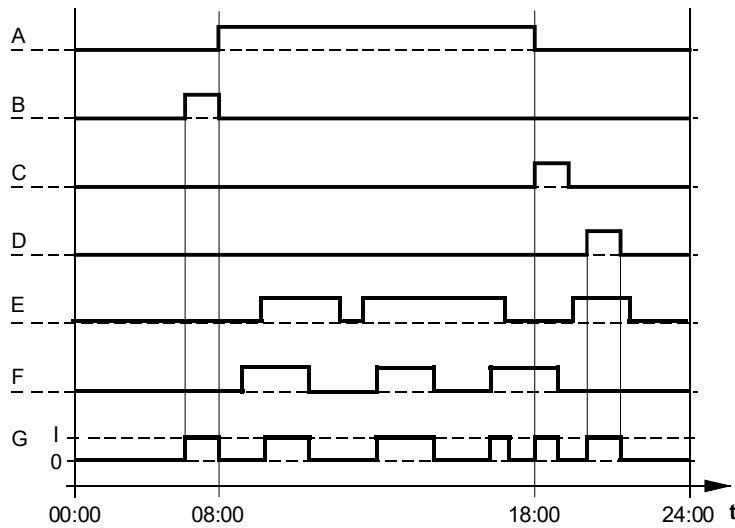


Fig. 3-9 Anlage mit Zeitschaltprogramm, Handeingriff und Präsenzdetektor

- A Nutzungszeit
- B Vorlüftung
- C Nachlüftung
- D Hand EIN
- E Präsenzdetektor
- F Lufterneuerungsbedarf
- G Anlage

Mögliche Gründe zum Ein-/Ausschalten sind:

- Nutzungszeit
Innerhalb der Nutzungszeit befinden sich typischerweise Personen im Gebäude. Die Bedarfssteuerung hat hier die Aufgabe, den Komfort (gute Luftqualität) zu gewährleisten.
- Vorlüftung
Gute Luftqualität soll sichergestellt werden, bevor die Benutzer den Raum betreten. Die Dauer der Vorlüftung kann eingestellt werden (ca. zwei Luftwechsel) und endet bei Beginn der Nutzungszeit. Die Anlage läuft während der Vorlüftung auf der höchsten Ventilator-Drehzahl mit 100 % Außenluftanteil.
- Nachlüftung
Damit sich außerhalb der Nutzungszeit keine unangenehmen Gerüche in den Inneneinrichtungen festsetzen kann nachgelüftet werden. Die Nachlüftung beginnt bei Ende der Nutzzeit, sofern der Luftqualitätsfühler einen Lufterneuerungsbedarf anzeigt. Sie endet spätestens nach einer einstellbaren Zeitperiode.
- Zwangslüftung (Hand EIN)
Innerhalb oder außerhalb der Nutzungszeit kann über eine Impulstaste die Lüftung für eine begrenzte Zeit zwangsweise eingeschaltet werden. Die Anlage läuft während der Zwangslüftung auf der höchsten Ventilator-Drehzahl mit 100 % Außenluftanteil.
- Präsenzerfassung
Bei Räumen, welche auch innerhalb der Nutzungszeit unregelmäßig benutzt werden, kann mittels Präsenzdetektoren festgestellt werden, ob sich Personen im Raum aufhalten. Die Bedarfslüftung wird nur dann freigegeben, wenn der Präsenzdetektor die Anwesenheit von Personen anzeigt.
- Koordination mit der Temperaturregelung
Unabhängig von der Bedarfslüftung muss die Temperaturregelung feststellen, ob der thermische Komfort gewährleistet ist und die Anlage bei Heiz- bzw. Kühlbedarf einschalten.

4 Regelung der Wärmerückgewinnung WRG

4.1. Allgemeines

Zur Luftaufbereitung in Lüftungs- und Klimaanlage wird Energie verbraucht. Der größte Anteil wird dabei zum Heizen oder Kühlen, bei Vollklimatisierung aber auch zum Be- und Entfeuchten der Luft benötigt. Da in Komfort-Klimaanlagen aus hygienischen Gründen, je nach Personenbelegung der klimatisierten Räume, eine bestimmte Luftwechselzahl [h^{-1}] (dem Raum zugeführte Außenluft [m^3/h] / Raumvolumen [m^3]) einzuhalten ist, bedeutet dies, dass im Winter - je nach Größe der Anlage - ein erheblicher Volumenstrom beheizter und eventuell befeuchteter, bzw. im Sommer gekühlter und entfeuchteter Luft, ins Freie geblasen und durch Außenluft ersetzt werden muss. Hier gilt es, einen möglichst großen Anteil der vorher aufgewendeten Energie wieder zurückzugewinnen.

Warum Regelung und Steuerung der WRG?

Beim Einsatz einer Wärmerückgewinnung kann es in einigen Betriebsfällen vorkommen, dass die rückgewonnene Wärme den momentanen Bedarf für die Zuluft-Aufbereitung übersteigt. Dies ist bei großem Fremdwärmeanfall im Raum gut möglich. Systematische Betriebsuntersuchungen haben gezeigt, dass WRG-Anlagen, während 20...40 % ihrer Betriebsdauer mit reduzierter Wärmeübertragung betrieben werden müssen. Wird in diesen Fällen die Übertragungsleistung nicht reduziert, so muss die rückgewonnene Wärme in der Zuluft-Aufbereitungsanlage wieder mit zusätzlichem Energieaufwand kompensiert werden. Deshalb muss die Übertragungsleistung einer WRG-Anlage durch eine Steuerung und Regelung dem Bedarf angepasst werden.

Spezifische Probleme bei der Regelung und Steuerung der WRG

Soll die WRG-Anlage mit einer Steuerung betrieben werden, so muss der Energiebedarf an Orten gemessen werden, an denen die Messgrößen durch die WRG nicht beeinflusst werden können. Diese Bedingung ist aber nur für die Außenluft erfüllt. Die Außenlufttemperatur oder -enthalpie ist aber kein Maß für den Energiebedarf der Anlage, weil darin die Fremdwärme im Raum unberücksichtigt bleibt. Eine energieoptimale Steuerung der WRG-Anlage im gesamten Betriebsbereich ist deshalb so nicht möglich. Es stellt sich also die Frage, ob das WRG-System mit einem eigenen Regelkreis geregelt oder als Sequenz in die gesamte Luftaufbereitungs-Regelung mit einbezogen werden soll.

Würde die WRG-Anlage mit einem eigenen Regelkreis betrieben, mit der Zulufttemperatur oder -enthalpie als Führungsgröße und der Lufttemperatur bzw. -enthalpie am Austritt der WRG-Anlage als Regelgröße, so würde eine starke Vermaschung der WRG-Regelung mit der Zuluft- oder Raumtemperaturregelung entstehen. Deshalb wäre so kein stabiler Regelbetrieb möglich.

Da bei reduziertem WRG-Betrieb die Energie für die Zulufterwärmung nur durch Fremdwärme und Wärmerückgewinnung zugeführt wird, ist es naheliegend, die WRG-Anlage als Sequenz in die Raum- oder Zuluftregelung einzubauen.

Bei der Planung einer Lüftungs-/Klimaanlage mit Wärmerückgewinnung steht man vor der Entscheidung, ob man als Umschaltkriterium bei Richtungsänderung des Wärmeflusses die Temperaturdifferenz (ΔT) oder die Enthalpiedifferenz (Δh) zwischen Abluft und Außenluft wählen soll. Dieser Entscheid ist einerseits von der Art der Wärmerückgewinnung (mit oder ohne Feuchteübertragung) und andererseits von der Befeuchtungsmethode (Dampfbefeuchtung oder Verdunstungsbefeuchtung) abhängig. Mittels einer Entscheidungsmatrix wird dies in Kapitel 6 näher erläutert.

4.2. Platten- oder Röhren-Wärmeübertrager (rekuperative WRG)

Fortluft- und Außenluftstrom sind durch feststehende Trennflächen getrennt. Meistens Kuben mit Platten - teilweise auch mit Röhren. Material je nach Anwendung und Luftzustand/-qualität z.B. Aluminium, Chromstahl, Glas, Kunststoffe.

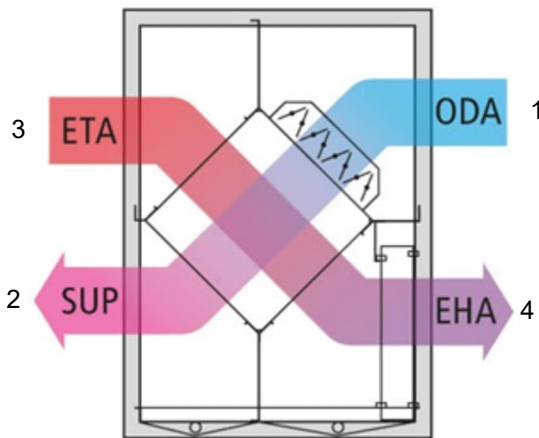


Fig. 4-1 Plattentauscher: rekuperative WRG (Quelle: Wolf)

- | | |
|-------------------|------------------|
| 1 Außenluft (ODA) | 3 Abluft (ETA) |
| 2 Zuluft (SUP) | 4 Fortluft (EHA) |

4.2.1. Regelung

Die Übertragungsleistung dieser WRG-Bauart kann nur durch einen Umföhrungskanal (4) in der Außenluft beeinflusst werden (Fig. 4-2).

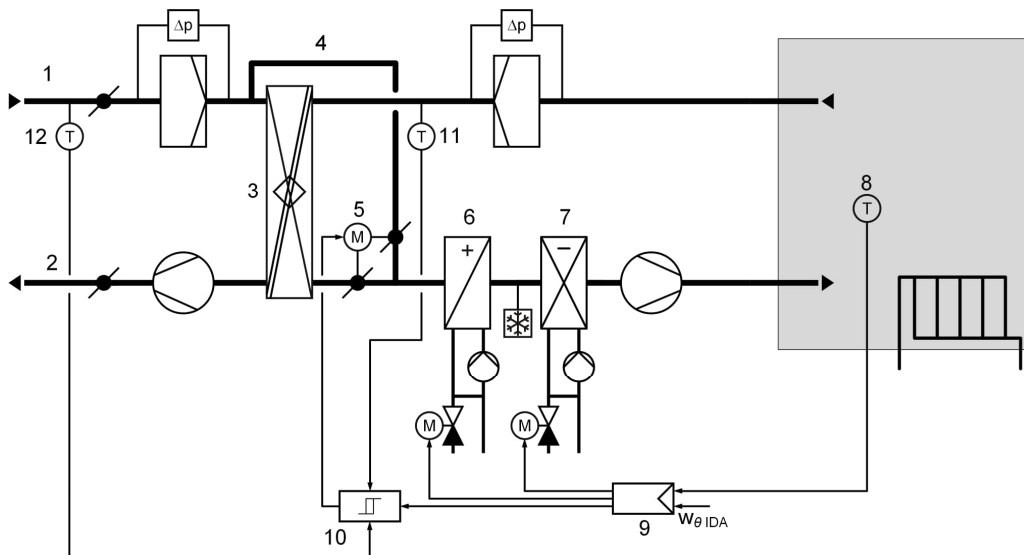


Fig. 4-2 Leistungsregelung durch Umföhrungskanal in der Außenluft

- | | |
|---|--|
| 1 Außenluftkanal | 7 Luftkühler mit Einspritzschaltung |
| 2 Fortluftkanal | 8 Raumtemperaturfühler |
| 3 WRG (Platten-Wärmeübertrager) | 9 Raumtemperaturregler |
| 4 Umföhrungskanal zur Leistungsregelung | 10 Zweipunkt-Umschalter (WRG Max./ Min.) |
| 5 Luftklappen mit Stellantrieb | 11 Abluftfühler |
| 6 Lufterhitzer mit Einspritzschaltung | 12 Außenluftfühler |

Die richtige Dimensionierung des Umföhrungskanals und der Einbau von gegenläufigen Segmentklappen sind entscheidende Voraussetzungen zur guten Regelbarkeit dieses Systems.

Im WRG-System dieser Anlage wird sich, je nachdem ob die Temperatur der Außenluft tiefer oder höher ist als diejenige der Abluft, die Richtung des Wärmefflusses ändern.

Dies Temperatur-Unterschiede, die eine Wirkungsumkehr im Regelkreis verursachen, werden durch den Außenluft- und den Abluftfühler erfasst und durch die WRG-Umschaltfunktion berücksichtigt: Sobald die Außenlufttemperatur θ_{12} höher ist als die Ablufttemperatur θ_{11} , wird die Wärmerückgewinnung unabhängig vom momentanen Regelsignal auf Maximalbetrieb gesteuert (vgl. Fig. 4-3). Dies gilt für alle WRG, bei denen die Richtung des Wärmefflusses wechseln kann.

4.2.2. Sequenzschaltung von WRG – Heizventil – Kühlventil

Die WRG ist das erste Element, welches die Leistung zu regulieren beginnt, bevor der Lufterwärmer respektive der Luftkühler dazu geschaltet wird. Durch die WRG wird die Lufttemperatur im Heizfall erhöht und im Kühlfall abgesenkt. Dies funktioniert, da sich die WRG vor dem Lufterwärmer /-kühler befindet (Fig. 4-2).

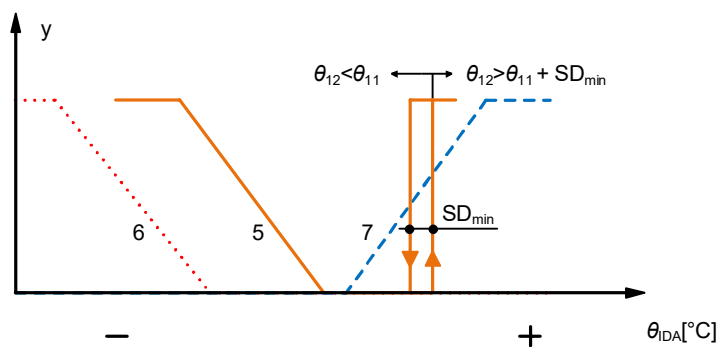


Fig. 4-3 Sequenz-Diagramm WRG – Heizventil – Kühlventil

y	Hub (Stellgröße)	5	Stellsignal WRG
θ_{IDA}	Raumtemperatur (- = $\theta_{ODA} < \theta_{IDA}$; + = $\theta_{ODA} > \theta_{IDA}$)	6	Stellsignal Heizventil
θ_{12}	Außenlufttemperatur	7	Stellsignal Kühlventil
θ_{11}	Ablufttemperatur	SD_{min}	min. Schaltdifferenz

4.3. Rotations-Wärmeübertrager (regenerative WRG)

Rotierende, zellenförmige Speichermasse wird wechselseitig von Außenluft und Abluft durchströmt. Dabei wird die rotierende Masse durch den einen Luftstrom mit Wärme beladen, anschließend in den anderen Luftstrom gedreht und dort wieder entladen (regeneriert).

Das Maß der Wärmeübertragung kann durch Veränderung der Rotor-Drehzahl beeinflusst werden. Durch hygroskopische Beschichtung der Speicher Oberfläche kann auch Feuchte, bzw. Enthalpie übertragen werden.

Die in der Lüftungs- und Klimatechnik eingesetzten Konstruktionen lassen die Speichermasse kontinuierlich mit ca. 1... max. 15 Umdrehungen pro Minute [min^{-1}] zwischen dem Außen- und Fortluftkanal rotieren. Der Änderungsgrad ist abhängig von der Drehzahl des Rotors und von der Anström-Luftgeschwindigkeit.

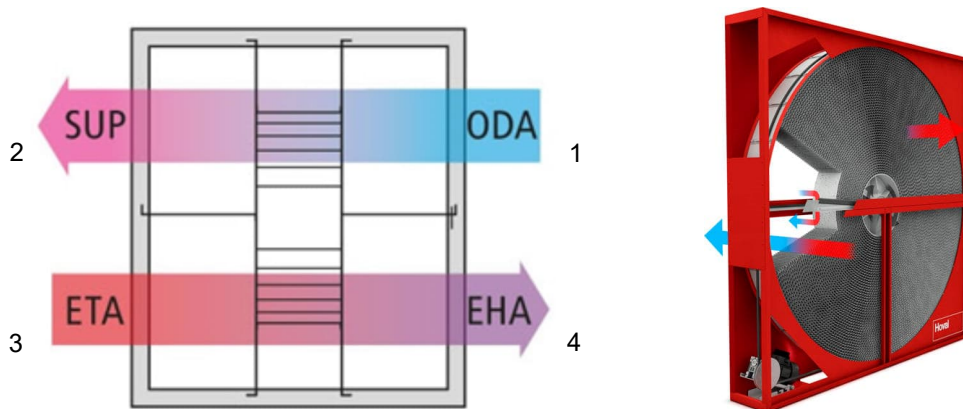


Fig. 4-4 Regenerative WRG: Rotations-Wärmeübertrager Schnittbild und Prinzip (Sommerfall) (Quelle: Wolf, Hoval)

- | | |
|-------------------|------------------|
| 1 Außenluft (ODA) | 3 Abluft (ETA) |
| 2 Zuluft (SUP) | 4 Fortluft (EHA) |

4.3.1. Regelung

Die Leistungsregelung der Wärmerückgewinnung erfolgt über die Drehzahl des Rotors. Steigt sie, so nimmt der Änderungsgrad zu, bis eine obere Grenzdrehzahl erreicht ist. Der Verlauf des Anstiegs ist auch von der Anströmgeschwindigkeit abhängig. Bei kleinen Luftgeschwindigkeiten können Schwierigkeiten (Regelschwingungen) auftreten, da zur Reinhaltung des Rotors die Drehzahl meist auf einem unteren Wert begrenzt wird. Somit muss die WRG einerseits bei Erreichen der unteren Begrenzung ganz ausgeschaltet, andererseits aber (zur Rotorreinigung) periodisch für kurze Zeit wieder in Betrieb gesetzt werden. Dieser EIN-/AUS-Betrieb kann jedoch durch richtige Auslegung des Apparates vermieden werden.

4.4. Kreislaufverbund System KVS (regenerative WRG)

4.4.1. Regelung

Die traditionelle KVS-WRG besteht aus einer Pumpe und einem Dreiwegventil (Umlenkschaltung) für die Leistungsregulierung und den Vereisungsschutz. Da die Pumpe dauernd einen konstanten Volumenstrom fördert und der Druckverlust über das Dreiwegventil überwunden werden muss, führt dies zu einem unnötig hohen Stromverbrauch.

Die energieoptimierte Regelung erfolgt heute wie in Fig. 4-5 gezeigt über ein Bypass-Regelventil (5) und über eine drehzahlgeregelte Pumpe (4).

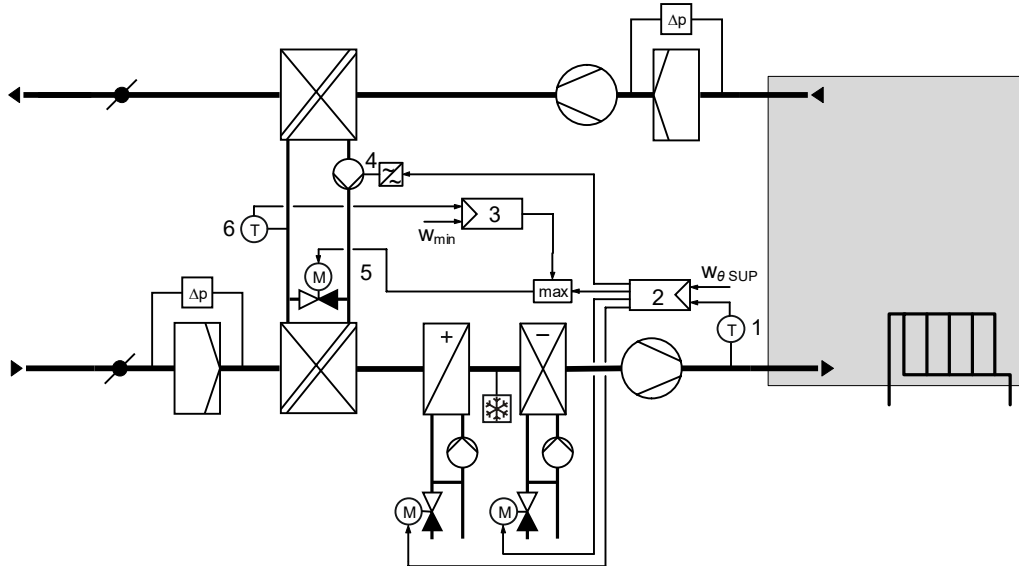


Fig. 4-5 KVS-WRG-Regelung

1	Zulufttemperaturfühler	4	Umwälzpumpe (drehzahlgeregelt)
2	Zulufttemperaturregler	5	Bypass-Regelventil
3	Vereisungsschutzregler	6	Vereisungsschutzfühler

Das Bypass-Regelventil wird für den Schwachlastbetrieb und für den Einfrierschutz am Abluft-Wärmestromtauscher verwendet.

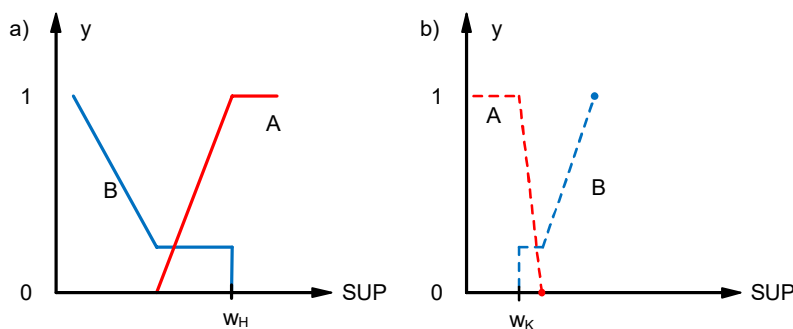


Fig. 4-6 Sequenzdiagramm Pumpe – Bypass Regelventil

a)	Regelsequenz Heizen	b)	Regelsequenz Kühlen
A	Bypass Regelventil	w_H	Sollwert Heizen
B	Drehzahlgeregelte Pumpe	w_K	Sollwert Kühlen

Im Kühlfall b) ist zu berücksichtigen, dass die KVS-WRG viel Pumpenstrom verbraucht, weil sie normalerweise auf max. Drehzahl arbeitet (vgl. 4.2.2 und Fig. 4-3 WRG-Regelung im Kühlfall). Dieser Pumpenstromverbrauch ist in Bezug zu setzen zur thermischen Rückgewinnung im Kühlfall. In Anlagen mit ausgedehnten Verbindungsleitungen und großen Pumpen lohnt es sich daher oft nicht, diese KVS-WRG im Kühlfall zu betreiben.

In Anlagen mit stark variierendem Luftstrom muss das maximal umgewälzte Zwischenmedium z.B. durch Drehzahlsteuerung der Pumpe dem Luftmassenstrom angepasst werden. Dadurch wird das Wasserwertverhältnis (Wärmestrom der Luft / Wärmestrom des Zwischenmediums) von 1 eingehalten und die Anlage arbeitet so mit optimalem Gesamt-Änderungsgrad.

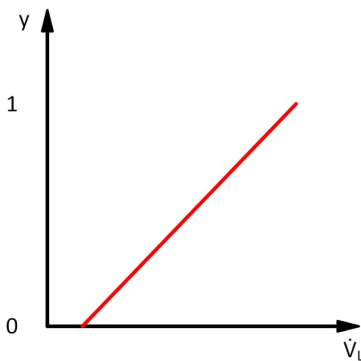


Fig. 4-7 Funktionsdiagramm Pumpendrehzahl-Luftvolumenstrom bei geschlossenem Bypass

$\dot{V}_L$ Luftvolumenstrom

y Pumpendrehzahl

4.5. Wärmerohre (Heat pipes)

Bei den Wärmerohren handelt es sich um einen Kältemittelkreislauf ohne Zufuhr von Hilfsenergie. Das Wärmerohr ist wartungsfrei und benötigt auch keinen Vereisungsschutz. Die Leistungsregelung ist relativ schwierig und kann z.B. durch Bypass oder durch Veränderung des Kippwinkels mit Hilfe eines Stellantriebes erfolgen.

4.6. Vereisungsschutz

Der Vereisungsschutz wird benötigt, wenn bei Außentemperaturen unterhalb des Gefrierpunktes der Taupunkt der Abluft unterschritten wird und das anfallende Kondensat auf der Fortluftseite gefriert und sich als Eis an der Wärmetauscher-Oberfläche festsetzt. Der freie Querschnitt in der Abluftseite wird kleiner. Dadurch erhöht sich der Druckverlust über die WRG und der Wirkungsgrad nimmt ab. Einen Vereisungsschutz benötigen alle WRG Systeme (ausgenommen Wärmerohre). Rotationswärmetauscher haben jedoch eine höhere Toleranz, da das System nicht statisch ist, sondern rotiert. Unter der Annahme, dass der Rotationswärmetauscher max. 15 Umdrehungen pro Minute [min^{-1}] macht, müsste die Eisbildung innerhalb von wenigen Sekunden (2...4) geschehen. Dies kann erst bei sehr tiefen Außentemperaturen auftreten (Herstellerangaben prüfen).

4.6.1. Platten- oder Röhren-Wärmeübertrager

Ist eine Beimischung von Abluft erlaubt, so kann der Vereisungsschutz ohne Verminderung des Änderungsgrades realisiert werden.

Müssen Fortluft und Außenluft vollkommen getrennt bleiben, so kann das Vereisungsproblem entweder mit einem Vorwärmer im Außenluftkanal oder durch einen Umföhrungskanal mit Regelklappen gelöst werden.

Die erstgenannte Möglichkeit kann mit einem Elektro- oder Warmwasser-Lufterwärmer, welcher die Eintrittstemperatur der Außenluft auf einen einstellbaren minimalen Wert erhöht, ausgeführt werden.

Bei der zweitgenannten Möglichkeit mit Umföhrungskanal wird die Fortluft-Austrittstemperatur auf einen Minimalwert begrenzt, indem der Außenluft-Volumenstrom durch den Wärmeübertrager entsprechend reduziert wird. Es ist auch denkbar, dass der Temperaturfühler für den Vereisungsschutz im Wärmeübertrager an der kritischen Stelle montiert wird. Weiter kann der Feuchtegehalt der Abluft mitberücksichtigt werden, damit der Vereisungsschutz wirklich nur dann aktiviert wird, wenn eine entsprechend große Menge Kondensat anfällt.

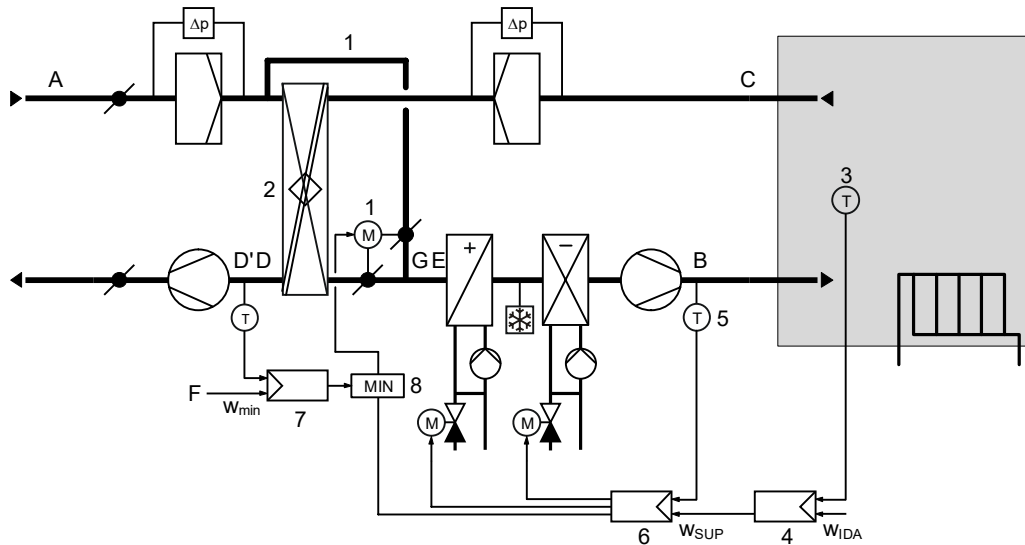


Fig. 4-8 Vereisungsschutzregelung durch Umföhrungskanal für die Außenluft

1	Umföhrungskanal	2	WRG durch Platten-Wärmeübertrager
3	Raumtemperaturfühler	4	Raumtemperaturregler (Kaskaden-Hauptregler)
5	Zulufttemperaturfühler	6	Zulufttemperaturregler (Kaskaden-Hilfsregler)
7	Vereisungsschutzregler	8	Vorrangauswahl (MIN)
A	Außenluft	C	Abluft

Anstelle des Temperaturfühlers und Temperaturreglers kann für den Vereisungsschutz auch eine Druckdifferenzregelung im Abluft-Fortluft-Kanal (mit je einem Druckfühler vor und nach der WRG) eingesetzt werden, da durch eine zunehmende Vereisung der Wärmeübertragerflächen die Druckdifferenz ansteigt. Dabei ist zu beachten, dass damit aber eine teilweise Vereisung zugelassen wird.

Alle Vereisungsschutzregelungen können mit der WRG-Regelung kombiniert werden, indem sie über eine Vorrangschaltung auf das gleiche Stellglied wirken.

Vereisungsschutz-Beispiel im h,x-Diagramm (vgl. Fig. 4-9)

Außenluftzustand (A)	-10 °C / 90 % r.F. / 1,4 g/kg / 1,34 kg/m ³
Zulufttemperatur gewünscht (B)	21 °C
Abluftzustand (C)	24 °C / 35 % r.F. / 6,5 g/kg / 1,18 kg/m ³
WRG Rückwärmzahlen $\eta_{\text{trocken}} / \eta_{\text{feucht}}$	80 % / 83 %
Einfrierschutzgrenze (F)	3 °C

Die Außenluft (A) wird mit Hilfe der WRG durch die warme Abluft (C) auf den Zustand (E) erwärmt. Der Lufterwärmer bringt diese dann auf die gewünschte Zulufttemperatur (B). Die Abluft (C) kühlt sich in der WRG auf den Zustand (D) ab. Dabei unterschreitet sie den Taupunkt der Abluft (C) von ca. 7,5 °C und somit wird auch Kondensat ausgeschieden. Die durch die Kondensation freigesetzte Wärme hilft mit bei der Erwärmung der Außenluft. Der erreichbare Zustand (D) liegt auf der Sättigungslinie und hängt von den WRG Rückwärmzahlen $\eta_{\text{trocken}} / \eta_{\text{feucht}}$ und dem Volumenstrom-Verhältnis (Außenluft/Abluft) ab.

Der Vereisungsschutzregler 7 begrenzt zusammen mit der Vorrangauswahl 8 die Leistung der WRG, sobald die Fortlufttemperatur (D) unter den Grenzwert von 3 °C fällt => Fortluftzustand D'. Die WRG-Leistungsreduktion (- Δh in Fig. 4-9) erfolgt, in dem ein Teil der Außenluft über den Umföhrungskanal strömt. Dadurch kann die Außenluft mit Hilfe der WRG nur noch bis auf eine Lufttemperatur (G) erwärmt werden (Δh WRG).

Der Lufterwärmer (LE) muss nun die Luft von (G) zusätzlich auf (E) nachwärmen (+ Δh = 2,7 kJ/kg in Fig. 4-9). Dies ist eine nicht zu vernachlässigende Lufterwärmer-Leistung, was bei der Auslegung des Lufterwärmers unbedingt beachtet werden muss.

Die Einfrierschutzgrenze ist abhängig vom WRG-Produkt. Daher die, für eine Anlage geltende, Einfrierschutzgrenze unbedingt beim Hersteller nachfragen, damit diese nicht zu hoch eingestellt wird und dadurch die WRG zu früh begrenzt wird => unnötig hoher Energieverbrauch LE.

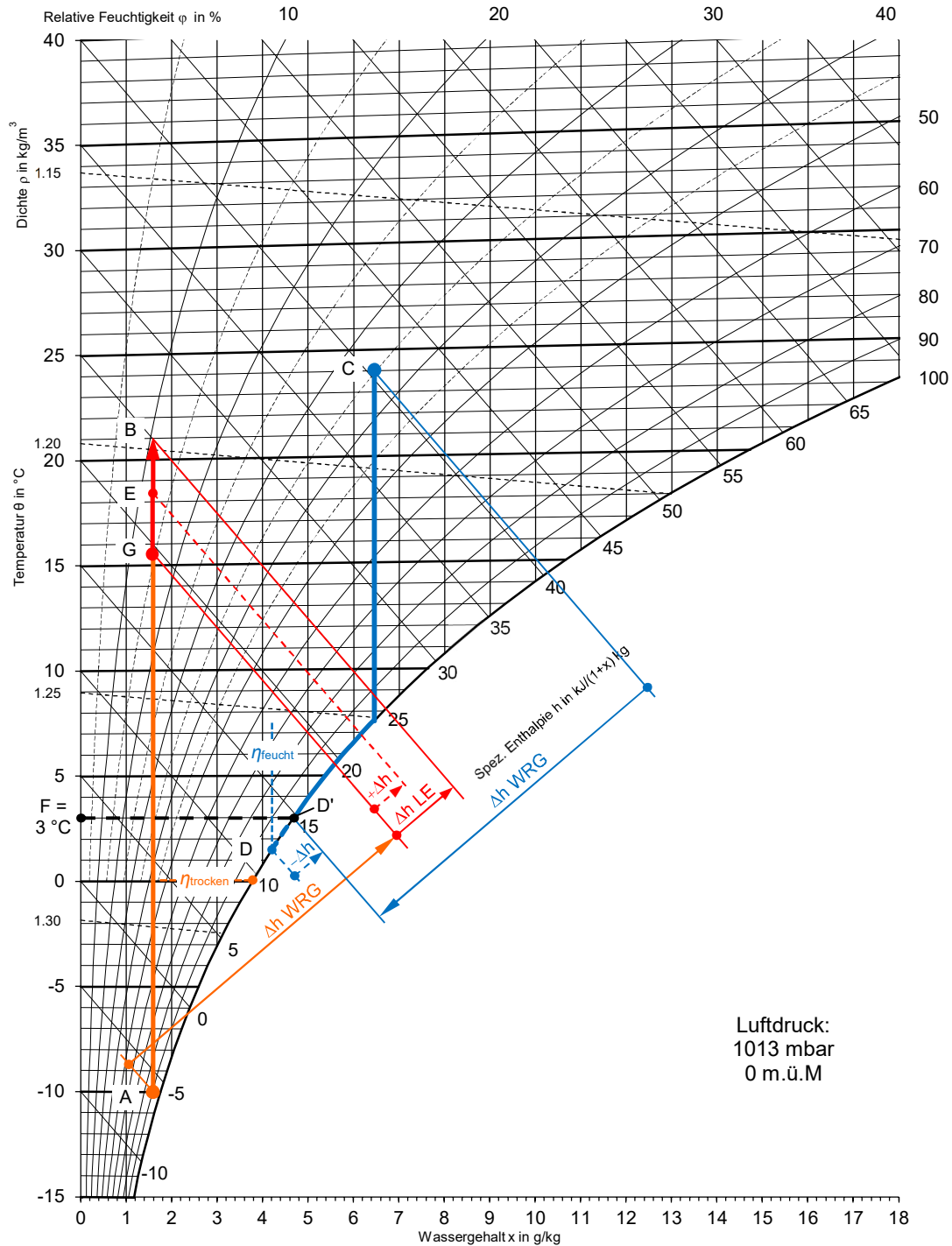


Fig. 4-9 h,x -Diagramm zum Vereisungsschutz eines Plattenwärmetauschers

- A Außenluftzustand
- B erwünschte Zulufttemperatur
- C Abluftzustand
- D Fortluftzustand (bei voller WRG-Leistung)
- E Luftzustand nach WRG (bei voller WRG-Leistung, Lufterwärmer-Eintritt)
- F Einfrierschutzgrenze z.B. bei 3 °C

bei aktivem Vereisungsschutz:

- D' Fortluftzustand
- G Luftzustand nach WRG (Lufterwärmer-Eintritt)
- D→D' WRG-Leistungsreduktion ($-\Delta h$)
- G→E zusätzlich notwendige Lufterwärmer-Leistung ($+\Delta h$)
- G→B gesamthaft notwendige Lufterwärmer-Leistung (Δh_{LE})

4.6.2. Kreislaufverbundsysteme (KVS)

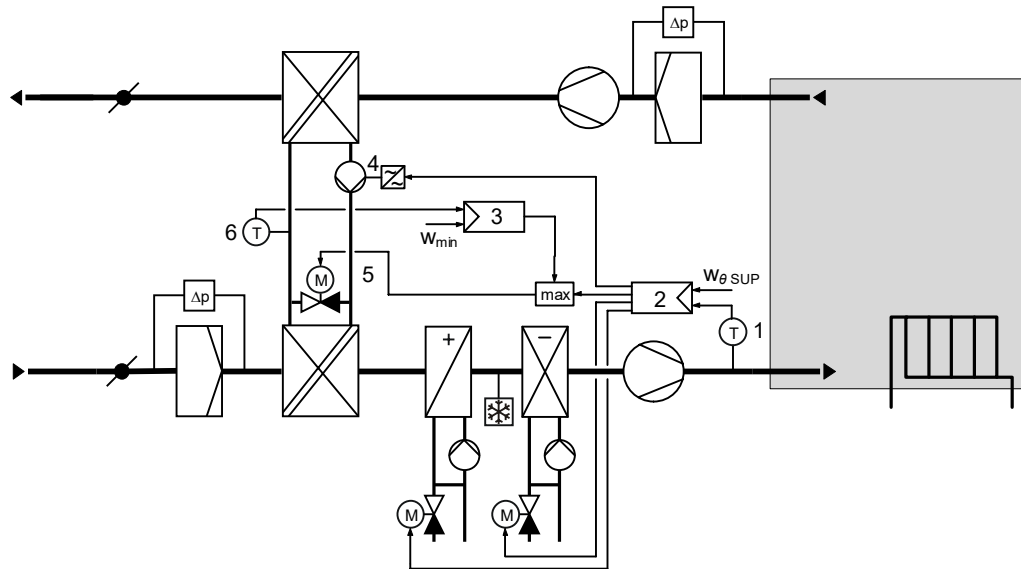


Fig. 4-10 KVS-WRG-Regelung

- | | | | |
|---|------------------------|---|--------------------------------|
| 1 | Zulufttemperaturfühler | 4 | Umwälzpumpe (drehzahlgeregelt) |
| 2 | Zulufttemperaturregler | 5 | Bypass-Regelventil |
| 3 | Vereisungsschutzregler | 6 | Vereisungsschutzfühler |

Zur Verhinderung von Eisbildung am Abluft-/Fortluft-Wärmetauscher, wird die Temperatur des WRG-Mediums hin zu diesem Wärmetauscher mit einem Vereisungsschutzfühler (6) überwacht. Sinkt diese Temperatur z.B. unter $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, dann wirkt der Vereisungsschutzregler (3) begrenzend auf die Temperaturregelung (2) und übersteuert das Stellsignal zum Bypassventil (5). Dieses wird so weit wie notwendig geöffnet und es wird warmes WRG-Medium umgelenkt. Dadurch wird die Abluft weniger stark gekühlt (auf eine Fortlufttemperatur von ca. $2\ldots 3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Durch diese Begrenzung wird die WRG-Leistung reduziert (wie zuvor schon unter 4.6.1 im h,x -Diagramm gezeigt). Die Wärmeleistung, um trotzdem die gewünschte Zulufttemperatur zu erreichen, muss nun durch den Lufterwärmer nach der WRG geliefert werden können.

Bei welchem Betriebszustand wirklich Vereisungsgefahr besteht, ist nicht nur von der Außentemperatur, sondern auch von der Ablufttemperatur und vom Temperatur-Änderungsgrad des WRG-Systems abhängig.

Fig. 4-11 zeigt die minimal zulässige Außentemperatur in Abhängigkeit vom Temperatur-Änderungsgrad φ_{θ} bei einer Ablufttemperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aus dem eingezeichneten Beispiel ist ersichtlich, dass bei einem Temperatur-Änderungsgrad von 50 % die zulässige minimale Außentemperatur ungefähr $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt. Die genauen Angaben dazu sind beim Hersteller nachzufragen.

Ist eine Vereisungsschutzregelung erforderlich, so kann diese über eine Vorrangschaltung mit der Leistungsregelung kombiniert werden.

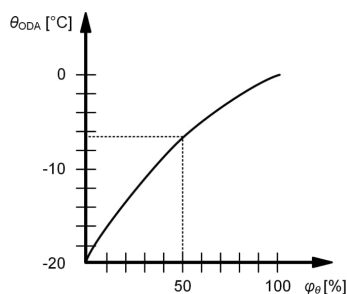


Fig. 4-11 Minimal zulässige Außentemperatur θ_{ODA} in Funktion des Temperatur-Änderungsgrades φ_{θ}

4.6.3. Rotationswärmetauscher

Bei Unterschreiten einer Grenztemperatur (erst bei sehr tiefen Außentemperaturen), die vom Hersteller festgelegt wird, kann der Rotor vereisen. Diese Grenztemperatur muss durch einen Lufterwärmer oder – wenn dies zulässig ist – durch Umluftbeimischung gehalten werden. Die Vereisungsschutzregelung durch Umluft-Beimischung wird unter Kapitel 4.7 behandelt.

4.7. Kombination von WRG mit Umluftbeimischung

Wird eine WRG in eine Luftaufbereitungsanlage eingebaut, bei der auch ein Umluftanteil (RCA) von ca. 50 % zulässig ist, so ist es sinnvoll, den Wärmerückgewinn durch eine Kombination der WRG mit einer Umluftbeimischung zu steigern. Für eine solche Kombination kommt praktisch nur ein Rotations-Wärmeübertrager in Frage, weil das Kreislaufverbund-System und der Platten-Wärmeübertrager nur dann als WRG gewählt werden, wenn absolut kein Luftaustausch zwischen Abluft und Zuluft gestattet ist, also keine Umluft verwendet werden kann.

In diesem Kapitel sollen einerseits die prinzipiellen anlagentechnischen Varianten erklärt und andererseits die dadurch erzielbaren Temperatur-Änderungsgrade aufgezeigt werden.

4.7.1. Umluftbeimischung nach der WRG

Die Anordnung gemäß Fig. 4-12 erfordert eine sorgfältige Dimensionierung der Mischklappen, damit diese Kombination auch zufriedenstellend geregelt werden kann. Diese Abstimmung erfolgt in der Regel durch den Lüftungsgeräte-Hersteller.

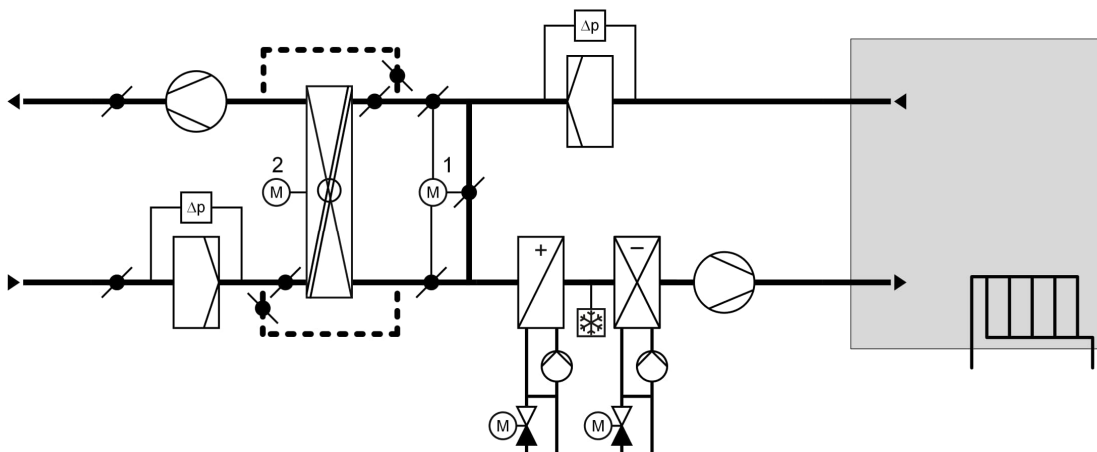


Fig. 4-12 Umluftbeimischung nach der WRG

1 Umluft-Beimischklappen

2 WRG (mit Umgehung)

Regelung

Die WRG und die Luftklappen sollen in Folge geschaltet werden. Apparate, die mit Hilfsenergie arbeiten, werden dabei erst nach der Umluftbeimischung zugeschaltet.

Im Regelbereich der Luftklappen ist die WRG noch ausgeschaltet und eventuell sogar überbrückt, um den Widerstand für den Ventilator zu reduzieren (vgl. Umgehungskanäle mit Umstellklappen).

Es liegt somit eine reine Mischung von zwei Luftströmen vor. Die Betriebskennlinie des Klappensystems (Außenluftanteil in Funktion des Klappendrehwinkels) muss daher linear verlaufen. Außerdem sollte der Gesamtluftstrom im ganzen Drehwinkelbereich möglichst konstant bleiben.

Im Regelbereich der WRG stehen die Mischklappen in der Stellung mit minimalem Außenluftanteil. Die Dimensionierung und die Regelung der WRG sind deshalb für diese Betriebsverhältnisse auszu-legen.

4.8. Umluftbeimischung

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei Gebäuden, bei welchen die Lüftungs- und Klimaanlage den gesamten Heiz-/ Kühlergiebedarf abdecken muss, kann bei Lüftungs- und Klimaanlage ein Teil der Abluft, sofern deren hygienische Qualität dies zulässt (z.B. der hygienische Luftaustausch ist gleich dem Außenluftanteil), wieder der angesaugten Außenluft beigemischt werden. Die Mischluft wird dann nach der weiteren Aufbereitung (filtern, erwärmen oder kühlen usw.) wieder dem Raum zugeführt.

Durch die Beimischung warmer Abluft aus dem Raum kann im Winter, gegenüber reinem Außenluftbetrieb, der Heizenergieverbrauch beträchtlich reduziert werden. Im Sommer wird, sofern eine Kühlung vorhanden ist, der warmen Außenluft kühlere Abluft aus dem Raum beigemischt, wodurch bedeutend weniger Kühlenergie benötigt wird.

Die Umluft-Beimischung wird mit Hilfe von stetig verstellbaren Außenluft-, Fortluft- und Umluftklappen erreicht. Im Kühlbetrieb der Klimaanlage bleiben die Außen- und die Fortluftklappe so lange ganz offen bzw. die Umluftklappe geschlossen, bis die Außenlufttemperatur die Ablufttemperatur übersteigt. Ist dies der Fall, wird der Außenluftanteil sofort auf das erforderliche Minimum reduziert. Sinkt aber die Zulufttemperatur unter ihren Sollwert, so werden die Außen- und Fortluftklappe stetig geschlossen und die Umluftklappe entsprechend geöffnet, bis die minimale Außenluftmenge erreicht ist. Weil der Volumenstrom durch die Luftklappen sich nicht linear zum Schließwinkel ändert, sollte die minimale Außenluftmenge nach gemessenen Werten eingestellt werden. Die minimal zulässige Außenluftmenge kann normalerweise am Temperaturregler, als Minimalbegrenzung des betreffenden Stellsignals eingestellt werden.

Die Umluft-Beimischung kann nach verschiedenen Kriterien gesteuert werden, z. B.:

- Konstante Umluft-Beimischung
- Manuelle Steuerung
- Außentemperaturabhängige Steuerung
- nach dem Stellsignal eines Mischlufttemperatur- oder Mischlufterthalpie-Reglers
- nach dem Stellsignal eines Zulufttemperatur-Sequenzreglers mit den Stellsequenzen: Heizventil - Kühlventil - Luftklappen

Die reine Umluftbeimischung ist per Definition in den Normen keine Wärmerückgewinnung, sondern eher eine Vermeidung von unnötigem Energieverlust mit der Fortluft.

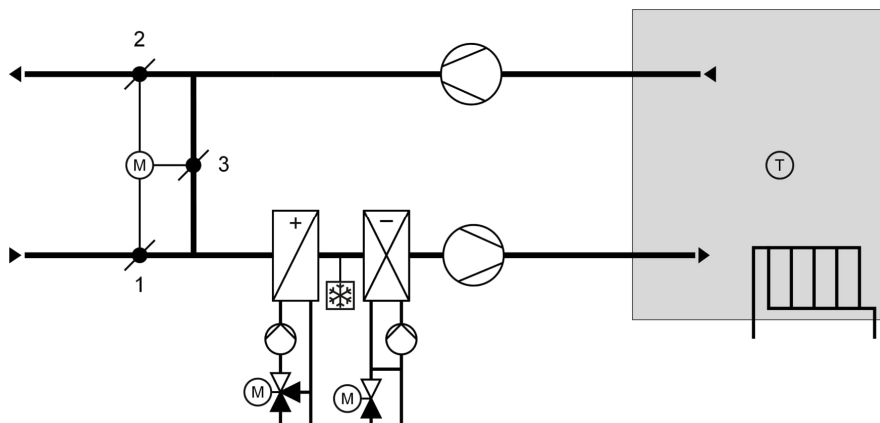


Fig. 4-13 Umluftbeimischung

- | | | | |
|---|-----------------|---|----------------|
| 1 | Außenluftklappe | 2 | Fortluftklappe |
| 3 | Umluftklappe | | |

Wenn aus hygienischen Gründen der Umluftanteil etwa 50 % nicht übersteigen darf, lohnt sich in der Regel eine Kombination der Umluftbeimischung mit einer WRG. Solche Kombinationen mit den entsprechenden Steuer- und Regelfunktionen sind unter Kapitel 4.7 beschrieben.

4.9. Wärmepumpen

Mit einer Wärmepumpe kann der Abluft einer Lüftungs- oder Klimaanlage mehr Wärme entzogen werden als mit den übrigen WRG-Bauformen. Einfache Wärmepumpen transportieren die Wärme nur in einer Richtung.

- Soll die Richtung des Wärmetransportes wechseln können, z.B. bei Kühlbetrieb der Anlage, so muss die Wärmepumpe mit einer entsprechenden Umkehrschaltung ausgerüstet werden.

Durch die interessanten Preise und die verbesserte Regelbarkeit solcher Wärmepumpen, kommen diese vermehrt zum Einsatz.

Wärmepumpen eignen sich aber besonders für WRG-Systeme in Industriebetrieben, wo z. B. relativ konstante Mengen von Prozessabwärme durch ein Lüftungssystem abgeführt werden müssen.

5 Teilklima-Anlagenkonzepte

5.1. Aufbau und Anwendungsbereiche

Teilklimaanlagen bringen gute Resultate im gemäßigten Klima, da nur an wenigen Tagen im Jahr die Außenluftfeuchte über 65 % r.F. ansteigt. Besonders günstig sind sie in Anlagen mit vielen inneren Wärmequellen Q_i , da durch das Kühlen auch entfeuchtet werden kann. Dazu muss aber die Eintrittstemperatur des Kühlmediums mindestens 2 bis 3 K tiefer liegen als die Taupunkttemperatur der zu kühlenden Zuluft.

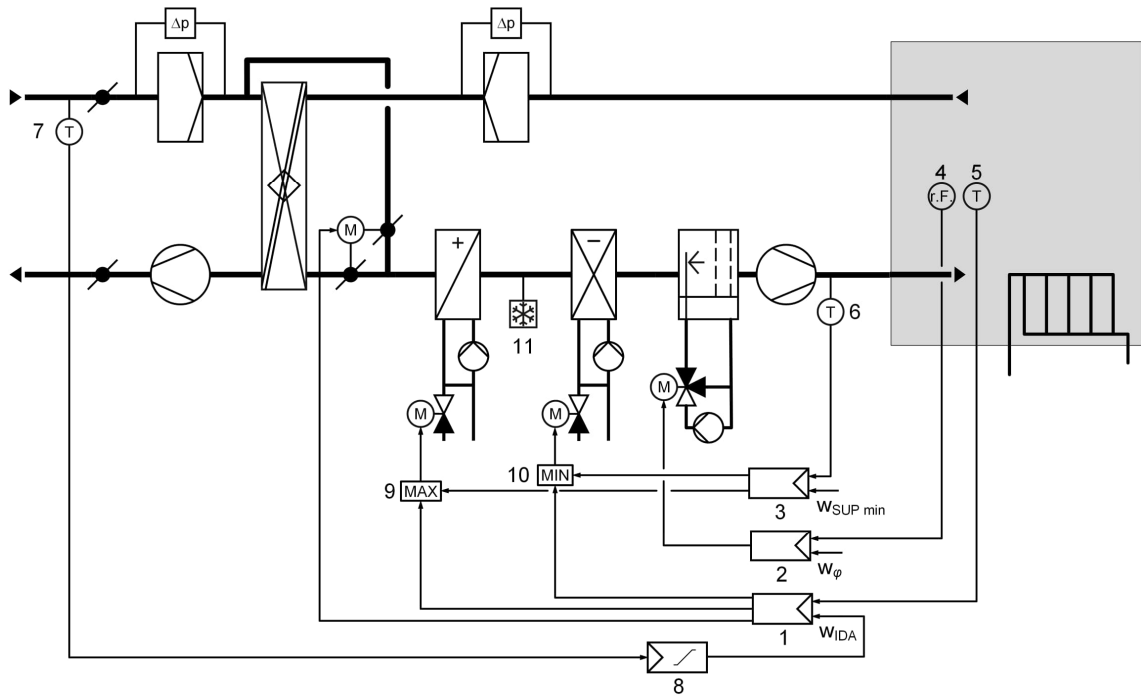


Fig. 5-1 Aufbau einer Teilklimaanlage

1	Raumtemperaturregler	7	Außentemperaturfühler
2	Raumfeuchteregler	8	Sollwert-Führungsgeber
3	Zulufttemperatur-Minimal-Begrenzer	9	Maximal-Vorrangauswahl
4	Raumfeuchtefühler (rel. Feuchte)	10	Minimal-Vorrangauswahl
5	Raumtemperaturfühler	11	Frostschutzthermostat
6	Zulufttemperaturfühler		

5.1.1. Temperaturregelung

Der Raum- oder Zulufttemperatur-Regler regelt die WRG und das Heiz- und Kühlventil in Sequenz. Der Zulufttemperatur-Minimalbegrenzer (3) vermeidet Zuglufterscheinungen im Raum. Die Raumtemperatur-Sollwerte können durch einen Außentemperatur-Führungsgeber (8), oder mit einer Totzonenregelung dem Sommer-/Winterbetrieb angepasst werden. Für größere Distanzen zwischen Lüftungsgerät und Raum empfiehlt sich eine Raum-/Zulufttemperatur-Kaskadenregelung.

5.1.2. Feuchteregelung

Ein Fühler misst die relative Raumfeuchte, der Feuchteregler steuert aber nur das Befeuchterventil (keine Entfeuchtung). Es können dafür verschiedene Befeuchtertypen eingesetzt werden:

- Regelbarer Verdunstungsbefeuchter (Befeuchtungswirkungsgrad siehe Kap. 2)
- Regelbarer Dampfbefeuchter (max. Begrenzung der Zuluftfeuchte erforderlich!)

5.1.3. Zustandsänderungen im h,x-Diagramm

Fig. 5-2 zeigt die Zustandsänderungen der Luft im Heizbetrieb, entweder mit regelbarer Sattdampfbefeuchtung oder mit regelbarem Verdunstungsbefeuchter, anhand eines Beispiels:

Beispiel

Vorgaben:

Raumluf-Sollzustand	21 °C / 35 % r.F.
Außenluftzustand	- 8 °C / 80 % r.F.
Erforderliche Temperaturdifferenz $\theta_{\text{SUP}} - \theta_{\text{IDA}}$ (Heizleistung)	8 K

Fig. 5-3 zeigt die Zustandsänderungen der Luft im Kühlbetrieb mit Entfeuchtung durch Kühlung, anhand eines Beispiels:

Beispiel

Annahmen:

Raumluf-Sollzustand	24 °C / < 60 % r.F.
Außenluftzustand nach WRG (max.)	30 °C / 45 % r.F.
resp.	27 °C / 65 % r.F.
Erforderliche Temperaturdifferenz $\theta_{\text{IDA}} - \theta_{\text{SUP}}$ (Kühlleistung)	7 K
Mittlere Kühlflächentemperatur	ca. 10 °C

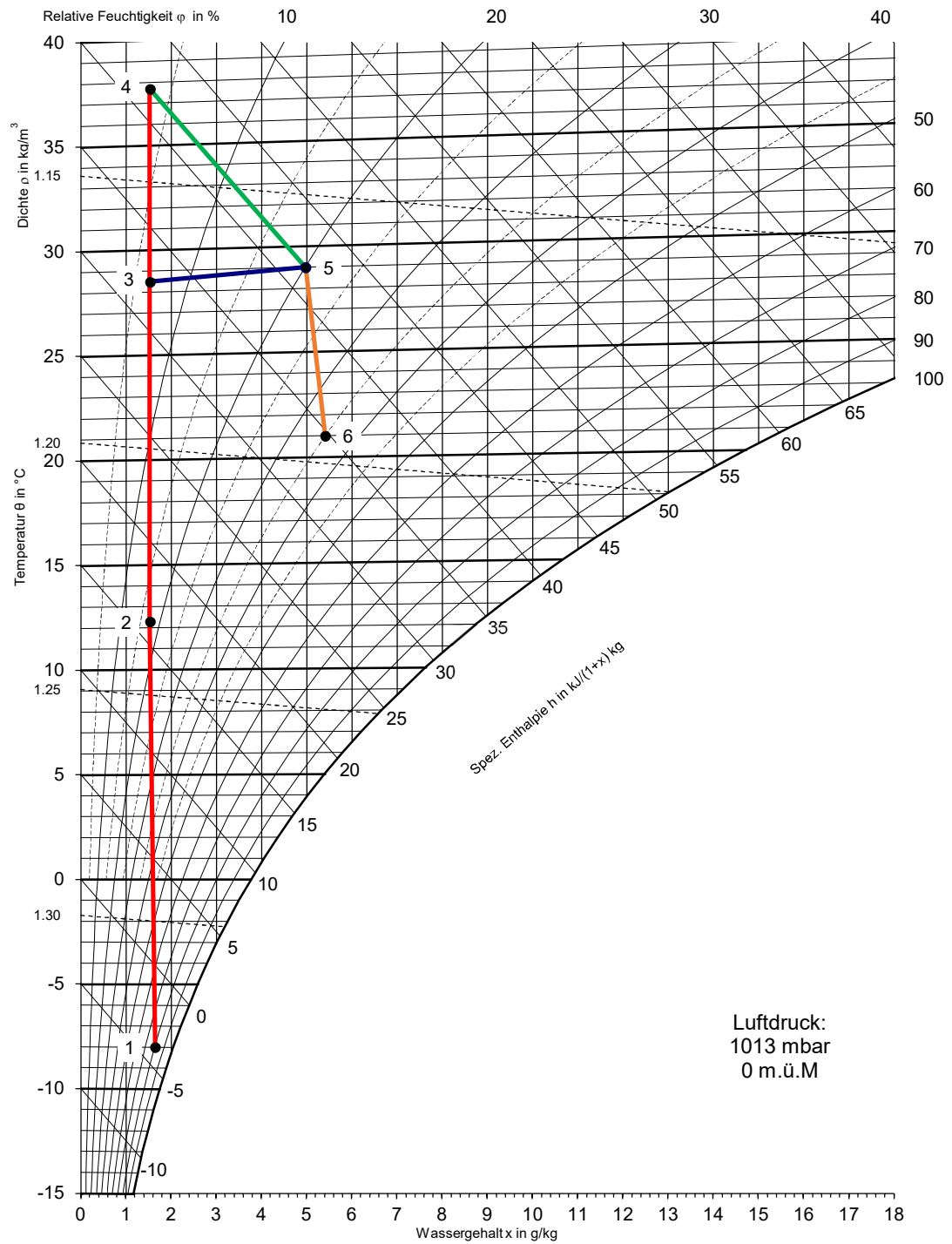


Fig. 5-2 Zustandsänderungen Heizen - Befeuchten in Teilklimaanlage

- 1 Außenluftzustand
- 2 Zustand nach WRG
- 3 Dampfbefeuchter-Eintritt
- 4 Verdunstungsbefeuchter-Eintritt
- 5 erforderlicher Zuluft-Zustand bei Raumeintritt (Heizleistung, $\theta_{DA} + 8 \text{ K}$)
- 3-5 Verlauf Befeuchtung mit Dampfbefeuchter
- 4-5 Verlauf Befeuchtung mit regeltem Verdunstungsbefeuchter
- 6 Raumluft-Sollzustand (θ, φ)

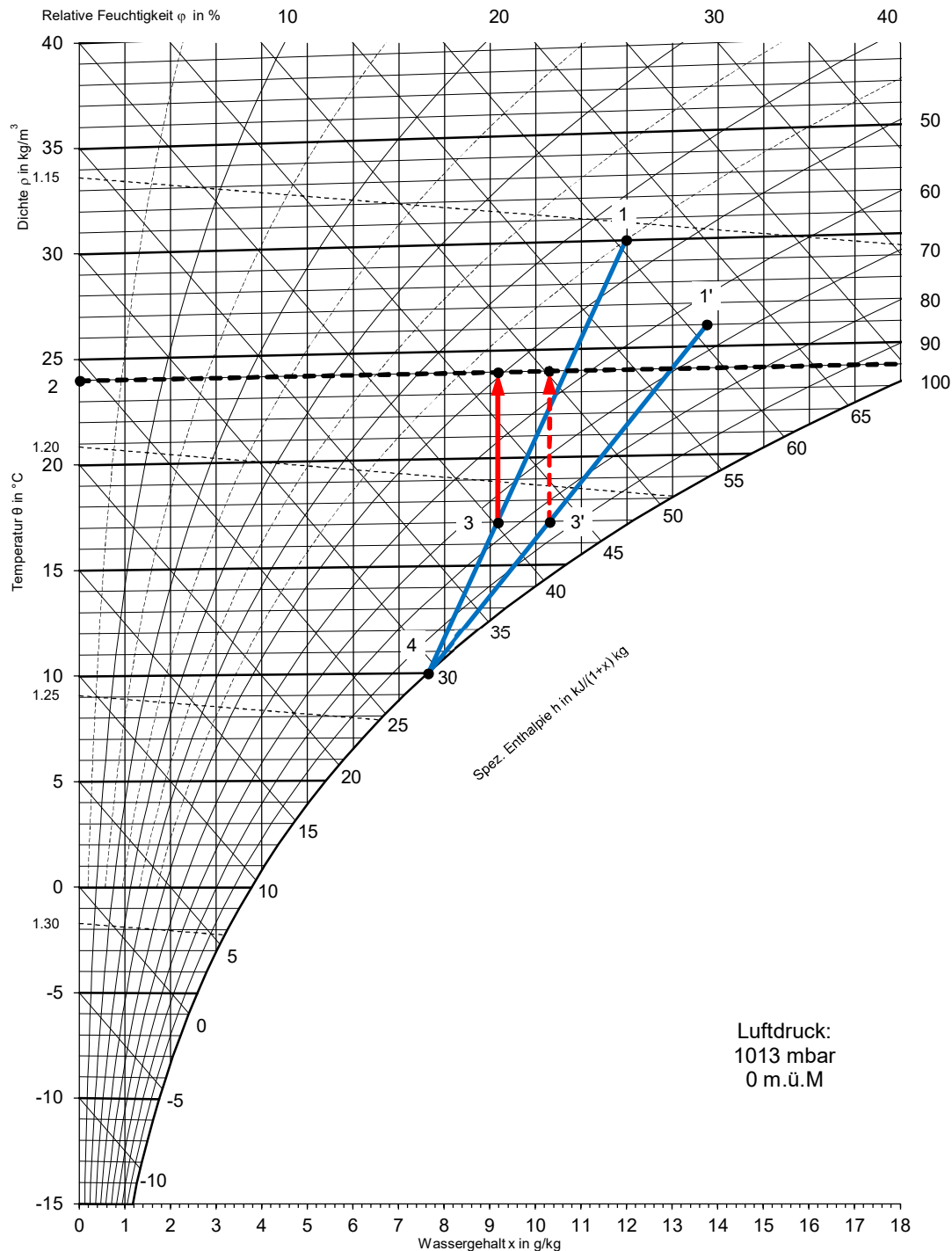


Fig. 5-3 Zustandsänderungen Kühlen - Entfeuchten in Teilklimaanlage

- 1 (1') Außenluftzustände (Kühler-Eintritt)
- 2 Raumlufthtemperatur θ_{IDA} Sollwert
- 3 (3') erforderlicher Zuluft-Zustand bei Raumeintritt (Kühlleistung; $\theta_{IDA} - 7 \text{ K}$)
- 4 mittlere Kühlflächentemperatur

Die eingezeichneten Zustandsänderungen gelten nur für die vorliegenden Annahmen.

Ändert sich z. B. der Luftzustand 1 auf den Zustand 1', dann regelt der Raumtemperaturregler die Kühleraustrittstemperatur auf den Zustand 3', um die Raumtemperatur auf dem aktuellen Sollwert von 24 °C halten zu können. Weil hier der Feuchteregler keinen Einfluss nimmt auf den Kühlvorgang (rel. Feuchte ist < 60 % r.F.), erhöht sich die relative Raumfeuchte dabei auf ca. 55 % (Zustandsänderungen gestrichelt eingezeichnet).

auf Maximalbetrieb gesteuert. Dies gilt für alle WRG, bei denen die Richtung des Wärmeflusses wechseln kann.

Regelkonzept

Der Regler muss drei Bauteile (WRG, Lufterwärmer, Kühler) mit unterschiedlichen statischen und dynamischen Eigenschaften ansteuern. Die Stellwirkung X_n (statische Regelkennlinie) der WRG ist durch die Temperatur- bzw. Enthalpiedifferenz zwischen der Abluft und der Außenluft bestimmt und variiert somit sehr stark. Die Stellwirkung der Wärmerückgewinnung ist teilweise auch grösser als diejenige des Lufterwärmers. Wird dann die WRG vom Raumtemperaturregler angesteuert, so arbeitet der Regelkreis überstabil, d.h. zu träge. Durch die Wahl einer Raum-/Zuluft-Kaskadenregelung wird diese Problematik etwas entschärft, weil die Regeldynamik durch den Hilfsregelkreis entscheidend verbessert wird.

5.3. Teilklimaanlagen für Räume mit hohem innerem Feuchte-Anfall (Schwimmbad-Lüftungsanlagen)

In speziellen Anlagen für Räume mit hohem Fremdfuchte-Anfall (z. B. in Schwimmbädern) kann - bei tiefen Außentemperaturen, die Raumluftfeuchte durch Erhöhen des Außenluftanteils reduziert werden. Dies ermöglicht eine Begrenzung der maximalen Raumfeuchte, aber nur solange der Wasserdampfgehalt x der Außenluft unter demjenigen des gewünschten Raumluftzustandes liegt. Andernfalls ist eine Entfeuchtung ohne Kühlung nicht mehr möglich.

5.3.1. Schwimmbad-Raumtemperatur- und Feuchteregelung mit Sollwertführung der rel. Raumfeuchte und WRG

Die Teilklimaanlage gemäß Fig. 5-6 ist ein geeignetes, komfortables Konzept für größere Schwimmbadhallen. Das regeltechnisch träge Verhalten eines großen Raumes wird mittels einer Raum-Zuluft-Kaskadenregelung problemlos beherrscht. Der Raumtemperaturregler (6, PI-Regler) führt dabei den Sollwert des Zulufttemperatur-Reglers (5, PI-Regler) zwischen einem Minimal- und Maximalwert, was gleichzeitig auch die Minimal- und Maximal-Begrenzung der Zulufttemperatur beinhaltet.

Die Feuchteregelung ist weniger für die Einhaltung einer behaglichen Raumfeuchte, sondern vielmehr für die Verhinderung von Kondensatbildung an den Wänden und Fensterscheiben zuständig. Es gilt dabei, die relative Raumfeuchte so weit zu reduzieren, dass die Taupunkttemperatur der Raumluft immer tiefer liegt als die tiefste Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen (θ_{Wi}) des betreffenden Raumes. Weil sich jedoch diese Oberflächentemperatur mit der Außentemperatur ändert, ist es (zur Vermeidung unnötigen Energieverbrauchs) sinnvoll, den Sollwert des Raumfeuchtereglers nach der tiefsten Wand- oder Fensteroberflächen-Temperatur zu führen. Zu diesem Zweck gibt es spezielle Oberflächen-Temperaturfühler (Fenster-Temperaturfühler).

Die Berechnung der inneren Oberflächentemperatur basiert auf den Grundlagen von Wärmeübertragung und Wärmedurchgang (vgl. "Physikalische Grundlagen" in BT_0100 Einführung in die HLK- und Gebäudetechnik). Die tiefste innere Wand- oder Fensteroberflächentemperatur θ_{Wi} kann einfach nach der Formel:

$$\theta_{Wi} = \theta_{IDA} - \Delta\theta_i$$

berechnet werden, wenn folgende Daten bekannt sind:

- Raumtemperatur θ_{IDA}
- Außentemperatur θ_{ODA}
- Wärmeübergangszahl Raumluft $\Rightarrow$ Wand α_i ($\alpha_i = 8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ für ruhende Luft)
- niedrigster U-Wert der Außenwand (meist ist dies der U-Wert der Fenster)

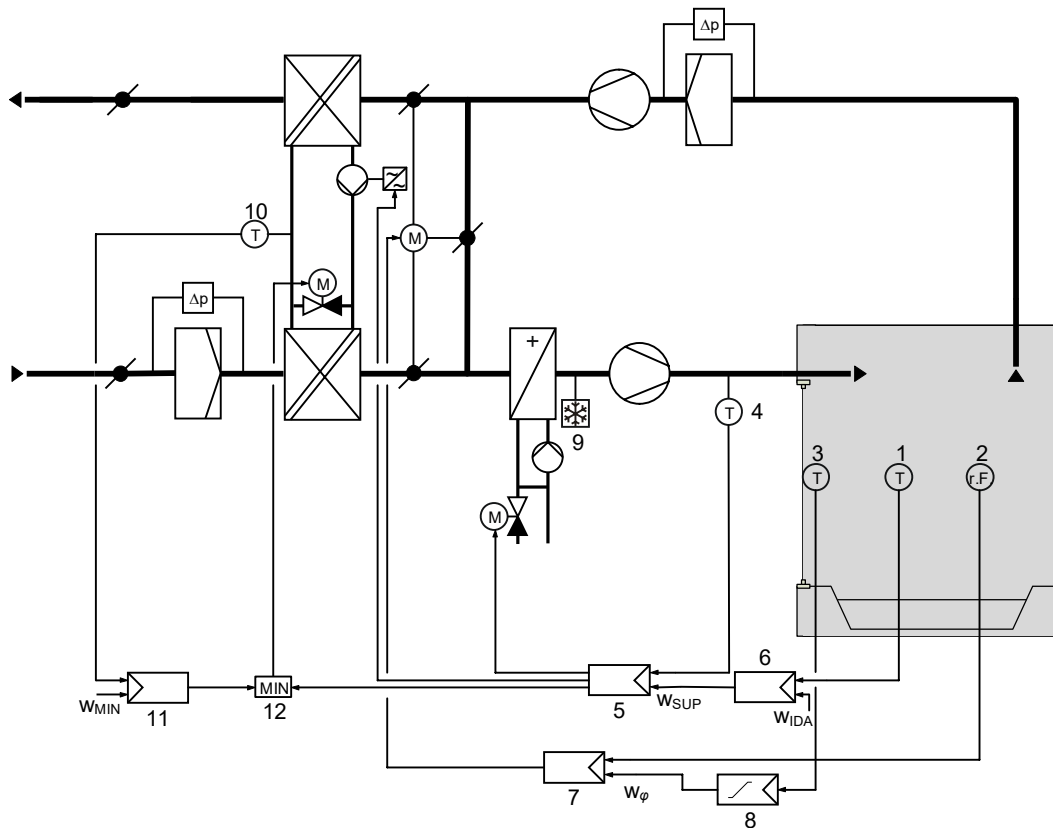


Fig. 5-6 Schwimmbad-Raumtemperatur- und Feuchteregelung mit Sollwertführung der rel. Raumfeuchte in Abhängigkeit von der Fenster-Oberflächentemperatur

- | | | | |
|---|------------------------------|----|-------------------------|
| 1 | Raumtemperaturfühler | 7 | Feuchteregler |
| 2 | Raumfeuchtefühler | 8 | Sollwert-Führungsgeber |
| 3 | Oberflächen-Temperaturfühler | 9 | Frostschutz-Thermostat |
| 4 | Zulufttemperaturfühler | 10 | Vereisungsschutz-Fühler |
| 5 | Zulufttemperatur-Regler | 11 | Vereisungsschutz-Regler |
| 6 | Raumtemperatur-Regler | 12 | Minimal-Vorrangauswahl |

Die zu berechnende Temperaturdifferenz $\Delta\theta_i$ wird ermittelt mit der Formel:

$$\Delta\theta_i = U \cdot (\theta_{IDA} - \theta_{ODA}) \cdot \frac{1}{\alpha_i} \quad [K]$$

Sinkt infolge tiefer Außentemperatur die Oberflächentemperatur der Außenwand- oder Fensterinnenseite in die Nähe des Taupunktes der Raumluft (resultierend aus der Raumtemperatur θ_{IDA} und relativen Raumfeuchte φ_{IDA}), wird diese vom Oberflächen-Temperaturfühler (3) erfasst und über den Führungsgeber (8) der Raumfeuchtesollwert linear so weit reduziert, dass es nicht zu Kondensatbildung an den Wand- oder Fensteroberflächen kommen kann.

In einer oft benutzten, größeren Schwimmhalle, wo ständig ein bedeutender Anteil Außenluft zur Trocknung der Raumluft beigemischt werden muss, lohnt sich der Einbau einer kreislaufverbundenen WRG (Abluftkanal wird örtlich getrennt vom Zuluft-Aufbereitungsgerät platziert). Die erforderliche Vereisungsschutz-Regelung (Fühler 10, Regler 11) kann über eine Minimal-Vorrangauswahl (12) ins Stellsignal der WRG-Sequenz des Zulufttemperatur-Reglers (5) eingreifen.

Beispiel

Für eine Anlage soll der Sollwert für die relative Raumfeuchte in Abhängigkeit der Oberflächen-temperatur der Fensterinnenseite geführt werden. Die Raumtemperatur θ_{IDA} soll auf 28 °C geregelt werden. Die Fenster (Glas) haben einen U-Wert von 2 W/(m²K) und für den inneren Wärmeübergang kann mit α_i von 8 W/(m²K) gerechnet werden.

Zuerst soll der max. zulässige Sollwert für die Raumfeuchte bei der tiefsten Außentemperatur θ_{ODA} bestimmt werden. Diese Temperatur ist abhängig vom Standort der Anlage und ist aus den Planungsunterlagen einer Anlage ersichtlich. Für dieses Beispiel ist tiefste zu berücksichtigende Außentemperatur - 15 °C.

Jetzt kann die Oberflächentemperatur, die zu dieser Außentemperatur gehört, bestimmt werden. Sie berechnet sich bei den oben genannten Bedingungen wie folgt (siehe oben für Erklärung):

$$\Delta\theta_i = U \cdot (\theta_{IDA} - \theta_{ODA}) \cdot \frac{1}{\alpha_i} \quad [\text{K}]$$

$$\Delta\theta_i = 2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot (28 - (-15)) \text{ K} \cdot \frac{1}{8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} = 10,75 \text{ K}$$

$$\Rightarrow \theta_{Wi} = \theta_{IDA} - \Delta\theta_i = 28 \text{ °C} - 10,75 \text{ K} = 17,25 \text{ °C}$$

Durch diese Berechnung können der Zulässige Sollwert aus dem h,x-Diagramm ermittelt werden (vgl. Fig. 5-8). Es wird ersichtlich, dass der Sollwert für die Raumfeuchte φ_{DA} unter 50 % r.F. gehalten, werden muss, damit kein Kondensat an der Fensteroberfläche entsteht.

Weiter können noch weitere Betriebspunkte (z.B. bei $\theta_{ODA} = + 5 \text{ °C}$) untersucht und die zugehörige, zulässige Raumfeuchte bestimmt werden. Daraus resultiert eine einzuhaltende Grenzlinie in Abhängigkeit der Außen- resp. der Oberflächentemperatur gezeichnet werden (vgl. Fig. 5-7, gestrichelte Linie). Um die Kondensatbildung jederzeit zu vermeiden, muss die Raumfeuchte bei + 5 °C Außentemperatur unter 70 % und bei - 15 °C Außentemperatur unter 50 % geregelt werden. Die Führung des Sollwerts wird in der Praxis etwas unterhalb dieser Grenzlinie eingestellt (vgl. Fig. 5-7, w_φ).

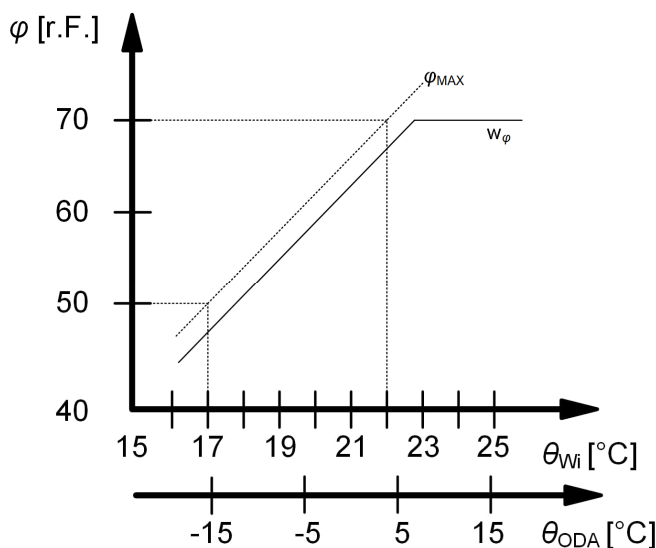


Fig. 5-7 Lineare Sollwertführung der rel. Raumfeuchte, in Abhängigkeit von der tiefsten inneren Wand- oder Fensteroberflächentemperatur

- θ_{Wi} Tiefste innere Wand- oder Fensteroberflächentemperatur
- θ_{ODA} Außentemperatur
- φ_{MAX} Maximale relative Raumluftfeuchte (Kondensationsgrenze)
- w_φ Sollwertführung zur Vermeidung von Kondensatbildung

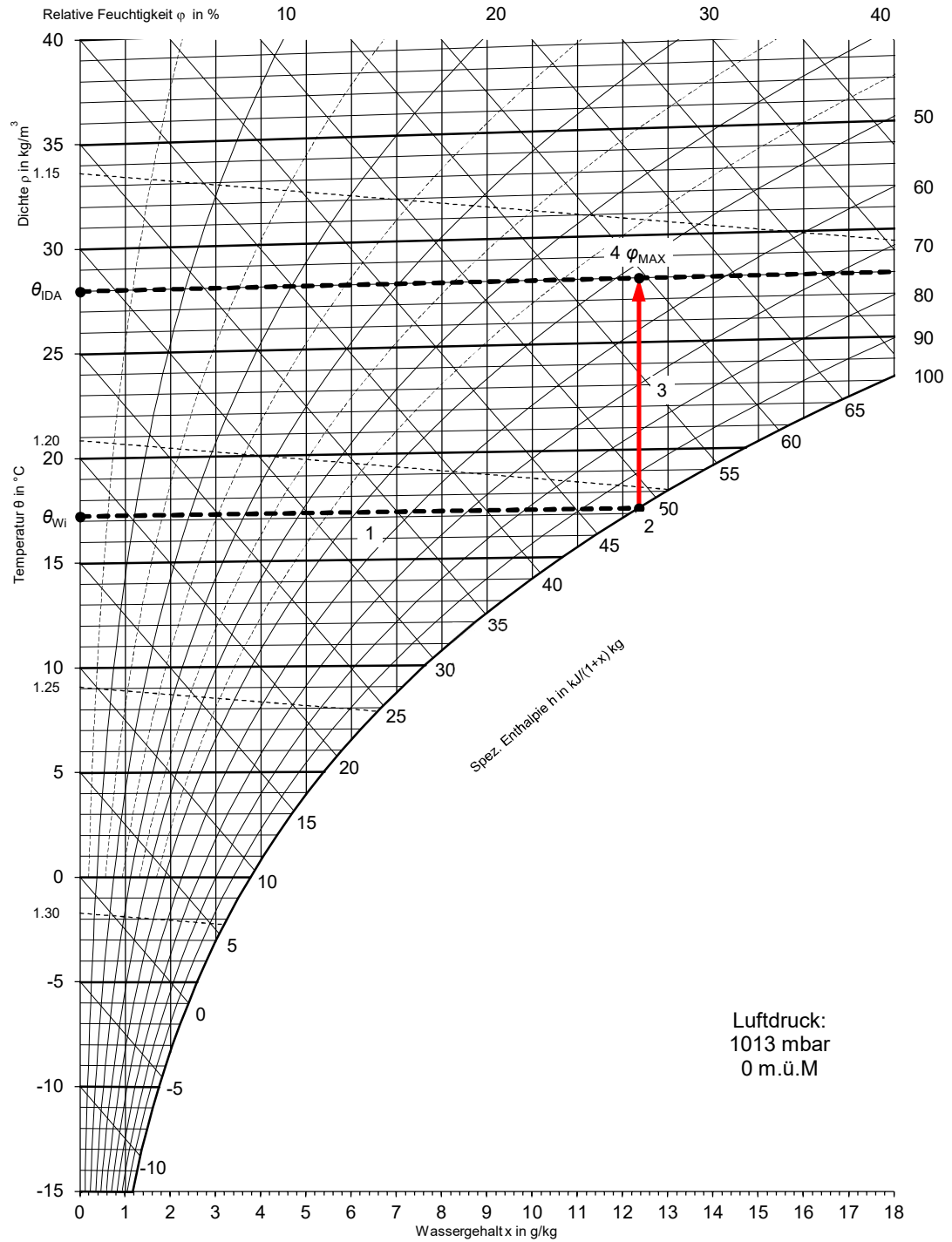


Fig. 5-8 Bestimmung der maximal zulässigen rel. Raumfeuchte, aufgrund der Raumtemperatur und der tiefsten Wand- oder Fensteroberflächentemperatur, im h,x -Diagramm

- θ_{wi} Tiefste Wand- oder Fensteroberflächentemperatur
- θ_{IDA} Raumtemperatur
- ϕ_{MAX} Maximale relative Raumluftfeuchte (Kondensationsgrenze)

5.4. Teilklimaanlagen mit adiabater Kühlung

Das Ziel der indirekten adiabaten Kühlung, besteht darin die Luftkühlung durch eine Kälteanlage zu ersetzen oder deren Leistung zu verringern. Die Abkühlung funktioniert, da die warme Abluft so intensiv wie möglich befeuchtet wird. Die gekühlte Abluft strömt durch die Wärmerückgewinnung und entzieht dort der Außenluft Wärme. Je trockener die Abluft ist, umso mehr kann sie befeuchtet werden. Daraus resultiert ein höheres Kühlpotenzial. Pro Gramm Wasser, um welches die Abluft befeuchtet wird, sinkt die Temperatur der Abluft um 2,5 K.

Ob eine Kühlung mit adiabater Befeuchtung ausreicht, hängt von der Außenluftfeuchte und der erforderlichen Kühllast ab.

Durch die adiabate Kühlung können der elektrische Energieverbrauch, Emissionen aus Leckagen von Kältemittel und CO₂-Emissionen vermindert werden.

5.4.1. Raumtemperaturregelung mit adiabater Kühlung

Die Raumtemperatur wird im Regler (2) mit dem Sollwert $w_{\theta_{IDA}}$ verglichen. Im Kühlfall wird die Kühlung in erster Sequenz mit dem Verdunstungsbefeuchter (1) und der WRG (2) sichergestellt. Falls dies nicht ausreicht, übernimmt die restliche Leistung der Luftkühler (4).

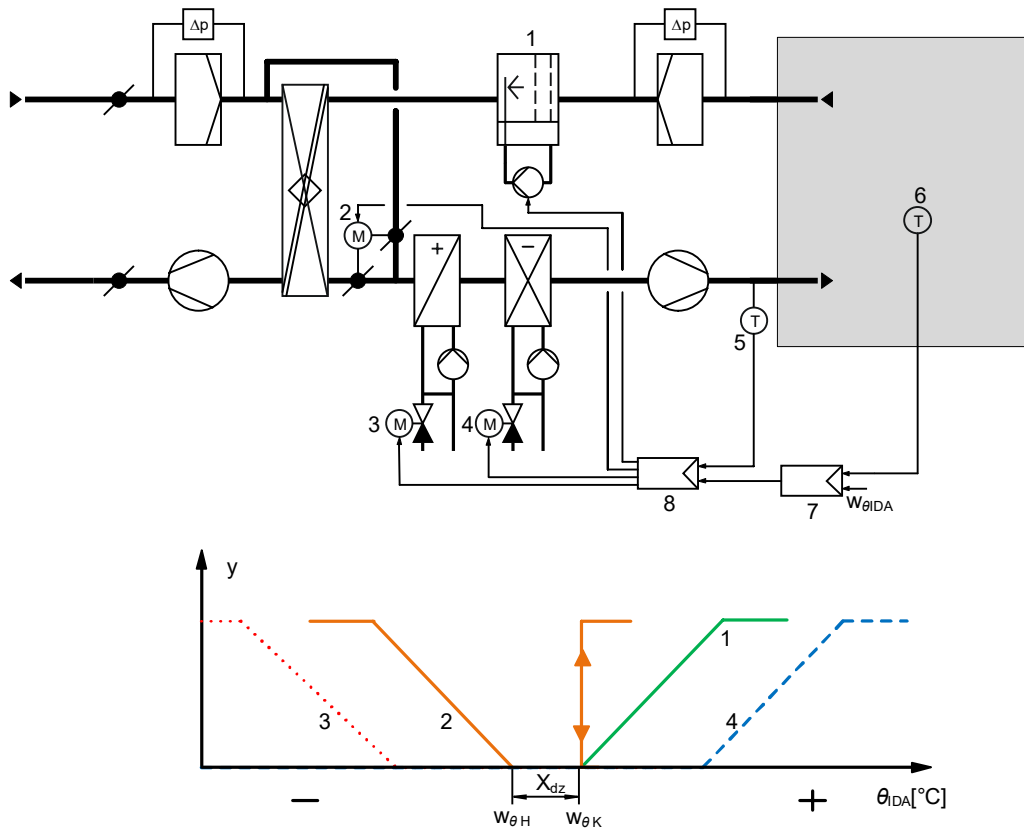


Fig. 5-9 Raumtemperaturregelung mittels Lufterhitzer, adiabater Kühlung und Luftkühler (bei Bedarf)

1	Verdunstungsbefeuchter (adiabate Kühlung)	2	WRG-Klappe
3	Stellsignal Heizventil	4	Stellsignal Kühlventil
5	Zuluft-Temperaturfühler	6	Raum-Temperaturfühler
7	Raum-Temperaturregler (Hauptregler)	8	Zuluft-Temperaturregler (Hilfsregler)
θ_{IDA}	- = heizen, + = kühlen		



Fig. 5-10 Adiabater Befeuchter für adiabate Kühlung der Abluft (Quelle Condair)

Beispiel

Eine Anlage soll im Juli adiabatisch gekühlt werden. Die Außenluft hat eine Temperatur von 33 °C und eine relative Feuchte von 25 %. Die Temperatur der Abluft beträgt 24 °C und hat eine relative Feuchte von 50 %. Die Zuluft soll auf eine Temperatur von 22 °C geregelt werden. Der Wirkungsgrad der WRG beträgt 75 %.

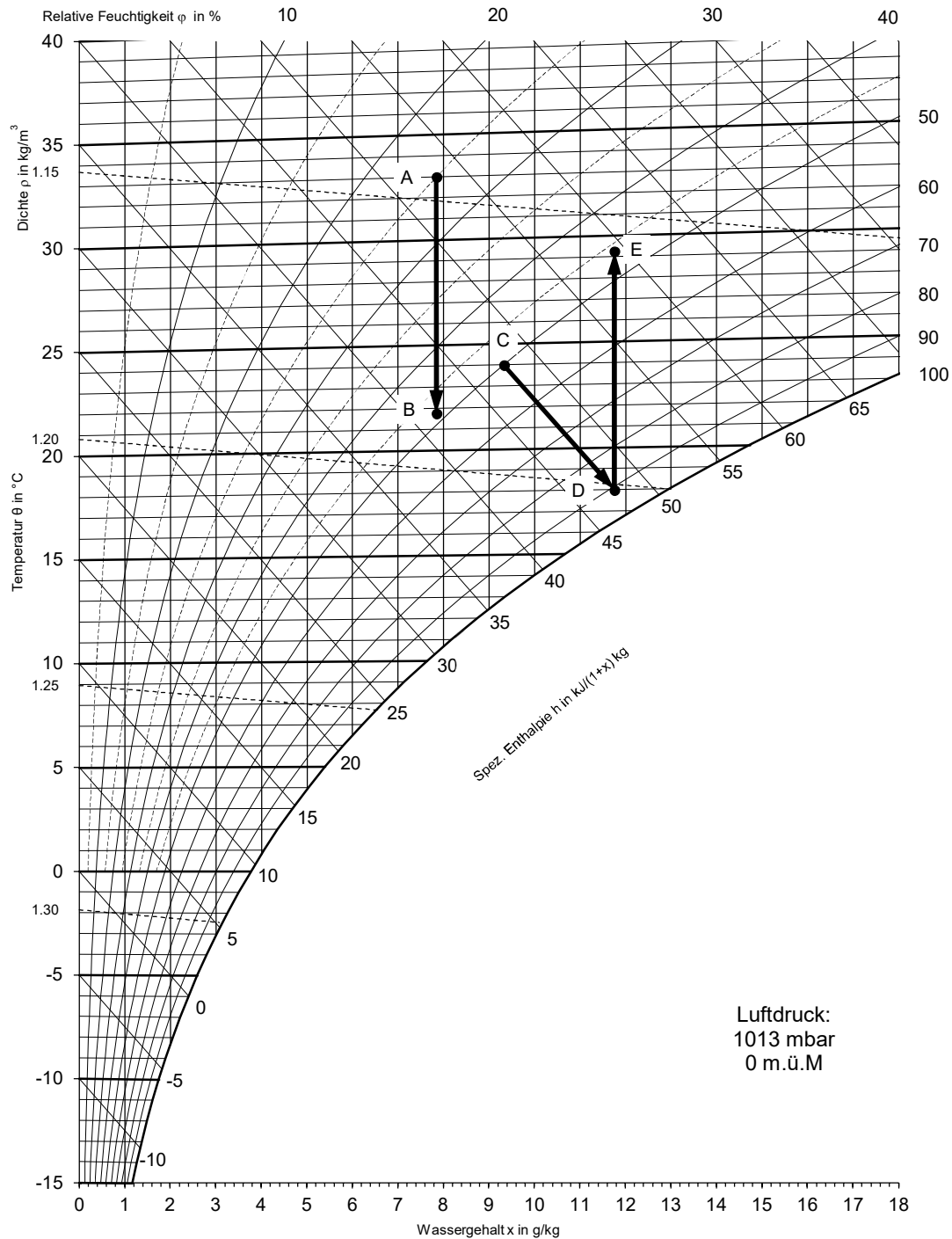


Fig. 5-11 Raumtemperaturregelung mittels adiabater Kühlung

- | | | | |
|---|------------------|---|------------------------------------|
| A | Außenluftzustand | C | Abluftzustand vor Luftbefeuchtung |
| B | Zuluftzustand | D | Abluftzustand nach Luftbefeuchtung |
| E | Fortluftzustand | | |

6 Vollklima-Anlagenkonzepte mit Wärmerückgewinnung

6.1. Allgemeines

Begriffsdefinition

Als Vollklimaanlage wird eine lufttechnische Anlage dann bezeichnet, wenn sowohl die Lufttemperatur wie auch die Luftfeuchte auf vorgegebene Sollwerte geregelt werden.

Eine Lüftungs- oder Klimaanlage mit einem WRG-System soll so betrieben werden können, dass die notwendige Energie für die Zuluft-Aufbereitung minimal wird. Die dafür zu einem bestimmten Zeitpunkt erforderliche Übertragungsleistung des WRG-Systems wird durch folgende Größen bestimmt:

- Temperatur und relative Feuchte der Außenluft, Abluft und Zuluft
- Art des Befeuchtungssystems (Dampfbefeuchtung oder Verdunstungsbefeuchtung)

Umschaltfunktion mittels Bezugsgrößen Temperatur oder Enthalpie (ΔT oder Δh)

Wie schon in Kapitel 4 näher thematisiert wurde, ist die Auswahl der richtigen Bezugsgröße für die WRG-Umschaltfunktion abhängig von der Luftbehandlung nach der WRG.

Fig. 6-1 zeigt eine Entscheidungsmatrix zur Auswahl der richtigen Bezugsgrößen (ΔT oder Δh) für die WRG-Umschaltfunktion. Diese Matrix ist als grobe Entscheidungshilfe gedacht und gilt für normale Außenluftzustände in gemäßigten Klimazonen. Eine Überprüfung der effektiven Zustandsänderungen mit Hilfe des h,x-Diagramms wird in jedem Fall empfohlen. Eine Umschaltung nach Δh macht nur beim Einsatz eines Verdunstungsbefeuchters zusammen mit einer regenerativen WRG oder mit Umluftklappen Sinn, weil da die Zustandsänderung im h,x-Diagramm entlang der Enthalpielinie (Isenthalpe, adiabat) verläuft.

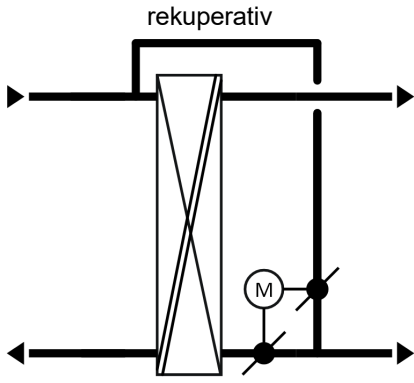
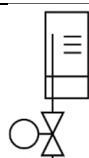
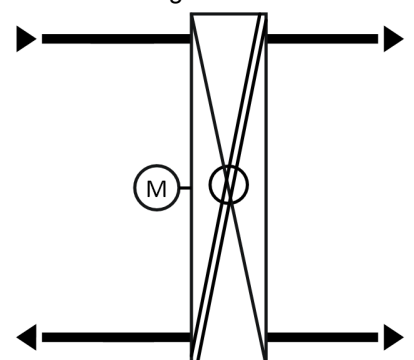
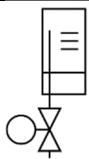
Wärmerückgewinnung	Befeuchterart	Umschaltfunktion	
		nach ΔT	nach Δh
	Keine	●	
	Dampfbefeuchter 	●	
	Verdunstungsbefeuchter	●	
	Keine	●	
	Dampfbefeuchter 	●	
	Verdunstungsbefeuchter		●

Fig. 6-1 Entscheidung-Matrix für die WRG-Umschaltfunktion nach ΔT oder Δh

6.2. Vollklimaanlage mit rekuperativer WRG - Kühlen - Heizen - Befeuchten (mit Dampf) - Entfeuchten

Regelkonzept

Fig. 6-2 zeigt das Prinzipschema einer Vollklimaanlage mit rekuperativer Wärmerückgewinnung (z.B. Plattentaucher) und Dampfbefeuchtung. Als geeignetes Regelkonzept wird auch hier die Raum-/Zulufttemperatur-Kaskadenregelung gewählt. Ein zusätzlicher Regelkreis ist für die Einhaltung des Raumfeuchte-Sollwertes verantwortlich.

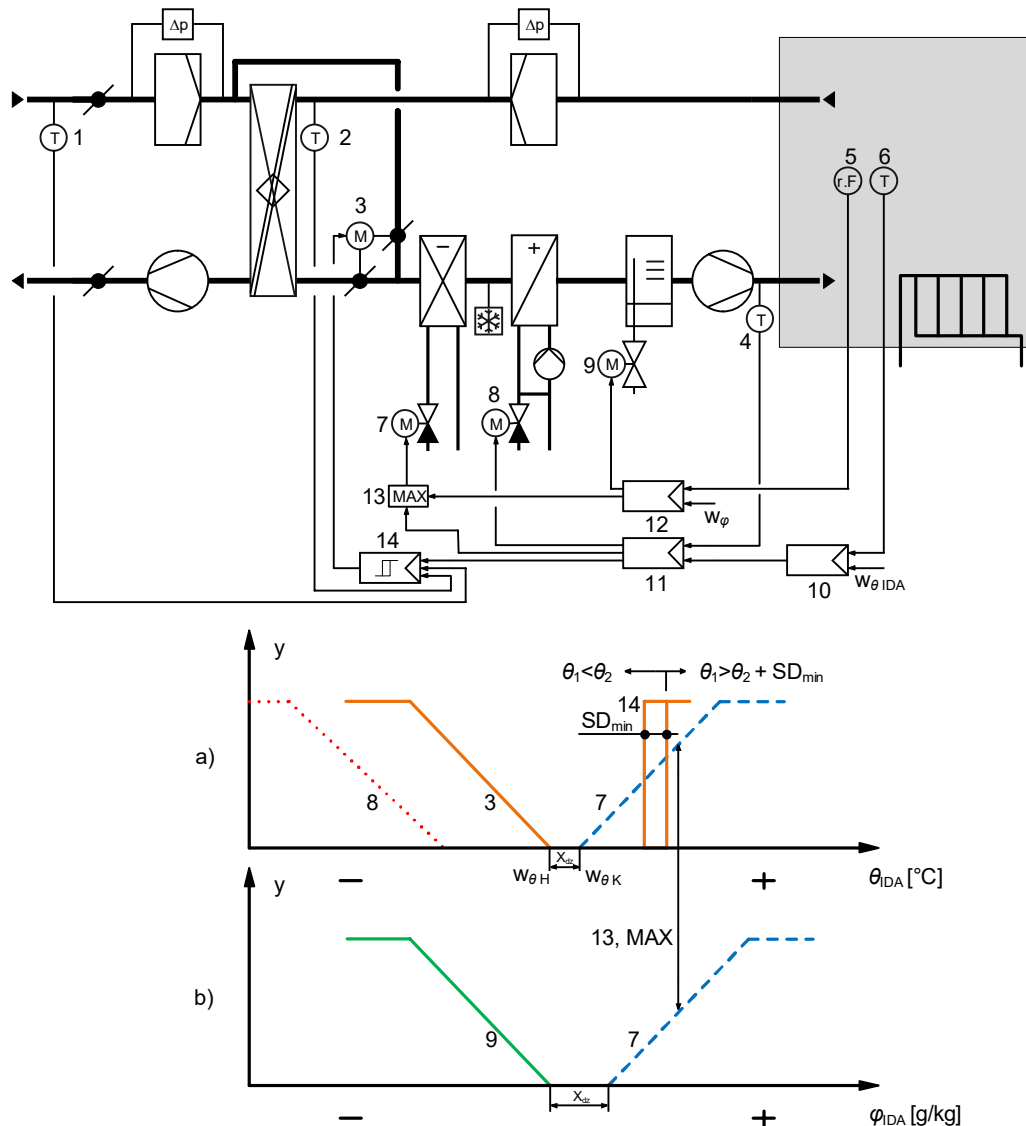


Fig. 6-2 Prinzipschema und Sequenz-Diagramme einer Vollklimaanlage mit rekuperativer WRG, Kühlen, Heizen, Dampfbefeuchtung und Entfeuchten

1	Außenluft-Temperaturfühler	2	Abluft-Temperaturfühler
3	Regelklappen rekuperative WRG	4	Zuluft-Temperaturfühler
5	Raum-Feuchtefühler	6	Raum-Temperaturfühler
7	Kühlventil	8	Heizventil
9	Dampfbefeuchterventil	10	Raum-Temperaturregler (Hauptregler)
11	Zuluft-Temperaturregler (Hilfsregler)	12	Raum-Feuchterregler
13	Max.-Vorrangauswahl: Kühlen/Entfeuchten	14	WRG-Max. / Min.-Umschaltfunktion
θ_1	Außenlufttemperatur	θ_2	Ablufttemperatur

a)	Sequenzdiagramm der Temperatur-Regelung	θ_{IDA}	- = Heizlast, + = Kühllast
b)	Sequenzdiagramm der Feuchte-Regelung	φ_{IDA}	- = Befeuchtungslast, + = Entfeuchtungslast

Die Funktion "Befeuchten" erfolgt über ein Dampfventil (9) und die Funktion "Entfeuchten", gemeinsam mit der Funktion "Kühlen" des Temperaturreglers, über eine Vorrangauswahl (13) auf das Kühlventil (7). Raumtemperatur und relative Raumfeuchte werden auf die gewünschten Sollwerte geregelt. Wenn die Raumfeuchte nur innerhalb vorgegebener Grenzen gehalten werden soll (vgl. Behaglichkeitsfeld), kann dies durch Einfügen einer energiefreien Zone x_{dz} (Totzone), gemäß dem Sequenzdiagramm erreicht werden. Weil innerhalb der energiefreien Zone weder be- noch entfeuchtet werden muss, ist diese Betriebsweise wirtschaftlicher und deshalb zu empfehlen. Soll aus Kostengründen ganz auf eine Entfeuchtung verzichtet werden, so kann dies durch ein Weglassen der WRG- und Kühlersequenz im Feuchteregelkreis bewirkt werden. Ob eine solche Maßnahme zulässig ist, muss anhand der Anforderungen an den Raum und der meteorologischen Daten abgeklärt werden.

6.3. Vollklimaanlage mit regenerativer WRG - Kühlen - Heizen - Befeuchten (stetig, adiabatisch) - Entfeuchten

Die Fig. 6-3 zeigt das Prinzipschema einer solchen Anlage. Für einen energieoptimalen Betrieb sind wesentlich kompliziertere Betriebseinrichtungen notwendig als jene, welche in den vorangegangenen Beispielen thematisiert wurden. Zufriedenstellend nahe an einen energieoptimalen Betrieb kann mit einem Regelkonzept, ähnlich wie zuvor bei Fig. 6-2 beschrieben, erreicht werden. Weiter ist dabei mitberücksichtigt, dass die regenerative WRG hygroskopisch beschichtet ist und somit auch Feuchte zurückgewinnen kann. Die Umschaltfunktion der WRG im Kühlfall erfolgt dabei aufgrund der Enthalpiedifferenz zwischen Außen- und Abluft. Diese wird aus den gemessenen Temperatur- und rel. Feuchte-Werten ermittelt.

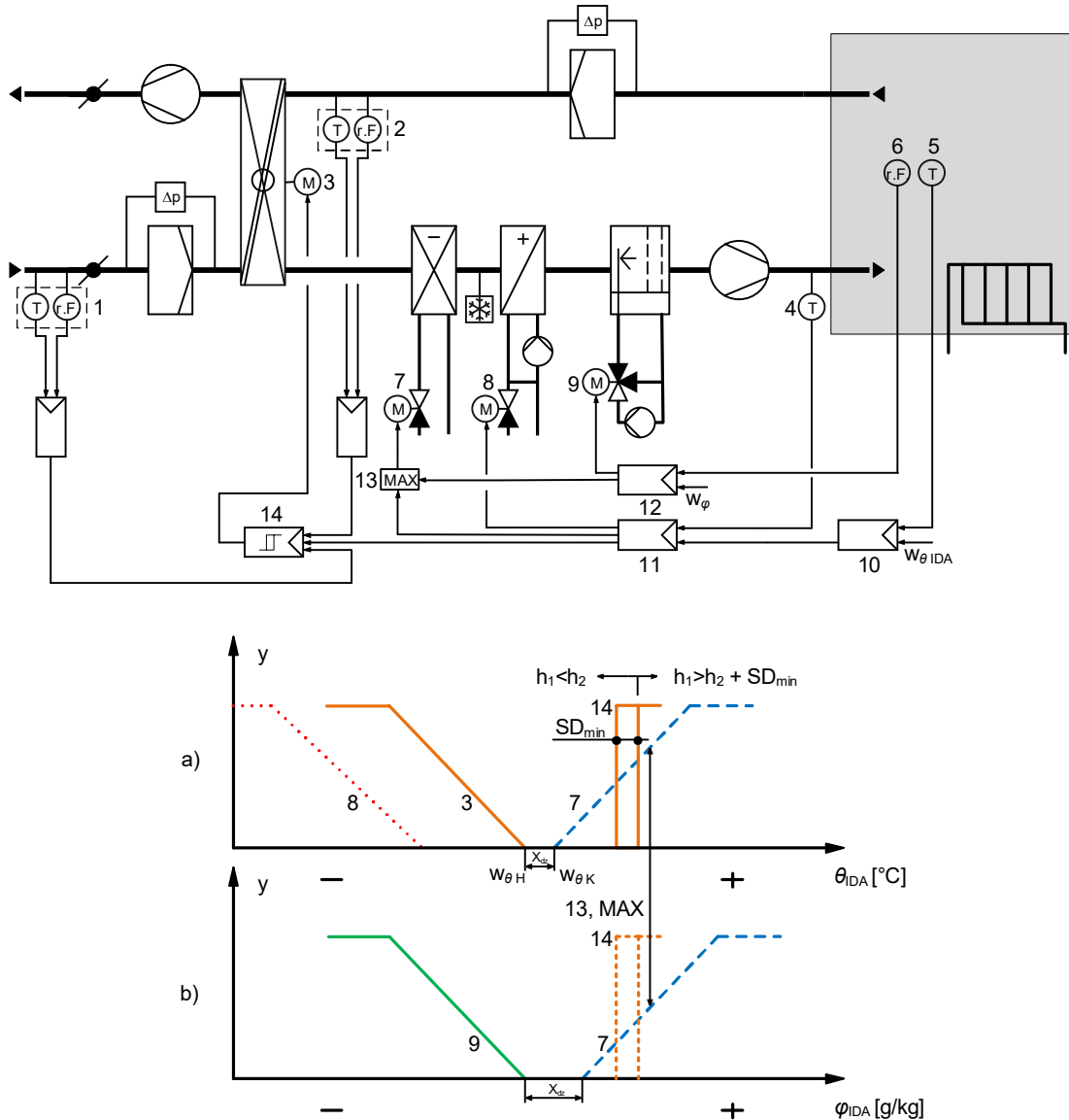


Fig. 6-3 Prinzipschema und Sequenz-Diagramme einer Vollklimaanlage mit regenerativer WRG, Kühlen, Heizen, adiabater Befeuchtung und Entfeuchtung (Regelung wie bei Fig. 6-2)

- | | |
|--|--|
| 1 Außenluft-Temperatur-/Feuchtefühler | 2 Abluft-Temperatur-/Feuchtefühler |
| 3 Stellsignal regenerative WRG | 4 Zuluft-Temperaturfühler |
| 5 Raum-Temperaturfühler | 6 Raum-Feuchtefühler |
| 7 Stellsignal Kühlventil | 8 Stellsignal Heizventil |
| 9 Stellsignal Befeuchterventil | 10 Raum-Temperaturregler (Hauptregler) |
| 11 Zuluft-Temperaturregler (Hilfsregler) | 12 Raum-Feuchteregler |
| 13 Max.-Vorrangauswahl: Kühlen/Entfeuchten | 14 WRG-Max. / Min.-Umschaltfunktion |
| h_1 Außenluftenthalpie | h_2 Abluftenthalpie |
| a) Sequenzdiagramm Temperaturregelung | b) Sequenzdiagramm Feuchtereuerung |

6.4. Vergleich der verschiedenen Anlagenkonzepte bezüglich Energieverbrauch

Der genaue Energieverbrauch der verschiedenen Anlagentypen zur Luftaufbereitung kann nur mit großem Rechenaufwand ermittelt werden. Ein qualitativer Vergleich bezüglich Energieaufwand kann jedoch sofort angestellt werden, wenn die Luftaufbereitungsvorgänge im h,x-Diagramm verfolgt werden. Nachfolgend sollen die vorher beschriebenen Anlagentypen kurz beurteilt und verglichen werden:

- Dampfbefeuchtung mit rekuperativer Wärmerückgewinnung (Fig. 6-2): Für diesen Anlagentyp wird am meisten Energie benötigt, da die natürliche Kühlung bei der Befeuchtung und die Feuchteübertragung durch die WRG-Anlage entfallen.
- Stetige adiabate Luftbefeuchtung und regenerative Wärmerückgewinnung (Fig. 6-3): Dieser Anlagentyp wird sicher am wenigsten Energie für die Luftaufbereitung benötigen, da durch die adiabate Befeuchtung ohne zusätzlichen Energieaufwand gekühlt wird und mit der Wärmerückgewinnung Feuchte übertragen wird (be- und entfeuchten).

6.5. h,x-geführte Regelung (Economiser tx2)

Bei der Strategie zur Regelung von Klimaanlage hat sich in den letzten Jahrzehnten wenig geändert. Typisch sind die zuvor beschriebenen Steuerungen der Energierückgewinnung nach der Enthalpie bzw. je Temperatur- und Feuchteregelkreis mit jeweils energieneutralen Zonen, ohne dass eine gegenseitige Abstimmung erfolgt. Hier liegt zweifellos ein Optimierungspotential brach.

Mit der h,x-geführten Regelung (Economiser tx2) wird dieses Potential durch konsequente Ausnutzung der Behaglichkeitsgrenzen und die gegenseitige Abstimmung von Sollwert, Prozessregelung und Betreibung der Energierückgewinnung (ERG) auf einfache Weise nutzbar gemacht.

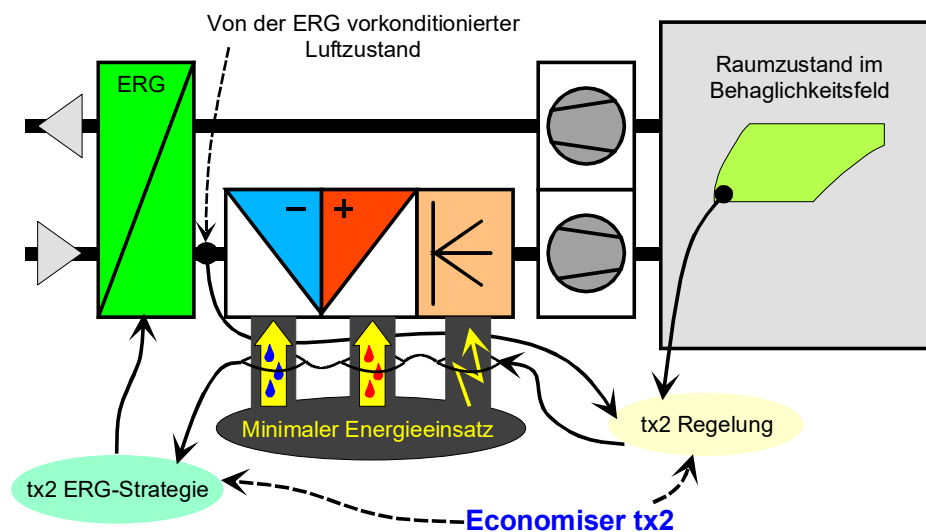


Fig. 6-4 Prinzip des Economiser tx2

Ziel

Als Ausgangspunkt wird eine betriebsbereite Vollklimaanlage mit Energierückgewinnung angenommen (vgl. z.B. Fig. 6-2). Aufgabe dieser Klimaanlage ist die Schaffung von ausreichenden Behaglichkeitsbedingungen (nutzungsgerechte Raumkonditionen) bei möglichst niedrigen Betriebskosten. Die Minimierung der Betriebskosten darf dabei nicht zu Lasten der Behaglichkeit erfolgen.

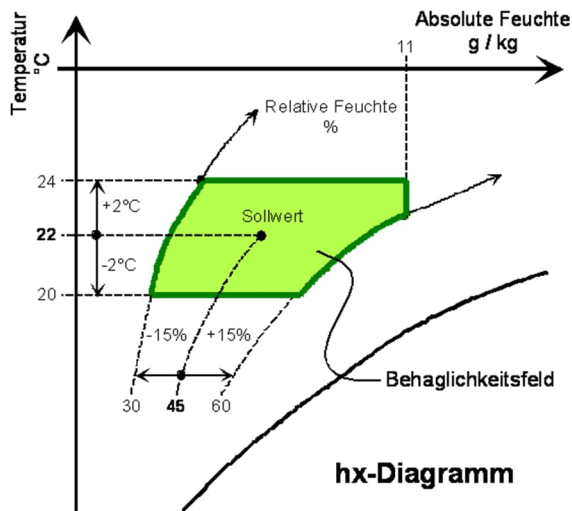


Fig. 6-5 Behaglichkeitsfeld (Beispiel) als Basis für hx-geführte Regelung

Der Economiser tx2 (t: Temperatur, x: absolute Feuchtigkeit, 2: 2-Größenregelung) sucht sich den bestmöglichen Raumsollwert an der Grenze, oder im Innern des Behaglichkeitsfeldes (Fig. 6-5) und setzt die Energierückgewinnung (ERG) optimiert ein. Dies wird durch die tx2-Regelung und die tx2-ERG-Strategie (siehe 6.5.2) erreicht.

Damit eine sinnvolle Optimierung überhaupt möglich wird, müssen sowohl die Kosten der Prozesse Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten relativ zueinander bekannt sein (siehe 6.5.2, Gewichtung der Prozesse), sowie die physikalischen Eigenschaften der Prozesse. Fig. 6-6 gibt eine Übersicht über die vom Economiser tx2 berücksichtigten Prozesseigenschaften.

Prozess	Allgemeine Beschreibung	Beispiel
Heizen	absolute Feuchte bleibt konstant	Plattentaucher
Kühlen	absolute Feuchte bleibt konstant	Plattentaucher
Befeuchten	temperaturkonstant	Dampfbefeuchter
	enthalpiekonstant	Wäscher
Entfeuchten	Temperatur- und Feuchteabnahme	Plattentaucher
ERG	Teilweise Rückgewinnung von sensibler und latenter Wärme	Regenerative Systeme (Energierückgewinnungsrad)
	Teilweise Rückgewinnung von sensibler Wärme	Rekuperative Systeme (Plattenwärmetauscher, Kreislaufverbundsystem)
	Vollständige Rückgewinnung von sensibler und latenter Wärme	Umluftklappen

Fig. 6-6 Prozesseigenschaften
ERG- und Befeuchtungsvarianten können frei miteinander kombiniert werden.

6.5.1. tx2-Regelung

Kaskadenregelung

Der dynamische Regler besteht aus einem Kaskadenregler für den Temperatur- und den Feuchte-regelkreis.

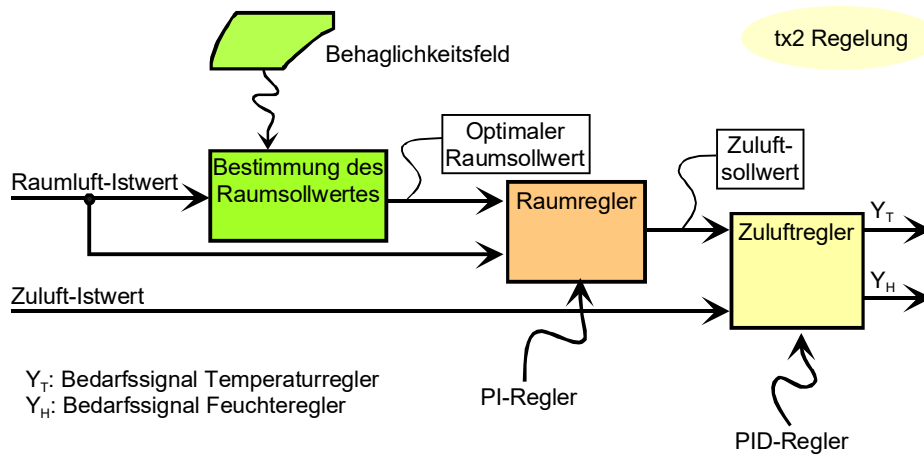


Fig. 6-7 tx2 Kaskadenregelung für Temperatur und absolute Feuchte

Die Messgrößen sind Temperatur und relative Feuchte, die Führungsgrößen sind jedoch Temperatur und absolute Feuchte.

Die absolute Feuchte wird aus der Temperatur und der relativen Feuchte berechnet. Mit dieser Umrechnung werden die beiden Führungsgrößen entkoppelt, was sich in einem besseren dynamischen Verhalten ausdrückt. Die Kaskade beinhaltet drei wichtige Komponenten:

- Bestimmung des Sollwertes an der Grenze, oder im Innern des Behaglichkeitsfeldes
- Raumregler
- Zuluftregler

Bestimmung des Sollwertes

Durch den von der ERG vorkonditionierten Luftzustand und den Raum-Istwert ist der optimale Raum-Sollwert an der Grenze oder im Innern des Behaglichkeitsfeldes definiert.

Aufgrund des vorkonditionierten Luftzustandes und des Zuluft-Sollwertes ergibt sich ein Bedarf Heizen, Kühlen, Befeuchten, Entfeuchten oder eine Kombination davon.

- In den Fällen Heizen-Befeuchten, Kühlen-Befeuchten und Entfeuchten-Nachheizen wird der jeweilige Sollwert identisch mit dem energetisch besten Eckpunkt des Behaglichkeitsfeldes.
- Im Fall nur Kühlen wird der Sollwert durch Projektion des Istwertes auf die obere Begrenzungslinie des Behaglichkeitsfeldes gewonnen.
- Im Fall nur Heizen wird auf die untere Grenze projiziert. Im Bereich, wo die relative Feuchte die Grenze bildet, existiert ein Spezialfall. Hier wird der Temperatur-Sollwert entlang der rel. Feuchte-Linie geschoben. Dies ergibt einen größeren Heizaufwand, dafür muss in diesem Bereich nicht gekühlt werden; das senkt die Kosten, da Heizen normalerweise günstiger ist als Kühlen.
- Im Fall nur Befeuchten wird der Feuchte-Istwert auf die rel. Feuchte-Linie projiziert. Dies ergibt einen größeren Befeuchtungsaufwand, dafür muss in diesem Bereich nicht gekühlt werden; das senkt die Kosten, da Befeuchten normalerweise günstiger ist als Kühlen.

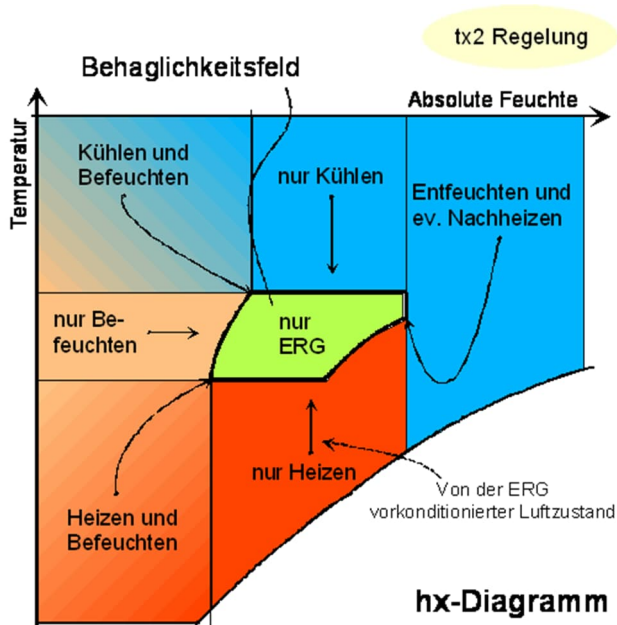


Fig. 6-8 Mögliche Zustandsänderungen im h,x-Diagramm, um zum Behaglichkeitsfeld zu gelangen

Raumregler

Der Raumregler berechnet aus der raumseitigen Regeldifferenz den Zuluft-Sollwert. Er besteht je aus einem PI-Regler für den Temperatur- und den Feuchteregelkreis.

Zuluftregler

Der Zuluftregler berechnet aus der zuluftseitigen Regeldifferenz die Bedarfssignale Y_T und Y_H . Er besteht aus PID-Reglern für den Temperatur- und den Feuchteregelkreis. Die Bedarfssignale werden zum Stellen der Regelorgane der Klimaanlage und für die Regelung der Energierückgewinnung verwendet.

6.5.2. tx2 ERG-Strategie

Strategie

Die Energierückgewinnung wird so geregelt, dass die Summe der gewichteten Bedarfssignale für die Prozesse Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten minimiert wird. Der ERG-Strategie liegt ein Modelldenken im tx-Diagramm zugrunde. Jedem Prozess wird ein Vektor in der tx-Ebene (siehe Fig. 6-9) und eine Gewichtung zugewiesen. Die Vektoren geben die theoretische Wirkung jedes Prozesses wieder. Im Betrieb können neben dem ERG-Vektor aber nur immer zwei Vektoren aktiv sein.

In der Mitte des Diagramms wird der Zuluft-Sollwert eingetragen. Weiter trägt man den Raum- und Außenluft-Istwert ein. Danach wird der ERG-Vektor, je nach Rückgewinnungsgrad von Temperatur und Feuchte, ausgehend vom Außenluft-Istwert eingetragen.

Das Ziel ist nun, den Punkt auf dem ERG-Vektor ausfindig zu machen, welcher die Summe der theoretischen Wirkungen der beiden aktiven Prozesse minimiert.

Beispiel

Die Außenluft ist kühler als die Raumluft. Bei einem großen Kühlbedarf soll die ERG auch kühlere Luft konditionieren und somit den Außenluftanteil erhöhen. Durch diese Aktion reduziert sich die nötige Kühlenergie. Muss gleichzeitig befeuchtet werden, kommt eine zusätzliche Dimension dazu (siehe Algorithmus).

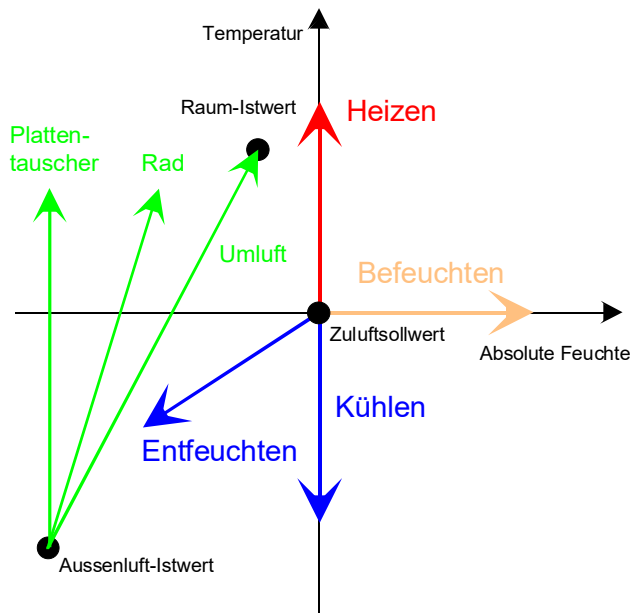


Fig. 6-9 tx-Diagramm

Um eine bestmögliche Entkopplung der Prozesse zu erreichen, wird im Economiser tx2 mit den Größen Temperatur und absolute Feuchte gearbeitet.

Gewichtung der Prozesse

Mit der Energierückgewinnung wird durch Vorkonditionierung der Außenluft der Energieverbrauch optimiert. Dazu werden die Bedarfssignale des Zuluftreglers (vgl. Fig. 6-7) mit den spezifischen Kosten der entsprechenden Prozesse gewichtet (Fig. 6-10) und die Energierückgewinnung mit dem nachfolgend beschriebenen Verfahren geregelt.

Prozess	Spezifische Kosten	Relative Gewichtung
Heizen	0,09 €	1
Kühlen	0,16 €	2
Befeuchten	0,08 €	1
Entfeuchten	0,23 €	3

Fig. 6-10 Beispiel zu den spezifischen Kosten und der relativen Gewichtung
Die spezifische Kosten sind in €, bezogen auf eine Temperaturdifferenz von 1 K und eine Betriebsdauer von 1 Stunde.
Die relativen Gewichtungen werden zur Optimierung der ERG verwendet.

Algorithmus

In der Europäischen Patentanmeldung EP 97 100 822, veröffentlicht im Juli 1997 wird das Vorgehen zur Berechnung des Stellsignals der Energierückgewinnung beschrieben. Die Schritte können anhand der Nummern in Fig. 6-11 nachvollzogen werden.

1. Eintrag des Zuluft-Sollwerts, des Außenluft- und des Raumluft-Istwertes ins tx-Diagramm. Die Raum- und Außenluft in Kombination mit der Art der eingesetzten Energierückgewinnung teilen den ERG-Vektor auf. Das Ziel ist, den Zuluft-Sollwert zu erreichen. Tatsächlich können mit der ERG aber nur Punkte auf dem ERG-Vektor erreicht werden.
2. Gewichtete Bedarfssignale vektoriell eintragen (im Beispiel sind dies die Vektoren Heizen und Entfeuchten).
Gewichtete Bedarfsvektoren zeigen die gewünschte Aktion des Reglers. Heizen verlangt nach einer Temperaturerhöhung und zeigt darum auf der Temperaturachse nach oben. Entfeuchten verlangt nach einer kleineren absoluten Feuchte. Dies ist aber nur über eine Taupunktunter-schreitung im Kühler möglich. Deshalb wird auch Kühlen verlangt und der Entfeuchte-Vektor erhält eine Temperaturkomponente.

3. Projektion des Zuluft-Sollwerts und der gewichteten Bedarfsvektoren auf den ERG-Vektor.
Mit der Projektion der gewichteten Bedarfsvektoren kann auf die Lage des ERG-Vektors eingegangen werden. Hat z.B. die Raumluft die gleiche absolute Feuchte wie die Außenluft, ist es nicht möglich einen Feuchteanteil rückzugewinnen. Bei einem aktiven Befeuchtungsbedarf ergibt die Projektion den Nullvektor und somit hat in diesem Fall der gewichtete Bedarfsvektor keinen Einfluss und nur der Temperaturbedarfsvektor bestimmt das Stellsignal für die Energierückgewinnung. Der projizierte Zuluft-Sollwert ergibt den Ausgangspunkt für die Addition auf dem ERG-Vektor.
4. Vektorielle Addition der projizierten Bedarfsvektoren vom projizierten Zuluft-Sollwert aus.
Die Projektionen der Bedarfsvektoren sind zu addieren. Je nach Bedarf und Lage des ERG-Vektors zeigen die projizierten Vektoren in die gleiche oder in die entgegengesetzte Richtung. D.h. auch, dass die gleiche Reaktion mit der ERG gewünscht wird, oder nicht. Sind sie nicht gleich gerichtet bestimmen die Gewichtung und der aktuelle Bedarf die sich ergebende Reaktion der ERG. In Fig. 6-11 bestimmt der Vektor Entfeuchten die resultierende Wirkung, da er projiziert wesentlich grösser ist als der Vektor Heizen.
5. Berechnung des Stellsignals für die Energierückgewinnung durch Interpolation des sich ergebenden Punktes von Schritt 4 zwischen Raumluft (max. ERG, z.B. 20 %) und der Außenluft (min. ERG, 100%).
Das Resultat von Schritt 4 ist ein Punkt auf dem ERG-Vektor oder in der Verlängerung des ERG-Vektors. Liegt der Punkt auf dem Vektor, dann wird das Stellsignal für die Energierückgewinnung durch lineare Interpolation zwischen den beiden Endwerten bestimmt. Dabei wird der Raumluft z.B. 20 % (Maximum ERG) und der Außenluft 100 % (Minimum ERG) zugewiesen. Befindet sich der Punkt auf der Verlängerung, wird der Wert des näher liegenden Luftzustandes genommen.

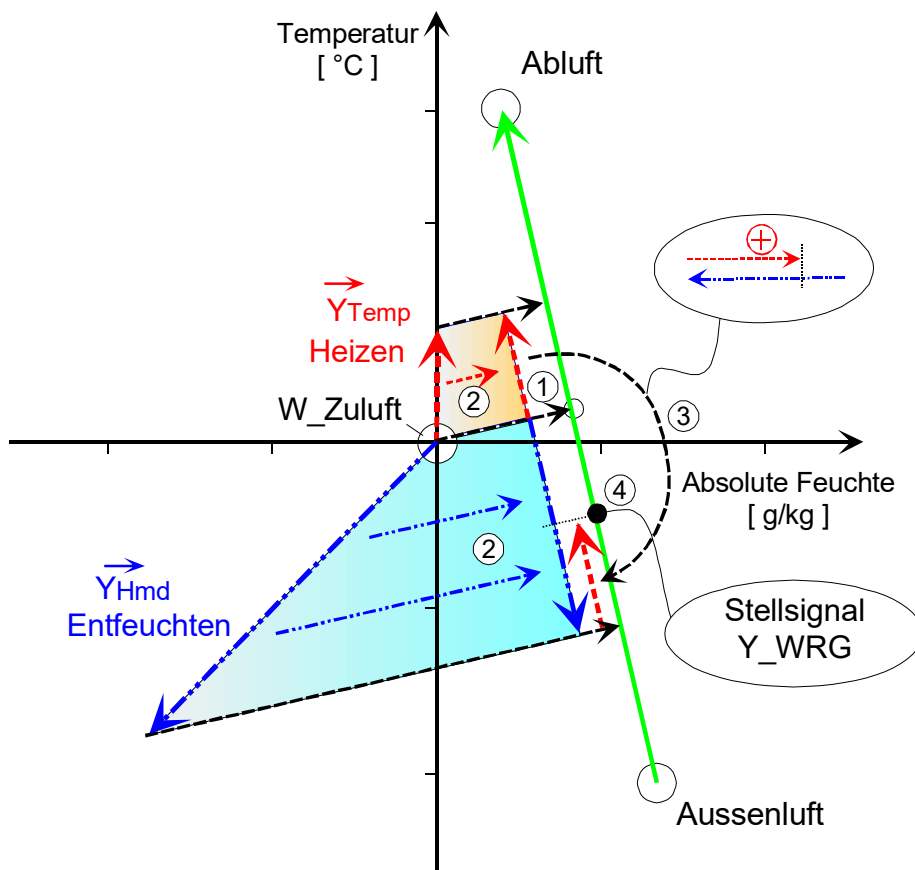


Fig. 6-11 Steuerung der Energierückgewinnung

- Gewichtetes Bedarfssignal Heizen
- Gewichtetes Bedarfssignal Entfeuchten
- Verbindung Raumluft und Außenluft, ERG Vektor
- ① Projektion des Zuluft-Sollwerts
- ② Projektion des Bedarfsvektors
- ③ Addition des Bedarfsvektors
- ④ Berechnung des Stellsignals für die ERG

6.6. DEC-Systeme

Adiabatische Kühlung und adsorptive Entfeuchtung geschickt kombiniert

Der Begriff DEC (**D**esiccative and **E**vaporative **C**ooling) steht für Trocknung und Verdunstungskühlung.

Der Grundgedanke der DEC-Technik besteht darin, den klassischen - mit elektrischen Kompressoren betriebenen - Kälteerzeugungsprozess in der Klimatisierung mit Luftentfeuchtungsaufgaben zu ersetzen. Dazu wendet man die seit langem bekannten Verfahren der adiabatischen Kühlung und der adsorptiven Luftentfeuchtung in einer speziellen Kombination an. Meistens werden feste Sorptionsmittel eingesetzt, deren Anwendung sich bewährt hat (z.B. Silicagel). Antriebsenergie des Prozesses (vgl. 5 in Fig. 6-12) ist Wärme auf einem nicht allzu hohen Temperaturniveau, die sehr oft - insbesondere im Sommer - in Form von Abwärme zur Verfügung steht. Aus untenstehender Abbildung ist ersichtlich, dass dieser Prozess auf einem, gegenüber den Lufttemperaturen, hohen Temperaturniveau abläuft (Regenerations-Lufterhitzer bis z.B. 70 °C).

Funktionsprinzip (Sommerfall)

Die Außenluft (z.B. 32 °C, 35 % r.F.) wird nach der üblichen Filterung in einem Adsorptions-Tauscher (1) entfeuchtet. Diese Entfeuchtung findet kontinuierlich statt und erfolgt nahezu adiabatisch. Die dabei freiwerdende Adsorptionswärme wird an den Luftstrom abgegeben, was zu einer Erwärmung der Außenluft führt.

Die trockene warme Luft wird anschließend in einem regenerativen Wärmerückgewinner (2) vorgekühlt. Im Winter dient dieser Rotationstauscher zur Vorwärmung der Außenluft mit Hilfe der Abluft. Die so vorgekühlte Luft wird anschließend durch einen Verdunstungsbefeuchter (3) auf die geforderte Zulufttemperatur und -feuchte gebracht.

Die Abluft wird durch einen weiteren Verdunstungsbefeuchter (4) in der Temperatur abgesenkt zur besseren Vorkühlung der Zuluft im Wärmerückgewinner (2). Dabei erwärmt sich die Abluft. Es erfolgt eine Nacherwärmung mit einem Lufterhitzer (5), damit der Adsorptions-Tauscher (1) wieder regeneriert werden kann. Dabei wird die Abluft gekühlt und die Feuchte nimmt zu. Man nennt diesen Vorgang auch "adiabate Desorption".

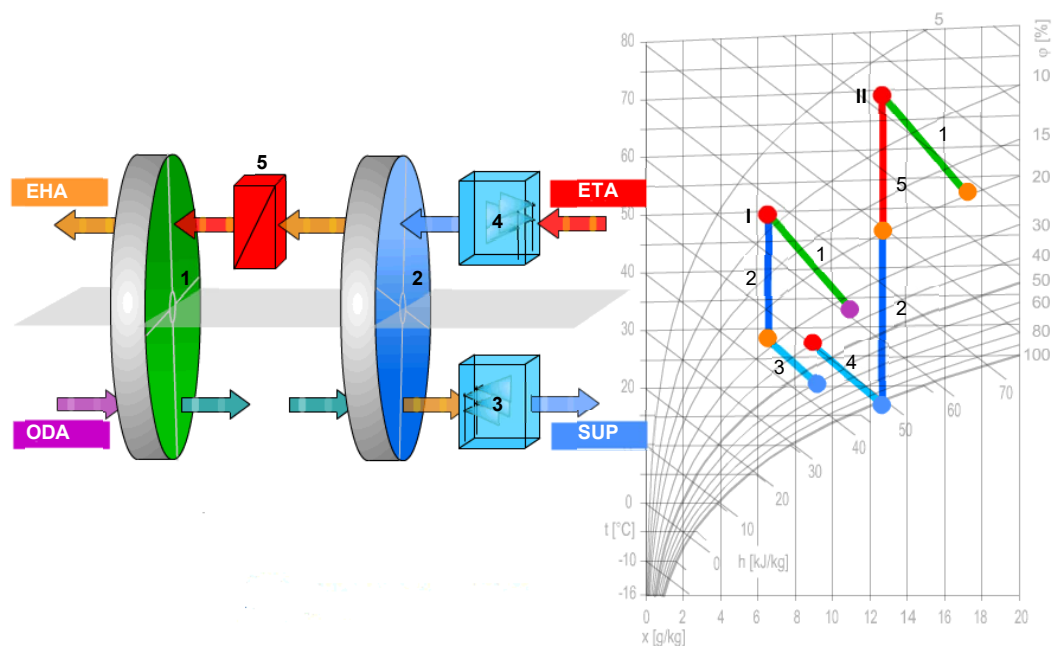


Fig. 6-12 Funktionsprinzip einer DEC-Anlage - Sommerfall (Quelle: Klingenburg)

- | | |
|----|--|
| 1 | Sorptions-Tauscher (Trocknung der Außenluft) |
| 2 | Rotations-Wärmetauscher |
| 3 | Zuluft-Befeuchter (adiabatische Kühlung) |
| 4 | Abluft-Befeuchter (adiabatische Kühlung, z.B. Kaltdampf-Generator) |
| 5 | Regenerations-Lufterhitzer (erwärmt Luft auf z.B. 70 °C) |
| I | Zustandsverlauf (1 → 2 → 3); Außenluft (ODA) → Zuluft (SUP); |
| II | Zustandsverlauf (4 → 2 → 5 → 1); Abluft (ETA) → Fortluft (EHA) |

6.6.1. Regelung von DEC-Systemen

Für die Regelung von DEC-Systemen kommen teilweise sehr komplexe Regelstrategien zum Einsatz - abgestimmt auf die jeweiligen Anwendungsbedürfnisse. Oft werden dabei für den Heiz- und den Kühlfall verschiedene Regelstrategien verwendet.

Nachfolgend die Regelung für die in Fig. 6-12 gezeigte Anlage im Sommerfall (Kühlfall).

Die Regelung wird in zwei Regelkreise aufgeteilt:

1. Regelkreis: Eintritts-Enthalpie in Zuluft-Befeuchter

Der 1. Regelkreis regelt die Eintritts-Enthalpie in den Zuluft-Befeuchter (3) mit Hilfe des Verdunstungsbefeuchters (4), dem Rotations-Wärmetauscher (2), dem Regenerations-Lufterhitzer (5) und dem Sorptionstauscher (1).

- Die 1. Sequenz regelt dabei den Verdunstungsbefeuchter (4) stufenlos zwischen 0...100 %, wobei der Rotationswärmetauscher (2) mit voller Drehzahl läuft (100 % WRG).
- Die 2. Sequenz regelt den Regenerationslufterhitzer (5) stetig, wobei der Sorptionstauscher (1) voll arbeitet (100 % Entfeuchtung).
- Die 3. Sequenz (optional) passt die Zuluftmenge über Stufenschaltung oder Drehzahlregelung an.

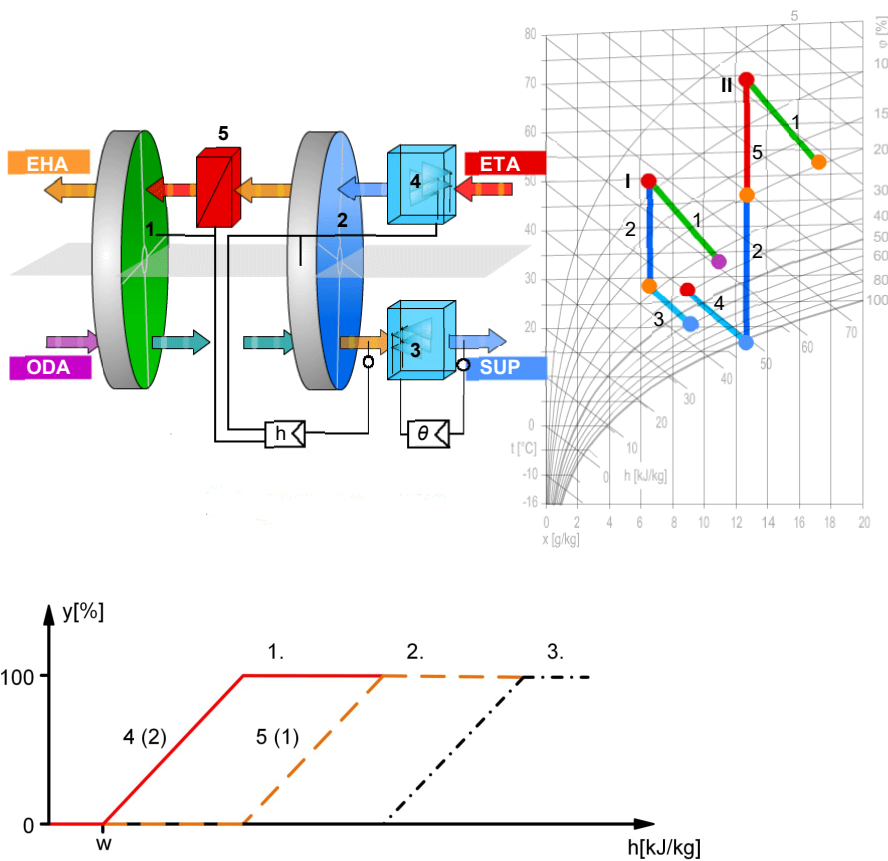


Fig. 6-13 Enthalpie-Regelkreis im DEC-System

1. Sequenz mit Verdunstungsbefeuchter in Abluft (4) und Rotations-Wärmetauscher (2)
2. Sequenz mit Regenerations-Lufterhitzer (5) und Sorptionstauscher (1)
3. Sequenz (optional) Luftvolumenstrom (Stufenschaltung oder Drehzahlregelung)

2. Regelkreis: Zulufttemperatur

Der 2. Regelkreis regelt die Zulufttemperatur mit dem Zuluft-Befeuchter (3) stetig.

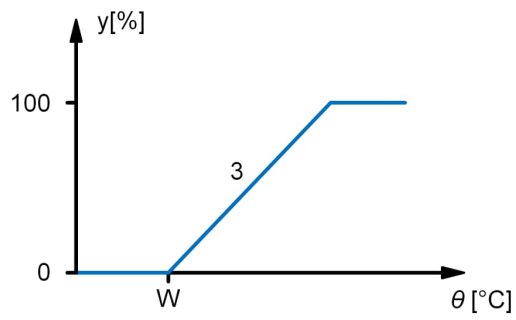


Fig. 6-14 Zulufttemperatur-Regelkreis im DEC-System mit Hilfe vom Zuluft-Befeuchter (3)

7 Diverse Steuer- und Regelfunktionen

7.1. Frostschutz

Bei Außentemperaturen unter 0 °C besteht die Gefahr, dass das Wasser im Außenluft-Vorwärmer einfriert und dieser dabei beschädigt wird, weil durch die Zustandsänderung von flüssig zu fest, das Volumen schlagartig zunimmt (vgl. Fig. 7-1). Bei stehendem Wasser setzt die Eisbildung sofort ein, zirkuliert es, sind dafür einige Minusgrade notwendig. Die Wassertemperatur im Lufterwärmer darf also in keiner Lastsituation und an keiner Stelle unter 0 °C sinken.

Anomalie des Wassers

Zur Information wird hier nochmals das Volumen-/Temperatur-Verhalten von Wasser aufgezeigt (vgl. auch BT_0093_DE Einführung in die HLK- und Gebäudetechnik; Kapitel 2 physikalische Grundlagen). Speziell dabei ist, dass sich das Wasser zwischen 0 °C und 4 °C zuerst einmal zusammenzieht und erst danach beginnt, sich normal zu verhalten, d.h. sich auszudehnen.

1.000 kg Wasser	
-1 °C	ca. 1.090,0 Liter
0 °C	1.000,2 Liter
2 °C	1.000,1 Liter
4 °C	1.000,0 Liter
10 °C	1.000,4 Liter
20 °C	1.001,8 Liter
30 °C	1.004,4 Liter
40 °C	1.007,9 Liter
50 °C	1.012,1 Liter
60 °C	1.017,1 Liter
70 °C	1.022,8 Liter
80 °C	1.029,0 Liter
90 °C	1.035,9 Liter
100 °C	1.043,5 Liter

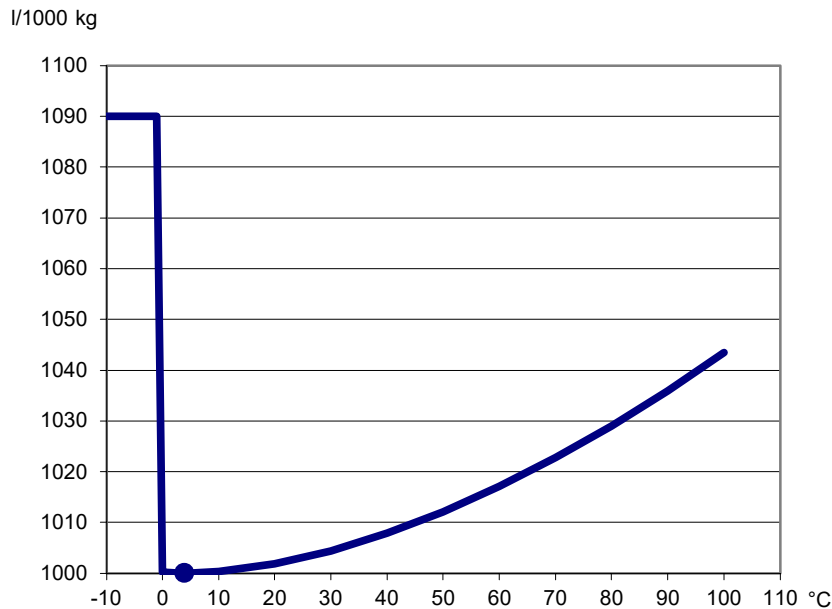


Fig. 7-1 Volumenänderung von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur

Folgende Ursachen können eine Frostgefahr herbeiführen:

- Undichte Luftklappen bei abgeschalteter Anlage (bewirken Auskühlung des Lufterwärmers)
- Anfahren der Anlage bei tiefen Außentemperaturen und noch zu wenig erwärmtem Wasser im Lufterwärmer
- Störungen in der Wärmeversorgung (z. B. Brennerstörung, Brennstoffmangel usw.)
- Störungen oder Defekte in der Anlage (Pumpe, Ventilantrieb usw.)
- Planungsfehler (überdimensionierter Lufterwärmer, falsche hydraulische Schaltung (Durchflussregelung anstatt Mischregelung)
- Geringer Lüftungs-Wärmebedarf bei großem Fremdwärmeanfall im belüfteten Raum und gespeicherter Wärme in nachgeschalteten Geräten (Kühler, Nachwärmer etc.) und deshalb nur wenig geöffnetes Regelventil.

Der Lufterwärmer kann aber vor Frostschäden geschützt werden durch:

- einen Frostschutzthermostat (luftseitig oder wasserseitig)
- eine zweistufige Frostschutzfunktion (luftseitig oder wasserseitig)
- eine spezielle Frostschutz-Anfahrsteuerung

Bei wasserseitigem Frostschutz muss unter einer Außentemperatur von + 5 °C automatisch die Vorerwärmerpumpe eingeschaltet werden.

7.1.1. Frostschutzthermostat

Luftseitige Überwachung

Die einfachste Frostschutteinrichtung besteht aus einem Thermostaten mit Kapillarrohr-Fühler. Dieser Kapillarrohr-Fühler ist – in der Richtung des Luftstromes gesehen – nach dem Lufterwärmer, in einem Abstand von ca. 5 cm in Schleifen über die ganze Lufterwärmerfläche verteilt. Der Frostschutzthermostat schaltet auf "Frostgefahr" um, sobald die Lufttemperatur am Kapillarrohr, auf einer Länge von ca. 30 cm, den eingestellten Grenzwert von z. B. + 5 °C unterschreitet.

Wasserseitige Überwachung

Beim wasserseitigen Frostschutz überwacht ein Thermostat die Wassertemperatur am Lufterwärmer-Austritt. Unterschreitet die Rücklauftemperatur den eingestellten Grenzwert, schaltet der Thermostat auf "Frostgefahr" um.

Funktion

Beim luft- oder wasserseitigen Frostschutz bewirkt das Umschalten des Thermostaten auf "Frostgefahr" folgende Anlageneingriffe (Fig. 7-2):

- Öffnen des Lufterwärmerventils auf 100 %
- Einschalten der Umwälzpumpe (sofern diese noch nicht laufen sollte)
- Ausschalten des Zuluft- und Abluftventilators
- Schließen der Außen- und Fortluftklappe sowie der Brandschutzklappen mit Motor-Stellantrieb
- Störungsmeldung vor Ort durch ein Melde-Element (z. B. Lampe oder Alarmhupe) und an ein ev. Gebäudeautomations-System.

Steigt die Lufttemperatur wieder um die Größe der Schaltdifferenz des Frostschutzthermostaten an, so gibt dieser die Anlage wieder frei. In Anlagen mit Einschaltsperrung muss zusätzlich vor Ort eine Entriegelungstaste von Hand betätigt werden. Ein solcher Rückstellzwang veranlasst das Betriebspersonal, die Ursache der Sicherheitsabschaltung zu suchen und eventuelle Fehler zu beheben, bevor die Anlage wieder gestartet wird.

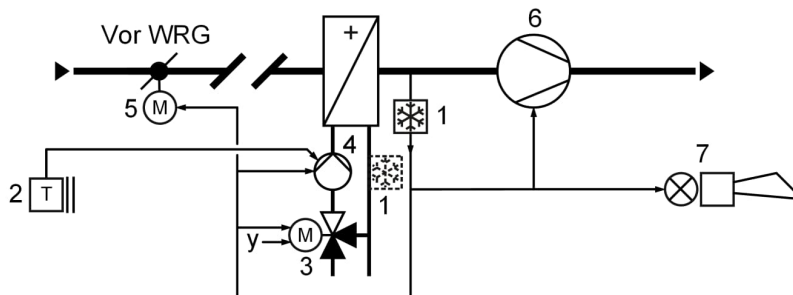


Fig. 7-2 Frostschutzthermostat in einfacher Lüftungsanlage

- | | |
|---|--|
| 1 | Frostschutzthermostat (luftseitig, alternativ: wasserseitig) |
| 2 | Außenthermostat für Vorerwärmerpumpe |
| 3 | Lufterwärmerventil |
| 4 | Umwälzpumpe |
| 5 | Außenluftklappe |
| 6 | Zuluftventilator |
| 7 | Alarmanlage |
| y | Stellsignal des Reglers |

Ist mit dem Einfrieren des Lufterwärmers ein großer Folgeschaden zu erwarten, so kann zur Erhöhung der Sicherheit, ein luftseitiger und ein wasserseitiger Frostschutz kombiniert werden.

7.1.2. Zweistufige Frostschutzfunktion

Die zweistufige Frostschutzfunktion greift zuerst mit einer stetigen Funktion (präventiver Frostschutz) und anschließend mit einer 2-Punkt-Funktion (Frostgefahr) in den Anlagenbetrieb ein, sobald am Messelement des Frostschutzfühlers 1 die Temperatur einen eingestellten Wert unterschreitet (Fig. 7-3).

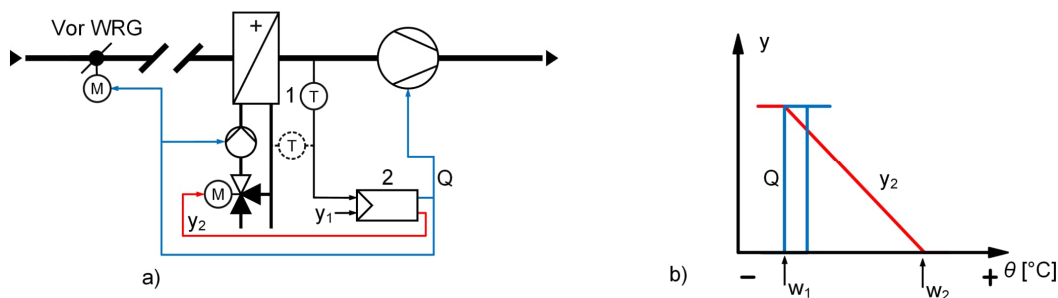


Fig. 7-3 Zweistufige Frostschutzfunktion

a) Prinzipschema

b) Wirkdiagramm

- | | |
|----------------|---|
| 1 | Frostschutztemperaturfühler (luft- oder wasserseitig) |
| 2 | Frostschutz-Steuer- und Regelgerät |
| y ₁ | Stellsignal vom Temperaturregler |
| y ₂ | Stetiges Stellsignal vom Frostschutz-Steuer- und Regelgerät |
| w ₁ | Frostschutzwert 1 |
| w ₂ | Frostschutzwert 2 |
| Q | 2-Punkt-Steuersignal für Ventilatoren, Klappen und Pumpe |

Präventiver Frostschutz

Die Frostschutzfunktion bewirkt folgende Anlageneingriffe:

Der präventive (vorbeugende) Frostschutz verhindert das unnötige Aktivieren der Funktion "Frostgefahr" bei ausgeschalteter Anlage (Ventilatoren aus), beim Anfahren und während dem Betrieb der Anlage. Wenn also die gemessene Temperatur den höheren Frostschutzwert w_2 unterschreitet, werden vom Steuer- und Regelgerät (2) folgende Anlagenelemente stetig angesteuert:

- Lufterwärmerventil weiter öffnen (Maximal-Auswahl zwischen Frostschutz- und Temperaturregelung)
- Leistung der Wärmerückgewinnung (sofern möglich) erhöhen oder über stetige Mischklappen (sofern vorhanden) mehr warme Umluft beimischen
- Ein ev. geöffnetes Kühlventil wird gleichzeitig geschlossen, um unnötigen Energieverbrauch zu vermeiden.

Der "präventive Frostschutz" sorgt folglich dafür, dass die Funktion "Frostgefahr" erst aktiv werden kann, wenn trotz des vorherigen Öffnens des Regelventils, resp. der weiteren stetigen "Wärmelieferanten", der Lufterwärmer nicht die erforderliche, frostsichere Betriebstemperatur erreicht.

Frostgefahr

Wenn die Temperatur den tieferen Frostschutzwert w_1 unterschreitet, werden folgende Not-Schaltungen ausgelöst:

- Öffnen des Lufterwärmerventils auf 100 % (sofern noch nicht voll offen)
- Einschalten der Vorerwärmerpumpe (sofern diese noch nicht in Betrieb ist)
- Ausschalten des Zuluft- und des Abluftventilators
- Schließen der Außen- und Fortluftklappen sowie der Brandschutzklappen mit Motor-Stellantrieb
- Störungsmeldung am Steuer- und Überwachungsgerät. Zusätzlich kann die Frostgefahr durch ein Melde-Element vor Ort (z. B. Lampe oder Alarmhorn) oder auch extern an ein Gebäudeautomations-System gemeldet werden.

Die Funktion "Frostgefahr" wird wieder aufgehoben, wenn der Störzustand quitiert wird und die vom Frostfühler gemessene Temperatur über den tieferen Sollwert w_2 ansteigt. Die Stellung des Ventils verharrt jedoch auf 100 %, bis die Temperatur wieder den höheren Sollwert w_1 erreicht hat.

7.1.3. Spezielle Frostschutz-Anfahrsteuerung

Wird bei tiefen Außentemperaturen eine Lüftungs- oder Klimaanlage eingeschaltet, so ist die Gefahr besonders groß, dass das Wasser im Lufterwärmer, wegen der plötzlichen Kaltluftströmung, innerhalb kürzester Zeit einfriert. Dieses Problem ist bei einer Anlage mit Auf-/Zu-Klappen ausgeprägter als bei der Verwendung stetiger Klappen mit Umluftbeimischung.

Bei einer Anlage mit Auf-/Zu-Klappen verhindert eine Frostschutz-Anfahrsteuerung auf die folgende Weise einen Frostschaden (Fig. 7-4): Wird die Anlage bei einer Außentemperatur unter bspw. $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – gemessen von einem Fühler an der Außenwand – eingeschaltet t_1 , so werden vorerst nur das Lufterwärmerventil y_1 ganz geöffnet und die Umwälzpumpe eingeschaltet. Während einer einstellbaren und von der Außentemperatur abhängigen Zeit Δt_2 erfolgt nun ein Vorwärmen des Heizregisters, so dass beim Anlaufen der Ventilatoren keine Einfriergefahr mehr besteht. Nach Ablauf der Vorwärmzeit Δt_2 , d.h. zum Zeitpunkt t_3 , öffnen sich die Luftklappen und die Ventilatoren gehen in Betrieb. Gleichzeitig beginnt das Lufterwärmerventil gemäß einer einstellbaren Rückfahrzeit Δt_4 zu schließen, bis die Ventilstellung durch den Wärmebedarf des Temperaturreglers y_2 übernommen wird.

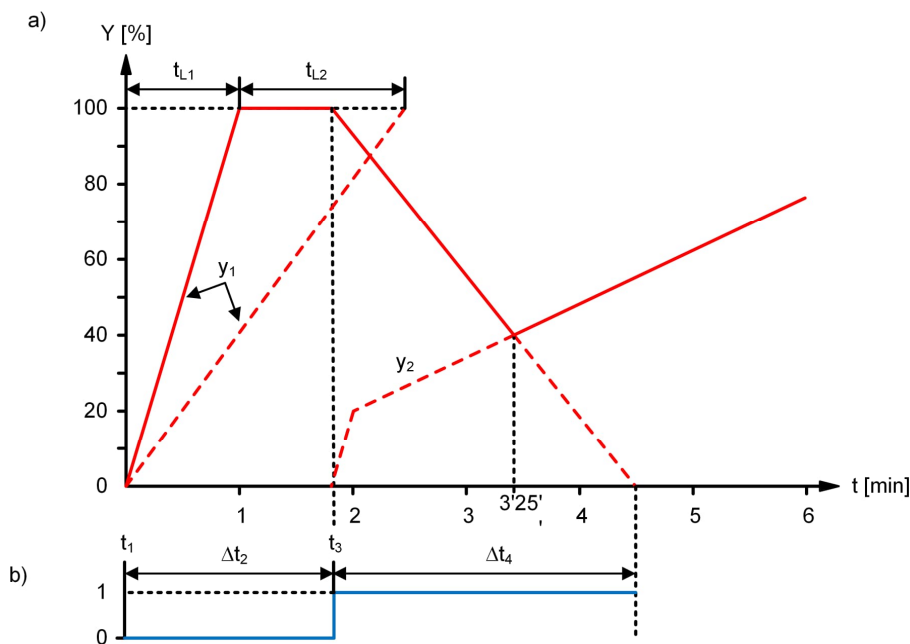


Fig. 7-4 Spezielle Frostschutz-Anfahrsteuerung

a)	Steuerung des Vorerwärmerventils	b)	Ventilatoren- und Klappensteuerung
t_{L1}, t_{L2}	Laufzeiten der Stellantriebe	t_1	Einschaltbefehl der Anlage
Δt_2	Vorwärmzeit	t_3	Start der Auf-/Zu-Klappen, Ventilatoren und Regelung
Δt_4	Zusteuzeit		
y_1	Ventilstellsignal der Anfahrsteuerung	y_2	Ventilstellsignal des Temperaturreglers

Achtung

Beim Definieren einer minimalen Vorwärmzeit ist die jeweilige Laufzeit des Ventil-Antriebes zu beachten. In den üblichen Anlagen werden Antriebe mit einer Öffnungszeit von $t_{L1} = 15...35\text{ s}$, seltener von $t_{L2} = 30...150\text{ s}$ verwendet. Wenn die Vorwärmzeit unter der Antriebslaufzeit liegt, ist das Erreichen der maximalen Auf-Stellung nicht möglich.

Bei einer Anlage mit Umluftbeimischung werden beim Starten der Anlage, unter einer Außentemperatur von z. B. $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, die Ventilatoren sofort eingeschaltet. Die Anlage arbeitet aber vorerst im Umluftbetrieb, d.h. die Außen- und Fortluftklappen bleiben ganz geschlossen und die Umluftklappe 100 % geöffnet (kein minimaler Außenluftanteil). Während dieser Zeit ist die Warmwasser-Umwälzpumpe eingeschaltet, das Lufterwärmerventil wird geöffnet und ein eventuell vorhandenes Kühlventil gesperrt. Nach Ablauf einer einstellbaren und von der Außentemperatur mitbestimmten Zeit, geht die Anlage in den normalen Regelbetrieb über.

7.2. Luftfilter-Überwachung

Filter halten staubförmige Verunreinigungen aus der Außenluft und ev. der Abluft zurück und ermöglichen damit:

- eine verbesserte Raumluftqualität und eine geringere Verschmutzung des Raumes
- eine geringere Verschmutzung der Anlagenelemente und der Luftkanäle
- eine geringere Umweltbelastung

Die bei konstantem Luftvolumenstrom – mit zunehmender Filterverschmutzung – ansteigende Druckdifferenz über dem Filter ist ein Maß für dessen Verschmutzungsgrad. Dieser kann durch einen Filterwächter oder durch einen Druckdifferenzfühler überwacht werden.

7.2.1. Überwachung durch Filterwächter

Sobald die Druckdifferenz den am Filterwächter eingestellten Grenzwert überschreitet, meldet der Filterwächter die Verschmutzung des Filters. Diese wird dann als Störung angezeigt.

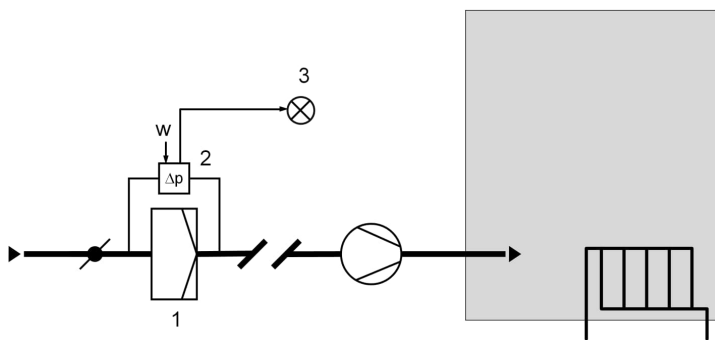


Fig. 7-5 Filterüberwachung durch Filterwächter

- | | |
|---|----------------------------|
| 1 | Luftfilter |
| 2 | Filterwächter (Pressostat) |
| 3 | Störungsmeldung Luftfilter |

In Anlagen mit variablem Luftvolumenstrom hält die Volumenstromregelung den Luftvolumenstrom trotz zunehmender Filterverschmutzung konstant, indem sie die Ventilator Drehzahl entsprechend erhöht. Wird die Anlage mit reduziertem Luftvolumenstrom betrieben, so werden bis zum Auslösen des Filterwächters die Ventilatoren mit einer unverhältnismäßig hohen Drehzahl betrieben, was unnötig Energie verbraucht. In solchen Anlagen und in Anlagen mit zwei oder mehr Ventilatorstufen ist somit eine optimale Filterüberwachung durch Filterwächter nur möglich, wenn mindestens einmal am Tag die Anlage mit maximalem Volumenstrom betrieben wird.

7.2.2. Überwachung mittels Druckdifferenzfühler

In Anlagen mit variablem Luftvolumenstrom ist der vom Luftfilter verursachte Druckabfall nicht nur vom Verschmutzungsgrad, sondern auch von der Größe des Luftvolumenstromes abhängig. Aus den Proportionalitätsgesetzen (vgl. BT_0093_DE Einführung in die HLK- und Gebäudetechnik; 6 Lüftungs- und Klimaanlage) ist bekannt, dass sich der Druckabfall im Quadrat zum Volumenstrom ändert. Das bedeutet, dass bei einer Volumenstromreduktion von 100 % auf 50 %, sich der Druckabfall über dem Filter von 100 % auf 25 % reduziert.

Damit in solchen Anlagen eine wirksame Filterüberwachung auch bei reduziertem Luftvolumenstrom möglich ist, wird empfohlen, den Verschmutzungsgrad des Luftfilters mit einem Differenzdruckfühler zu überwachen und den Grenzsollwert der Filterverschmutzung in Abhängigkeit vom aktuellen Luftvolumenstrom zu führen. Diese Führung erfolgt über einen Führungsgeber (5) mit der Luftgeschwindigkeit (4) als Führungsgröße.

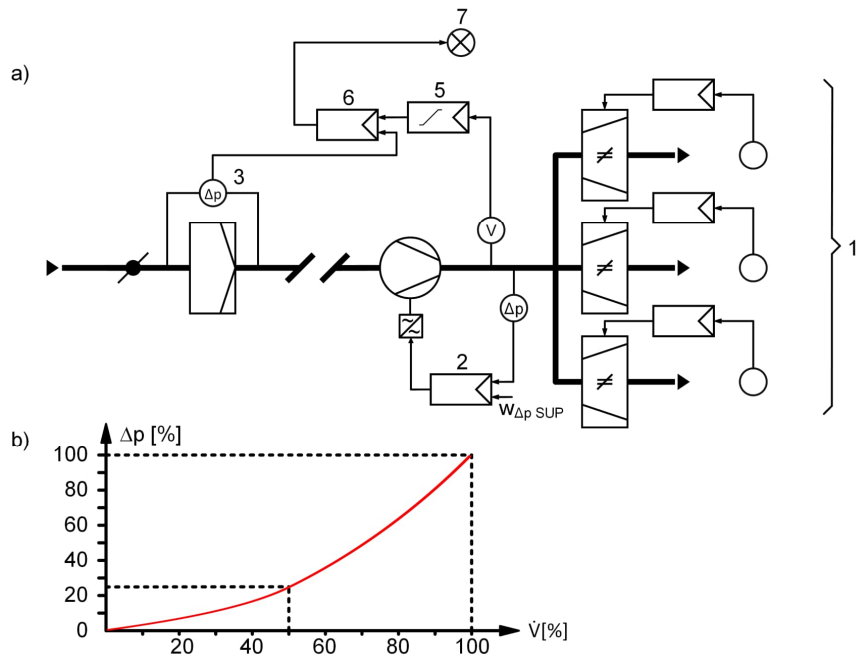


Fig. 7-6 Filter-Überwachung bei variablem Luftvolumenstrom mit Druckdifferenzfühler

- a) Prinzipschema der Filterüberwachung b) Wirkdiagramm des Führungsgebers (5)
- 1 Zonen mit variablem Zuluft-Volumenstrom
 - 2 Zuluft-Druckregelung mit Ventilator-Drehzahlsteuerung
 - 3 Druckdifferenzfühler der Filterüberwachung
 - 4 Luftgeschwindigkeitsfühler
 - 5 Sollwert-Führungsgeber
 - 6 Druckdifferenzregler der Filterüberwachung
 - 7 Luftfilter-Störungsmeldung

7.3. Lüftungs- und Klimaanlage mit Elektro-Lufterwärmer

Diese Anlagen werden im Prinzip genau gleich geregelt, wie Anlagen mit Warmwasser-Lufterwärmer. Die Leistungsregelung geschieht hier jedoch mit Hilfe eines Mehrstufenschalters, Digitalstufenschalters oder Stromventils, d.h. das Ausgangssignal vom Temperatur-Regler wird in ein, für den Elektro-Lufterwärmer geeignetes, Steuersignal umgesetzt.

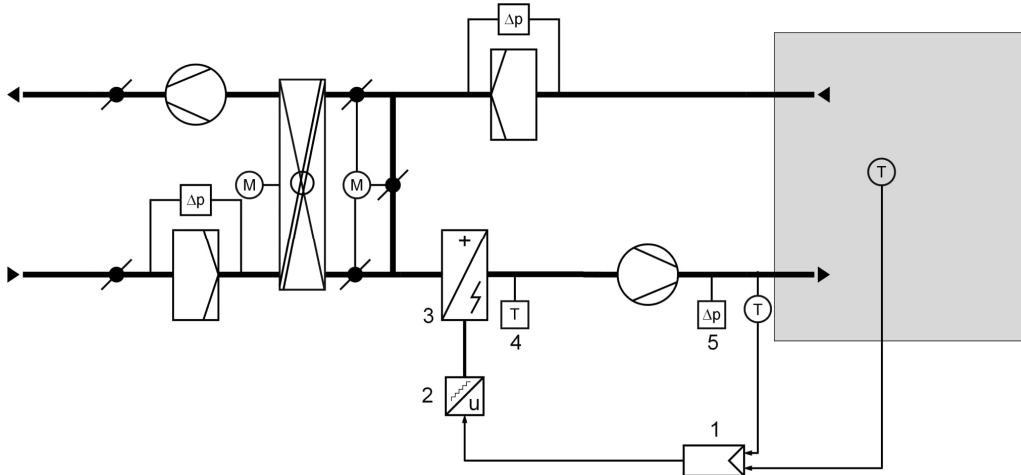


Fig. 7-7 Elektro-Lufterwärmer mit Leistungsregelung über Stufenschalter

- | | |
|---|---|
| 1 | Temperaturregler |
| 2 | Mehrstufen-, Digitalstufenschalter oder Stromventil |
| 3 | Elektro-Lufterwärmer (ev. mehrstufig) |
| 4 | Sicherheitsthermostat |
| 5 | Strömungswächter |

Ist ein Elektro-Lufterwärmer mehrstufig gebaut, d.h. die Heizelemente sind zu separaten Leistungseinheiten verdrahtet (z.B. 7-tel Aufteilung: 1/7, 2/7, 4/7), kann dieser direkt mit einem Mehr- oder Digital-Stufenschalter geschaltet werden. Dabei werden, je nach Anlagesituation, unterschiedliche Leistungseinheiten (teilweise in Kombination) geschaltet.

Elektro-Lufterwärmer können auch mit einem Stromventil betrieben werden. Das Stromventil dosiert die erforderliche Leistung mit einem kontaktlosen Leistungsschalter (Triac). Angesteuert wird das Stromventil mit einem Puls-/Pausen-Ausgangssignal. Stromventile können nur eine bestimmte Leistung direkt schalten. Deshalb müssen bei großen Leistungen mehrere Stromventile verwendet werden (Hersteller-Unterlagen beachten).

Bei der Auslegung des Elektro-Lufterwärmers für Komfortanlagen ist darauf zu achten, dass die Temperaturdifferenz pro Leistungsstufe ca. 3 K nicht überschreitet. Dadurch können unbehagliche Zugerscheinungen im Raum vermieden werden.

Da bei Ausfall der Luftströmung die Heizstäbe des Elektro-Lufterwärmers sehr hohe Temperaturen annehmen können, ist bei allen Anwendungen der Brandgefahr besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Es müssen deshalb immer eine Luftstromüberwachung (Strömungswächter, Windfahnen-schalter oder Druckdose), ein Sicherheits-Temperaturbegrenzer und eine Ventilator-Nachlaufzeit als Sicherheitskette wie folgt wirksam sein:

- Der Strömungswächter sperrt das Einschalten des Elektro-Lufterwärmers, bevor eine Luftströmung gemeldet wird, bzw. schaltet ihn aus, wenn die Luftströmung infolge Defektes oder Abschalten des Ventilators wegfällt. Eine einstellbare Ausschalt-Verzögerung verhindert, dass kurzzeitige Strömungsschwankungen zu einer Störabschaltung führen.
- Der Sicherheits-Temperaturbegrenzer überwacht die Temperatur des Elektro-Lufterwärmers und schaltet ihn ab, wenn eine Übertemperatur festgestellt wird.
- Ventilator-Nachlaufzeit: In Anlagen mit einem Elektro-Lufterwärmer müssen die Ventilatoren nach dem Ausschalten der Anlage noch während einer einstellbaren Zeitdauer in Betrieb bleiben, damit in der Umgebung des Elektro-Lufterwärmers kein übermäßiger Wärmestau entsteht.

In komplexeren Anlagen mit zweistufigen Zuluft-Ventilatoren sorgt außerdem eine Stufenüberwachung dafür, dass bei einer Umschaltung von der höheren auf die tiefere Drehzahlstufe, die Heizleistung des Elektro-Lufterwärmers während einer einstellbaren Zeitdauer auf 50 % reduziert wird. Damit wird ein übermäßiger Temperaturanstieg, der bei einer Reduktion des Luftvolumenstromes in der Zuluft entstehen würde, verhindert. Nach Ablauf der eingestellten Zeitdauer übernimmt wieder der Temperaturregler die Leistungssteuerung des Elektro-Lufterwärmers.

7.4. Quell-Lüftung

In Räumen mit vorwiegender Kühllast können mit der Quell-Lüftung die immer höheren Anforderungen an die Lüftungsanlagen bezüglich Zugfreiheit, Wärme- und Schadstoffabfuhr weitgehend abgedeckt werden. Eine allfällige Heizlast muss aber von statischen Heizflächen übernommen werden.

Bei der Quell-Lüftung wird die aufbereitete Luft mit einer - gegenüber der Raumtemperatur - geringen Untertemperatur im Bodenbereich laminar oder turbulenzarm eingeblasen (Fig. 7-8). Die Zulufttemperatur sollte einerseits im Maximum 2 ...3 K in Büros, bzw. bis zu 8 K in Fabriken, tiefer liegen als die Raumtemperatur, andererseits einen Wert von 21 °C in Büros bzw. 17 °C in Industrieräumen nicht unterschreiten (unbehagliche Fußkälte). Die Austrittsgeschwindigkeit beträgt ca. 0,2 m/s im Bürobereich und bis 0,6 m/s bei anderen Anwendungen. Somit bildet sich in der Aufenthaltszone ein sogenannter "Kaltluftsee". Die thermischen Auftriebskräfte an Personen und Geräten sorgen dafür, dass die Luft nach oben in den Deckenbereich steigt, wo diese wieder abgesaugt wird. Durch die Tatsache, dass aufbereitete Außenluft nur im Bereich von Wärmequellen nach oben strömt, werden die Wärme und die stoffliche Belastung direkt an der Entstehungsstelle abgeführt, wodurch sich diese nicht im ganzen Raum verteilen. Dadurch kann eine hohe Luftqualität mit relativ kleinen Luftmengen erzielt werden. Die übliche Luftwechselzahl liegt dabei zwischen 1...4 h⁻¹.

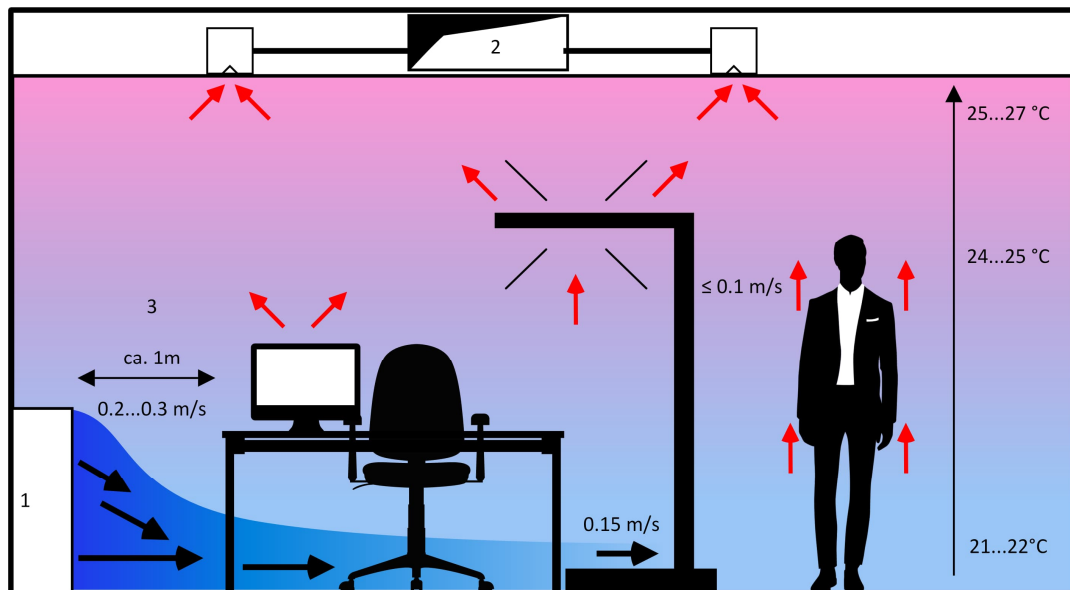


Fig. 7-8 Prinzip, Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten der Quell-Lüftung

- | | | | |
|---|-------------------|---|-------------|
| 1 | Quellluft-Auslass | 2 | Abluftkanal |
| 3 | Nahzone | | |

Bei Anwendung der reinen Quell-Lüftung im Komfortbereich ist die Untertemperatur der Zuluft gegenüber der Raumtemperatur im Allgemeinen auf ca. 2 ...3 K begrenzt. Deshalb lassen sich entweder nur relativ kleine Kühllasten abführen oder es sind entsprechend größere Luftmengen zur Abführung einer größeren Kühllast notwendig. Zudem kann direkt im Einblasbereich der Zuluft der thermische Komfort nicht gewährleistet werden, so dass für Aufenthaltszonen ein gewisser Abstand zu den Auslässen einzuhalten ist, d.h. die Auslässe sollten nicht im Bereich von Aufenthaltszonen angebracht werden.

Taupunkt-Überwachung

Beim Einsatz von Kühldecken muss sichergestellt werden, dass die Temperatur der Kühldecken oder der Leitungen, und damit des Kühlwassers, immer über dem Taupunkt der Raumluft liegt, da es sonst zu Kondensatbildung an der Decke kommen kann.

Die Taupunkt-Überwachung kann auf verschiedene Arten erfolgen:

- Führung der Kühlwasser-Vorlauftemperatur nach der Außentemperatur
- lokale Taupunkt-Überwachung im Raum (Ein/Aus)
- zentrale Führung der Kühlwasser-Vorlauftemperatur nach einem kritischen Raum
- lokale Führung der Kühlwasser-Vorlauftemperatur nach dem Raumzustand

Führung der Kühlwasser-Vorlauftemperatur nach der Außentemperatur

Die Kühlwasser-Vorlauftemperatur wird im gesamten Gebäude nach dem Taupunkt der Außenluft geschoben. Dies ist eine kostengünstige und effiziente Art einer Taupunkt-Überwachung, allerdings wird dabei mit einer relativ großen Sicherheitszone gearbeitet, was zu einer Reduktion der nutzbaren Kühlleistung in einzelnen Räumen führt.

Eine weitere Schiebung durch Berechnung des Taupunktes eines Referenzraumes resp. der Abluft ist ebenfalls möglich. Die Feuchtelasten können zentral oder für einzelne Zonen erfasst werden, sofern die Feuchtlast gleichmäßig verteilt ist. Das Resultat ist die zulässige Kühlwasser-Vorlauftemperatur.

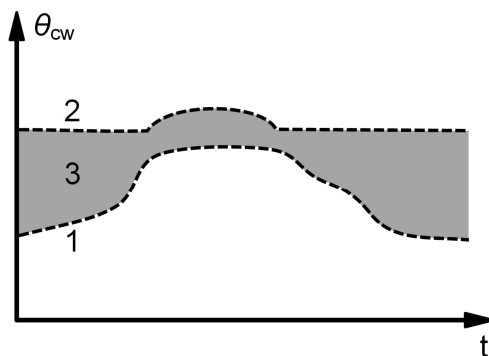


Fig. 7-10 Zentrale Führung der Kühlwasser-Vorlauftemperatur nach der Außentemperatur

- | | | | |
|---|----------------------------------|---|------------------------------|
| 1 | Taupunkttemperatur der Außenluft | 2 | Kühlwasser-Vorlauftemperatur |
| 3 | Sicherheitszone | | |

Lokale Taupunkt-Überwachung im Raum (Ein/Aus)

Die Überwachung erfolgt lokal mit einem Kondensationswächter pro Raum. Die Kühldecke wird bei Überschreitung des Taupunktes abgeschaltet. Dies ist eine kostengünstige Art, einzelne Räume individuell vor Schwitzwasser zu schützen. Nachteil dieser Lösung ist, dass im Falle der Taupunkt-Überschreitung keine Kühlung des Raumes mehr erfolgt.

Der Kondensatwächter muss am kältesten Punkt angebracht werden (Kaltwassereintritt), sowie die Raumluftfeuchte gut erfassen können. Bei Decken mit feuchteempfindlicher Oberfläche ist diese Lösung nicht zu empfehlen.

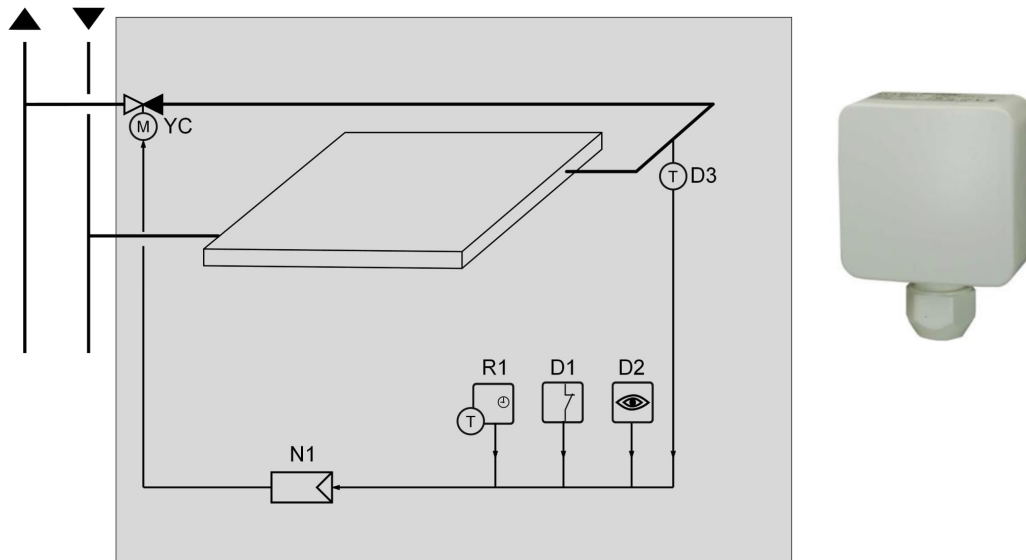


Fig. 7-11 Kühldecke mit lokaler Taupunktüberwachung (Quelle: Siemens)

D3	Taupunktfühler	R1	Raumgerät mit Temperaturfühler
YC	Kühlventil (stetig)	D1	externer Kontakt (z.B. Fenster)
N1	Einzelraumregler	D2	Präsenzmelder

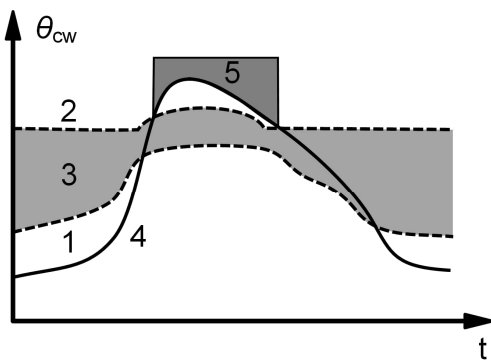


Fig. 7-12 Lokale Taupunkt-Überwachung mit Kondensatwächter (z.B. Siemens QXA 2100, rechts)

- 1 Taupunkttemperatur der Außenluft, Abluft oder eines Referenzraumes
- 2 Kühlwasser-Vorlauftemperatur zentral geführt
- 3 Sicherheitszone
- 4 Taupunkttemperatur eines kritischen Raumes
- 5 Kühlung unterbrochen im kritischen Raum durch Kondensatwächter

Zentrale Führung der Kühlwasser-Vorlauftemperatur nach einem kritischen Raum

Die Taupunkt-Überwachung erfolgt in Sequenz zu der zentralen Kühlwasser-Vorlauftemperatur-Regelung und der lokalen Taupunktberechnung. Die zulässige Kühlwasser-Vorlauftemperatur wird für den kritischen Raum aus Raumfeuchte und Temperatur individuell berechnet und – wenn nötig – zentral angehoben. Für den kritischen Raum muss der Kühlwasser-Anschluss mit einer temperaturvariablen hydraulischen Schaltung (z.B. Beimisch- oder Einspritz-Schaltung) erfolgen.

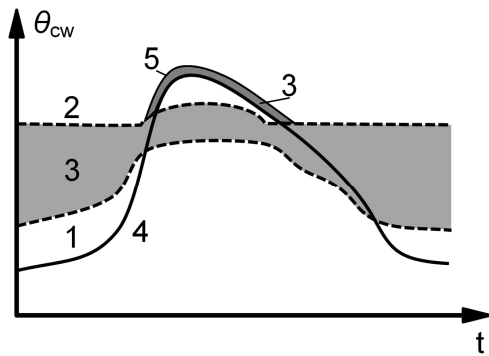


Fig. 7-13 Zentrale Führung der Kühlwasser-Vorlauftemperatur nach der Raumluft-Temperatur

- 1 Taupunkttemperatur der Außenluft, Abluft oder eines Referenzraumes
- 2 Kühlwasser-Vorlauftemperatur zentral geführt
- 3 Sicherheitszone
- 4 Taupunkttemperatur eines kritischen Raumes
- 5 Kühlwasser-Vorlauftemperatur berechnet für den kritischen Raum

Lokale Führung der Kühlwasser-Vorlauftemperatur nach dem Raumzustand

Die Taupunkt-Überwachung erfolgt individuell in jeden Raum. Die zulässige Kühlwasser-Vorlauf-temperatur wird in jedem Raum aus Temperatur und Raumfeuchte berechnet und – wenn nötig – in diesem Raum angehoben. Der Kühlwasser-Anschluss erfolgt mit einer temperaturvariablen hydraulischen Schaltung (z.B. Beimisch- oder Einspritz-Schaltung).

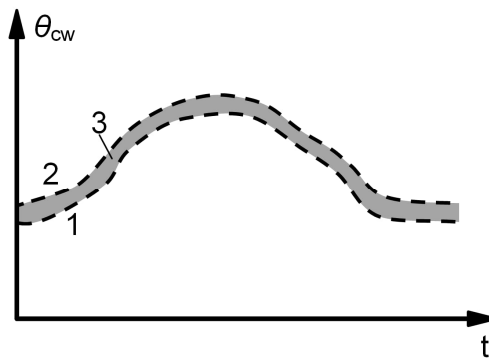


Fig. 7-14 Lokale Führung der Kühlwasser-Vorlauftemperatur nach dem Raumzustand

- 1 Taupunkttemperatur des Raumes
- 2 Kühlwasser-Vorlauftemperatur
- 3 Sicherheitszone

7.5. Druck- und Volumenstromregelungen in Lüftungsanlagen

Bei vielen Großanlagen (z. B. zentrale Luftaufbereitung mit Einzelraumregelungen) besteht oftmals die Forderung, dass variierende Luftvolumenströme bei gleichbleibendem Druck gefördert werden. Die durch Drosselung oder Abschaltung des Luftstromes – einzelner Räume oder Zonen – entstehenden unterschiedlichen Kanaldrücke, bewirken sonst in den anderen Räumen oder Zonen eine entsprechende Erhöhung des Zuluft-Volumenstromes und die damit verbundenen Zug- und Geräuschbelastungen. In anderen Anlagen – so z. B. für gewisse Räume in Krankenhäusern, Fabrikationsgebäuden, Bürogebäuden usw. – wird ein Überdruck oder Unterdruck gegenüber der Außenluft oder benachbarten Räumen gefordert.

Die Regelung einer Luft-Druckdifferenz oder eines Luftvolumenstromes, zur Anpassung an den Bedarf, kann z. B. durch folgende Stellgrößen-Änderungen geschehen:

- Stufenlose Drehzahlsteuerung des Ventilator-Antriebsmotors
- Polumschaltbarer Elektromotor (stufenweise Drehzahländerung)
- Dralldrosselregelung: Im Luftstrom wird vor dem Eintritt in das Laufrad des Ventilators, durch verstellbare Leitschaufeln, ein mehr oder weniger starker Drall und damit Druckabfall erzeugt.
- Laufradschaufelregelung (nur für Axialventilatoren): Der Anstellwinkel der Laufradschaufeln ist – über ein im Zentrum des Laufrades eingebautes Getriebe – im Lauf stufenlos verstellbar. (Kostspielige Lösung für große Industrie-Ventilatoren)
- Parallelbetrieb mehrerer kleinerer Ventilatoren (vgl. Fan-Grid) statt eines einzigen großen Ventilators. Diese Ventilatoren können zusätzlich noch mit einer stufenlosen Drosselsteuerung ausgerüstet sein.
- Einstellbare Bypassklappe (Kurzschluss) über dem Ventilator: Je nach Luftklappenstellung wird ein variabler Anteil der vom Ventilator geförderten Luft vom Ventilator-Austritt (Druckseite) wieder zum Ventilator-Eintritt (Saugseite) zurückgeführt. Dies ist nicht energie-effizient, weil der Ventilator eine konstante Luftmenge fördert (vgl. Proportionalitätsgesetze).
- Verstellbare Abluftklappen: Je nach Stellung der Abluftklappen verändert sich der Luftwiderstand des Abluftkanals. Dadurch resultiert ein veränderlicher Überdruck im belüfteten Raum.

7.5.1. Regelung des Zuluftdruckes

Wenn in einem verzweigten Kanalnetz Teilbereiche gedrosselt oder abgeschaltet werden müssen, ohne dass in Betrieb stehende Anlagen beeinflusst werden dürfen, dann muss der Zuluftkanal auf einem bestimmten Druck oder auf einer bestimmten Druckdifferenz zur Umgebung gehalten werden (Fig. 7-15).

Der stetige Regler (1) vergleicht die vom Fühler (2) gemessene Druckdifferenz (Druck im Kanal gegenüber Umgebung) mit dem Sollwert. Bei einer Abweichung korrigiert der Regler den Förderdruck des Ventilators über die Drehzahlanpassung mit einem Frequenzumrichter (3).

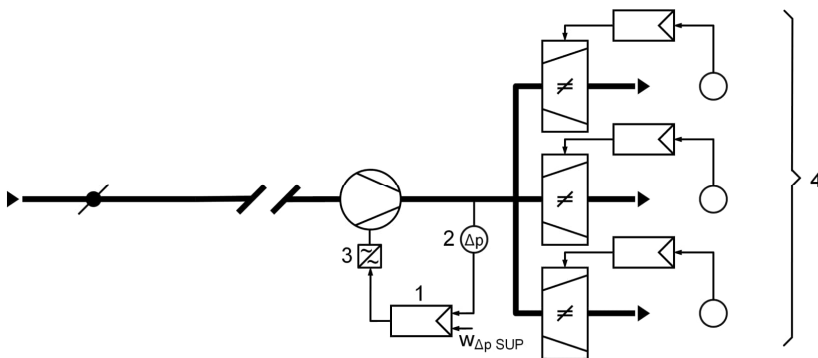


Fig. 7-15 Regelung des Zuluftdruckes in einem verzweigten Kanalnetz

- | | | | |
|---|--------------------|---|----------------------------------|
| 1 | Zuluft-Druckregler | 2 | Druckdifferenzfühler |
| 3 | Frequenzumrichter | 4 | Zonen mit variablem Volumenstrom |

Heute gibt es sogenannte EC- Ventilatoren (electronically commutated), welche direkt ohne Frequenzumrichter (3) geregelt werden können.



Fig. 7-16 Frequenzumrichter mit umfassender Ventilatoren-, Filter- und Motorüberwachung (Quelle: Siemens)

7.5.2. Überdruck- oder Unterdruckregelung eines Raumes

Bei diesen Regelungen wird im belüfteten Raum gegenüber der Außenluft und benachbarten Räumen ein Überdruck oder ein Unterdruck erzeugt. Über- oder Unterdruck in einem Raum kann erreicht werden z. B. durch unterschiedliche Förderleistung des Zuluft- und Abluftventilators, Veränderung des Luftwiderstandes im Luftkanal durch Klappen usw.

Wird ein Raum auf Überdruck gehalten, so wird das Zuströmen von unerwünschter, unreiner Luft durch undichte Stellen verhindert. Die Überdruckregelung wird z. B. in Labors und Fabrikationsräumen für empfindliche elektronische, optische und mechanische Geräte, und auch in Operationssälen von Krankenhäusern (zur Vermeidung von Infektionen) angewendet. Ein bestimmter Überdruck kann beispielsweise erzeugt werden, indem der Zuluftvolumenstrom konstant gehalten wird und der Regler den Abluftvolumenstrom, in Abhängigkeit des gewünschten Raum-Überdruckes, über die Drehzahl des Ventilators anpasst.

Bei der Unterdruckregelung eines Raumes wird die Ausbreitung schlechter Luft in Nebenräume verhindert. Sie findet daher hauptsächlich Anwendung bei Räumen mit starker Luftverunreinigung durch Gase, Dämpfe oder Gerüche wie z. B. Küchen, WC-Anlagen, Garderoben, Laboratorien, Fabrikationsräumen, Akkuräumen usw. In Operationssälen von Krankenhäusern wird im Unterdruckbetrieb die Ausbreitung von Bakterien verhindert. Zur Erzeugung von Unterdruck hält man den Abluftstrom konstant und drosselt den Zuluftvolumenstrom entsprechend dem geforderten Raum-Unterdruck.

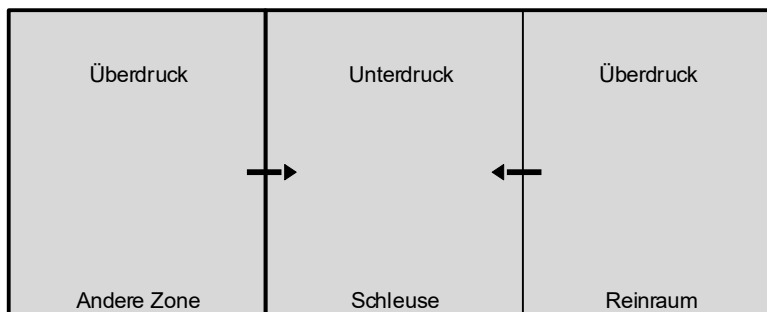


Fig. 7-17 Funktionsprinzip Überdruck – Unterdruck

Grundsätzlich gilt, dass ein Raum (Operationssaal) der steril sein muss, im Überdruck gehalten wird. Dies hat jedoch zur Folge, dass eine Schleuse vor dem Raum benötigt wird, welche sich im Unterdruck befindet. Um zu verhindern, dass sich die Verunreinigungen (Keime, Krankheitserreger etc.) in andere Zonen des Gebäudes ausbreiten können.

7.5.3. Luftvolumenstromregelung

Die Luftvolumenstromregelung wird z. B. in Anlagen angewendet, in denen der Luftvolumenstrom trotz zunehmendem Verschmutzungsgrad (= Druckabfall) des Luftfilters konstant bleiben soll oder in denen ein Luftvolumenstrom variabel ist und ein anderer proportional dazu verändert werden muss. Als Beispiel dazu dient ein Fabrikationsbetrieb, in welchem der Abluftvolumenstrom wegen verschiedener Absaugeinrichtungen oft ändert und der Zuluftvolumenstrom – trotz Undichtheit des Gebäudes – zur Erzeugung eines leichten Über- oder Unterdruckes proportional dazu angepasst werden muss (Fig. 7-18).

Eine stabile Regelung gewährleistet auch in diesem Fall die Kaskaden-Regelung. Messwert für den Luftvolumenstrom im Zuluft- und Abluftkanal ist der dynamische Druck, d. h. die Differenz zwischen dem Gesamtdruck und dem statischen Druck. Als Messwertgeber dienen Druckdifferenzfühler mit Membranen zur Aufnahme der Druckdifferenz. Bei der Kaskaden-Regelung (Fig. 7-18) erfasst der Druckdifferenzfühler (2) den Zuluftvolumenstrom und der Druckdifferenzfühler (3) den Abluftvolumenstrom. Der Zuluftvolumenstrom-Regler (1, Hilfs- oder Folgeregler) regelt den Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit des Abluftvolumenstromes, d. h. bei einer Änderung des Abluftvolumenstromes ändert der Abluftvolumenstrom-Regler (4, Haupt- oder Führungsregler) den Sollwert des Zuluftvolumenstrom-Reglers. Stellglied des Regelkreises ist z. B. eine Einrichtung (5) zur Änderung der Ventilatorumdrehzahl (Frequenzumrichter). Da hier der Abluftvolumenstrom als Führungsgröße für den Zuluftvolumenstrom dient, haben Druckeinflüsse von außen oder von benachbarten Räumen keinen Einfluss.

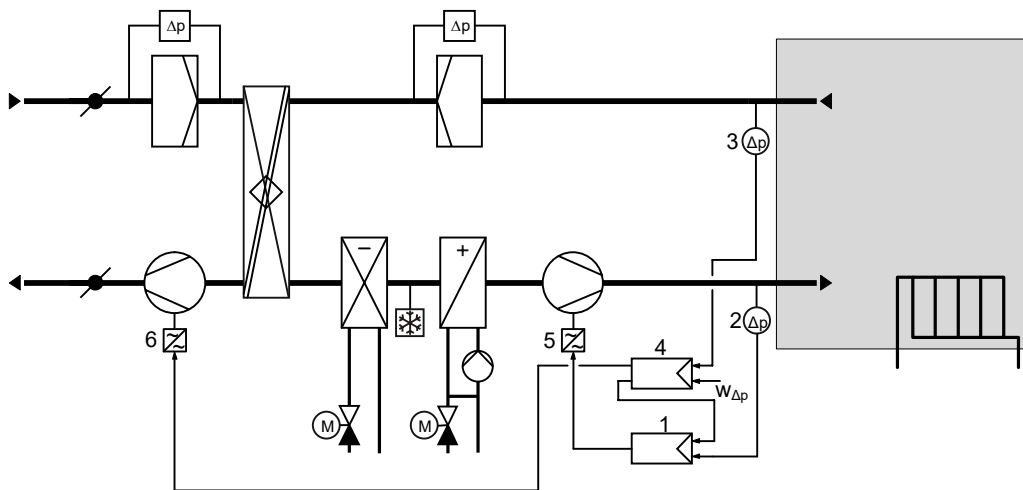


Fig. 7-18 Regelung des Zuluftvolumenstroms in Abhängigkeit des Abluftvolumenstroms

- | | | | |
|---|------------------------------------|---|------------------------------------|
| 1 | Zuluft-Differenzdruckregler | 2 | Zuluft-Druckdifferenzfühler |
| 3 | Abluft-Druckdifferenzfühler | 4 | Abluft-Differenzdruckregler |
| 5 | Drehzahlsteuerung Zuluftventilator | 6 | Drehzahlsteuerung Abluftventilator |

7.6. Kühlung durch intensive Nachtlüftung

In Perioden mit hohen Tagestemperaturen wird mit der intensiven Nachtlüftung, besonders in Gebäuden mit großen Wärmespeichermassen, der Kühlenergieverbrauch reduziert, indem während der Nacht die Räume (Speichermassen) mit kühler Außenluft für den folgenden Tag vorgekühlt werden.

Um einen energieoptimalen Betrieb der intensiven Nachtlüftung zu gewährleisten, muss diese an das Gebäude "angepasst" werden. Diese Anpassung erfolgt am Steuergerät durch entsprechendes Einstellen der Uhrzeiten und Temperatur-Grenzwerte für die Ein- und Ausschaltbedingungen.

Einschalt-Bedingungen

Die intensive Nachtlüftung wird eingeschaltet, wenn folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

- die Außenlufttemperatur liegt über dem eingestellten Minimal-Grenzwert von 12 bis 14 °C
- die Raumtemperatur liegt über dem eingestellten Maximal-Grenzwert
- die Differenz zwischen Raum- und Außenlufttemperatur ist grösser als die eingestellte Differenz

Ausschalt-Bedingungen

Die intensive Nachtlüftung wird ausgeschaltet:

- durch das Zeitschaltprogramm

oder

- frühestens nach Ablauf der eingestellten Minimal-Betriebszeit, wenn eine der obenstehenden Einschaltbedingungen nicht mehr erfüllt ist

In der Anlagen-Betriebsart "Intensive Nachtlüftung" werden:

- Auf-/Zu-Luftklappen ganz geöffnet
- stetige Luftklappen ungeregelt auf die Maximalstellung gesteuert (Umluftklappen geschlossen)
- 1-stufige Ventilatoren eingeschaltet (und auf ihrer max. Drehzahl betrieben)
- 2-stufige Ventilatoren auf der höheren Drehzahlstufe betrieben

Nicht in Betrieb genommen sind Lufterwärmer, Wärmerückgewinnung und Regelung.

7.7. Brandfallsteuerung

Wird von der Brandmelde-Anlage ein Brand im Gebäude gemeldet, übernimmt die Brandfallsteuerung den Anlagenbetrieb. Diese umfasst folgende Funktionen:

- Ausschalten der Anlage und der Anlagenelemente
- Melden des Brandes am Prozessgerät, an die Brandmeldezentrale und extern durch Alarmhorn oder Lampe
- Entrauchen des Gebäudes nach dem Brand

7.7.1. Brandabschaltung

Durch die Brandmeldung wird die Anlage in den Betriebszustand Brandabschaltung geschaltet. Dabei werden - je nach Anlagenkonfiguration - die folgenden Schaltungen vorgenommen:

- Ausschalten der Ventilatoren
- Schließen der Außenluft-/Fortluft-Klappen
- Schließen der Brandschutzklappen mit Motorantrieb

7.7.2. Entrauchungsbetrieb

Die Entrauchungsfunktion ermöglicht nach dem Brand das Entfernen von Rauch und Wärme aus dem Gebäude. Nur im Betriebszustand Brandabschaltung kann die Anlage durch den Entrauchungsbefehl des Feuerwehrschafters in den Betriebszustand Entrauchungsbetrieb geschaltet werden. Je nach Anlage stehen dazu folgende Entrauchungsmöglichkeiten zur Verfügung:

In Anlagen ohne Überdruck- oder Unterdruckgefahr:

- Entrauchen nur mit Zuluftventilator
- Entrauchen nur mit Abluftventilator
- Entrauchen gleichzeitig mit Zuluft- und Abluftventilator

In Anlagen mit Überdruck- oder Unterdruckgefahr:

- Entrauchen gleichzeitig mit Zuluft- und Abluftventilator

Je nach Entrauchungskonzept werden stetige Klappen, entsprechende Auf-/Zu- und Brandschutzklappen geöffnet, sowie entsprechende Ventilatoren eingeschaltet:

Ein Entrauchungsbetrieb mit drehzahlgesteuerten Ventilatoren ist in VVS-Anlagen nur möglich, wenn die Drosselklappen der Luftvolumenstromregelungen in den einzelnen Zonen ganz geöffnet sind. In diesen Anlagen muss deshalb im Entrauchungsbetrieb ein Schaltbefehl zum Öffnen der Drosselklappen ausgelöst werden.

In den meisten Fällen werden jedoch separate Entrauchungs-Ventilatoren eingesetzt, um den Rauch und die Wärme abzuführen (RWA). Diese Ventilatoren sind speziell für hohe Temperaturen und auch die aggressiven Rauchgase konstruiert.

8 Regeln und Steuern der Luftnachbehandlung

8.1. Allgemeines

Zweck der Luftnachbehandlung ist die Anpassung der Zuluft an die Komfortbedürfnisse einzelner Räume oder Raum-Zonen eines Gebäudes. Übergeordnetes Ziel ist dabei die Optimierung des Energieverbrauchs. Dieses Ziel wird im Wesentlichen dadurch erreicht, dass nur so viel Komfort wie nötig, und dieser nur dann geboten wird, wenn er auch genutzt, bzw. angefordert wird. Es hat beispielsweise keinen Sinn, Büroräume oder Hotelzimmer auf Komfort zu halten, wenn sich niemand darin aufhält.

Der unterschiedliche Wärmeanfall in einzelnen Räumen oder Zonen erfordert eine individuelle Anpassung der Heiz- oder Kühlleistung, entweder durch Temperatur- oder Volumenstromänderung der Zuluft. Wie diese Anpassung in den gebräuchlichen Anlagentypen steuer- und regeltechnisch erfolgen kann, wird in diesem Kapitel erklärt. Das Funktionsprinzip dieser Anlagen wird in BT_0093_DE Einführung in die HLK- und Gebäudetechnik; Kapitel 6 Lüftungs- und Klimaanlage behandelt.

8.2. Einkanal-Anlage mit Zonen-Nachbehandlung

Die in der Zentrale vorbehandelte Zuluft wird für jeden Raum oder jede Zone, entsprechend dem gewünschten Raumluftzustand, nachbehandelt. Diese Nachbehandlung kann die Funktionen Nachwärmen, Nachkühlen, Nachentfeuchten oder Nachbefeuchten beinhalten.

In Einkanal-Anlagen mit terminaler Zonen-Nachbehandlung (Fig. 8-1) erfolgt die Nachbehandlung nahe bei den Zonen. Die Stellsignale der Raum- oder Zonenregler (6) regeln direkt die Stellgeräte der Nachbehandlungs-Komponenten (3 + 4), entsprechend dem individuellen Leistungsbedarf.

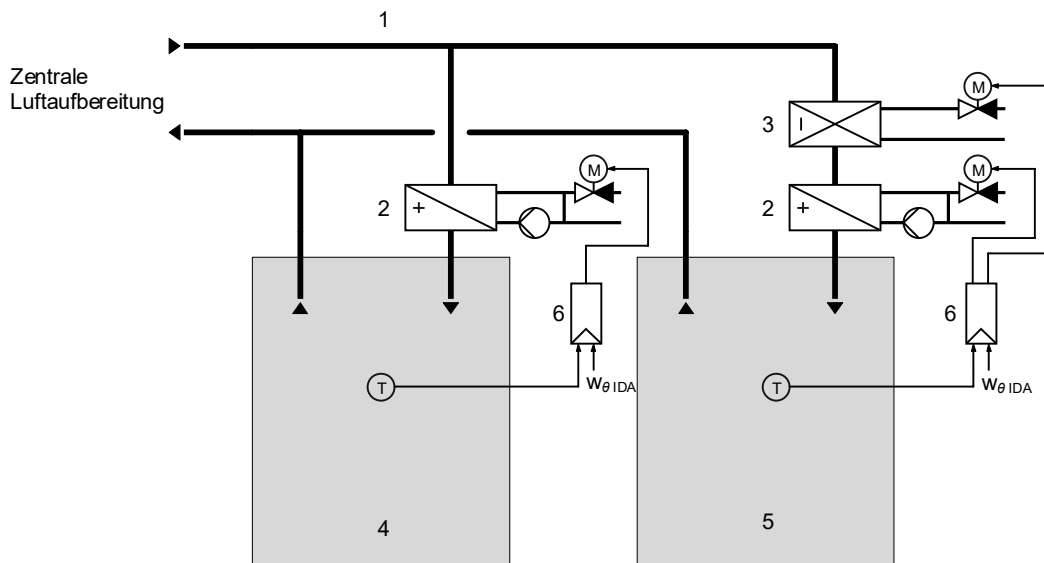


Fig. 8-1 Einkanal-Anlage mit terminaler Zonen-Nachbehandlung

- | | | | |
|---|---------------------------------------|------|---|
| 1 | Zuluftkanal | 2 | Lufterwärmer als Nachbehandlungseinheit |
| 3 | Luftkühler als Nachbehandlungseinheit | 4, 5 | Raum oder Raumzone |
| 6 | Raum- oder Zonentemperatur-Regelgerät | | |

In Einkanal-Anlagen mit zentraler Zonen-Nachbehandlung (Fig. 8-2) erfolgt die Nachbehandlung unmittelbar nach der Zentrale. Die Stellsignale der Raum- oder Zonenregler regeln direkt die Stellgeräte der Nachbehandlungs-Komponenten, entsprechend dem individuellen Leistungsbedarf. Die Stellsignalleitungen müssen allerdings von den einzelnen Räumen oder Zonen zum Schaltschrank der Luftaufbereitungszentrale geführt werden. Um Energieverschwendung zu vermeiden, sollten die gleichzeitig erforderlichen Zulufttemperaturen der einzelnen Zonen nicht zu stark voneinander abweichen.

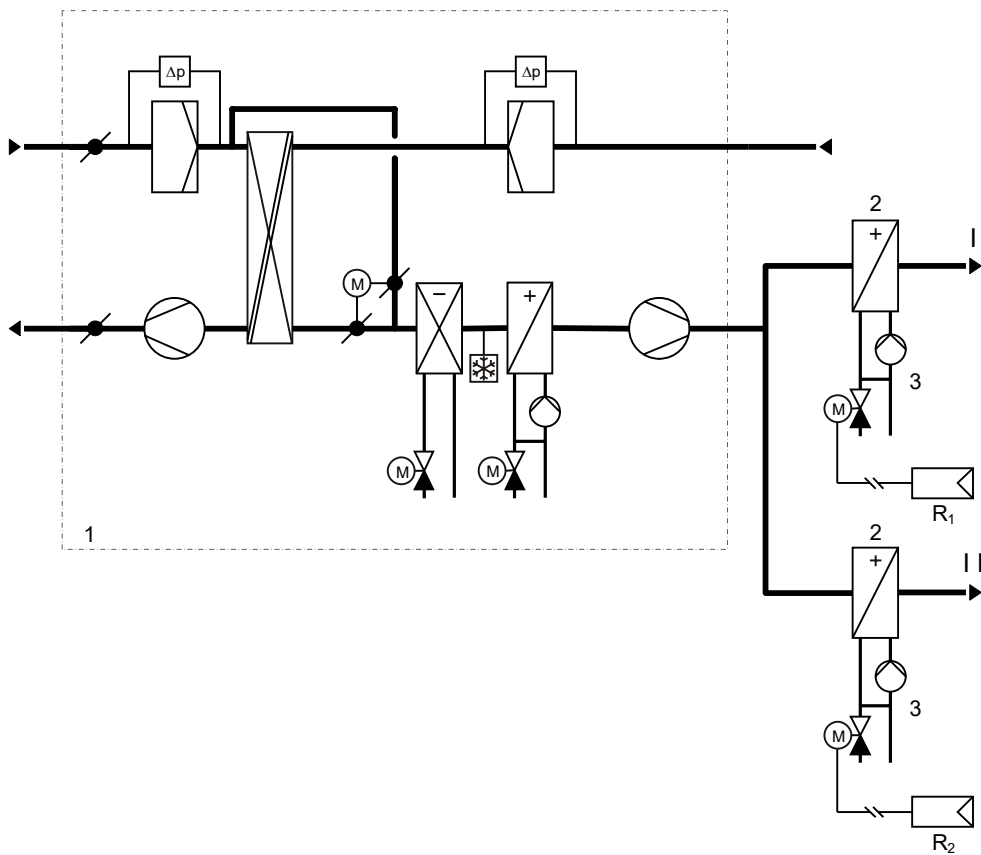


Fig. 8-2 Einkanal-Anlage mit zentraler Zonen-Nachbehandlung

- | | | | |
|-------|---------------------------|--------|------------------------|
| 1 | Zentrale Luftaufbereitung | 3 | Zonen-Heizventil |
| 2 | Zonen-Nachwärmer | R1, R2 | Zonen-Temperaturregler |
| I, II | Zonen-Zuluft | | |

8.3. Mehrzonen-Anlage mit Mehrzonenzentrale

In der Zentrale (Fig. 8-3). erfolgt zuerst die Filterung und die Vorwärmung der gesamten Zuluftmenge mittels WRG und Lufterwärmer. Nach dem Zuluftventilator wird der Zuluftstrom in zwei Teilströme aufgeteilt (Fig. 8-4). Ein Teilstrom wird durch den Nacherwärmer, der andere durch den Kühler geführt. In den anschließenden Zonenklappen (5) wird durch Mischen von Kalt- und Warmluft die individuell erforderliche Zulufttemperatur für jede Zone gemischt. Die Zonenklappen sind vertikal angeordnet und je eine Kalt- und Warmluftklappe sitzt auf der gemeinsamen Klappenachse. Die Kaltluftklappe ist gegenüber der Warmluftklappe um 90 Winkelgrade verdreht, so dass bei geschlossener Kaltluft- die Warmluftklappe ganz geöffnet ist.

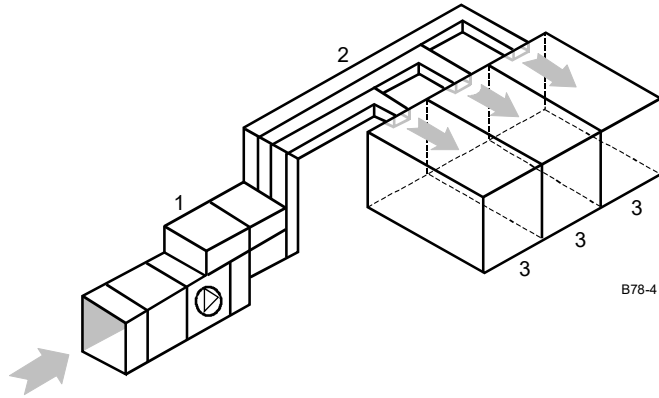


Fig. 8-3 Mehrzonen-Anlage

- | | | | |
|---|--------------------|---|--------------|
| 1 | Mehrzonenzentrale | 2 | Zuluftkanäle |
| 3 | Verschiedene Zonen | | |

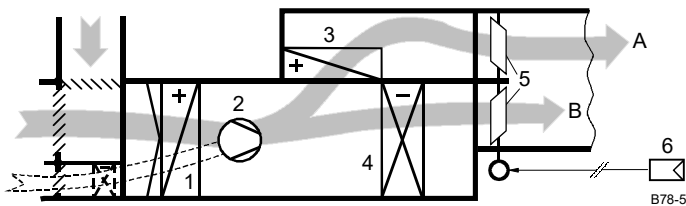


Fig. 8-4 Funktionsweise einer Mehrzonen-Anlage

- | | | | |
|---|-------------------|---|------------------------|
| 1 | Vorwärmer | 5 | Zonenklappen |
| 2 | Zuluft-Ventilator | 6 | Zonen-Temperaturregler |
| 3 | Nachwärmer | A | Warmluft |
| 4 | Luftkühler | B | Kaltluft |

Bezüglich Heiz- und Kühlenergieverbrauch (Mischungs-Verluste) ist es vorteilhaft, wenn die Zulufttemperaturen für die einzelnen Zonen nur geringe Unterschiede ($< 5 \text{ K}$) aufweisen.

8.4. Zweikanal-Anlagen

Dieses Anlagenprinzip findet man heute noch in bestehenden Anlagen. Bei Neuanlagen wird dieses Prinzip aus Gründen der mangelnden Energie-Effizienz, aber auch wegen dem Platzbedarf der doppelt geführten Luftkanäle, nicht mehr verwendet.

Die Mischung der Warm- und Kaltluft nach dem individuellen Bedarf der einzelnen Räume erfolgt in speziell dafür konstruierten Mischkästen, die in den Räumen (z.B. Zwischendecken) installiert sind. Das Mischverhältnis von warmer und kalter Luft wird durch die einzelnen Raumtemperatur-Regler geregelt.

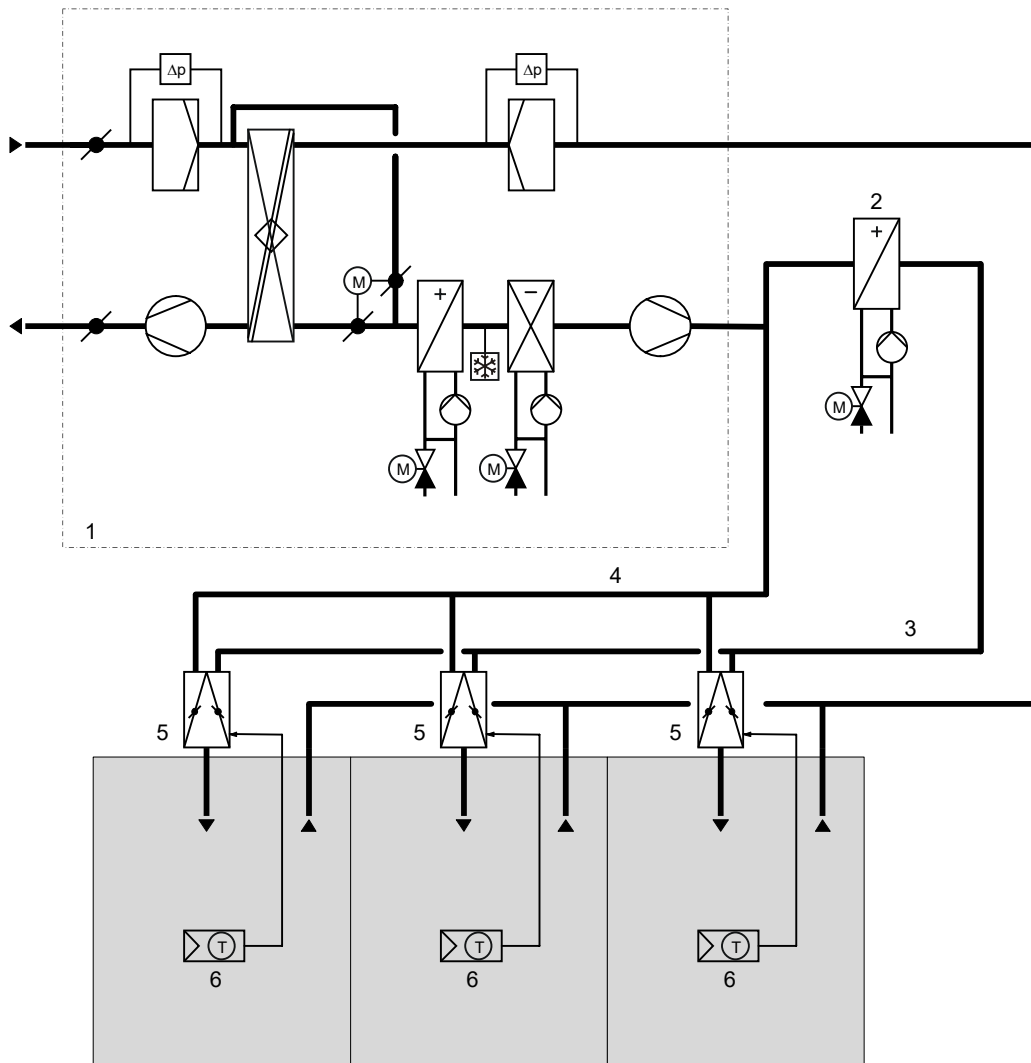


Fig. 8-5 Zweikanal Anlage mit Entfeuchtung des Gesamt-Zuluftstroms

- | | | | |
|---|---------------------------|---|------------------|
| 1 | Zentrale Luftaufbereitung | 2 | Nachwärmer |
| 3 | Warmluftkanal | 4 | Kaltluftkanal |
| 5 | Mischkästen (Mischboxen) | 6 | Einzelraumregler |

Räume mit maximaler Kühllast erhalten nur Kaltluft, solche mit maximaler Heizlast nur Warmluft und Räume mit Teillast ein Gemisch von Kalt- und Warmluft.

Die Mischkästen sind mit einer Luftmischeinrichtung (Ventile oder Klappen) ausgerüstet. Ferner enthalten sie einen mechanischen Volumenstrom-Regler, der den Zuluft-Volumenstrom, auch bei Druckschwankungen in den Zuluftkanälen, konstant hält.

8.5. VVS (Variabler Volumen-Strom) Anlagen

VVS-Anlagen (Variabler Volumen-Strom) werden eingesetzt um eine Stofflast, Feuchtelast, Kühllast und oder Heizlast bedarfsabhängig ab- oder zuzuführen. Beispielsweise kann somit die CO₂-Konzentration, die Raumfeuchte oder die Raumtemperatur (je nachdem welche Lasten mit der Lüftungsanlage abgeführt werden) durch Variieren des Zuluftvolumenstroms auf dem gewünschten Sollwert gehalten werden. Somit kann jeder Raum individuell geregelt werden. Zu beachten gilt, dass der Luftdurchlass nicht nur im Maximalfall funktioniert, sondern auch im Minimalfall, sodass es nicht zu ungewünschten Raumluftrömungen kommt.

Da im ganzen System ein variabler Volumenstrom herrscht, und dies zu Druckschwankungen führt, benötigen die Räume, welche dauernd mit demselben Luftvolumenstrom bedient werden müssen, einen KVS-Regler (Konstant-Volumen-Strom).

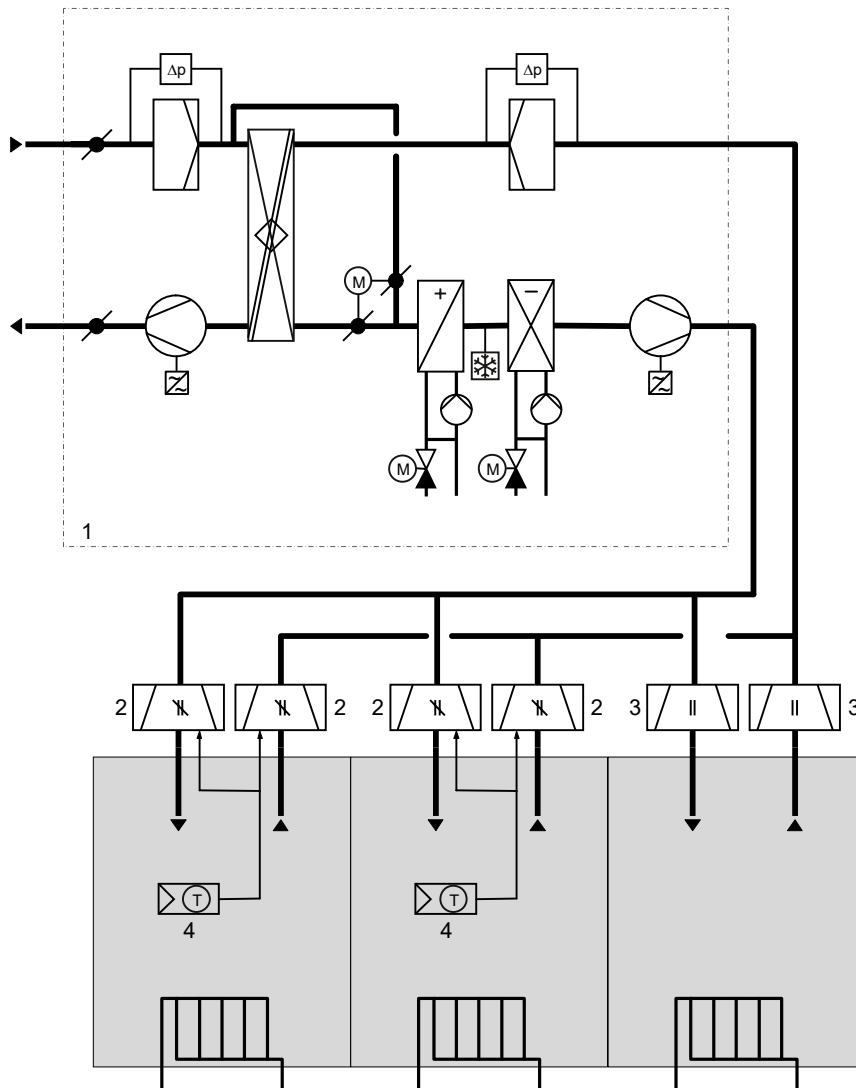


Fig. 8-6 Variable Volumenstrom-Anlage (VVS)

- | | | | |
|---|---------------------------|---|----------------------|
| 1 | Zentrale Luftaufbereitung | 3 | KVS (Zu- und Abluft) |
| 2 | VVS (Zu- und Abluft) | 4 | Einzelraumregler |

8.5.1. Einzelraum-Temperaturregelung mit VVS

Eine stabile Raumtemperatur kann nur durch eine Kaskadenregelung erreicht werden. Bei einer direkt auf den Volumenstrom-Stellantrieb wirkenden Raumtemperaturregelung, würde dieser – wegen der Trägheit der Raum-Regelstrecke – nur im AUF/ZU-Betrieb arbeiten, was große Schwankungen der Raumtemperatur und unzumutbare Zugluft-Erscheinungen zur Folge hätte.

Bei der Kaskadenregelung wird mittels des Raumtemperaturfühlers (6) und dem eingestellten Sollwert durch den Raumtemperatur-Führungsregler (5) ein benötigter Luftvolumenstrom ermittelt – meistens zwischen $\dot{V}_{\min}$ und $\dot{V}_{\max}$. Anschließend vergleicht der Regler des VVS-Regelgeräts (3) diesen mit dem momentanen Luftvolumenstrom, welcher durch z.B. ein Messkreuz (4) ermittelt wird, und gibt ein Stellsignal an den Antrieb (2) des VVS-Regelgerätes weiter.

Auch in VVS-Anlagen muss normalerweise aus hygienischen Gründen ein minimaler Außenluftanteil zugeführt werden. Deshalb wird das Stellsignal des Volumenstrom-Reglers entsprechend minimalbegrenzt.

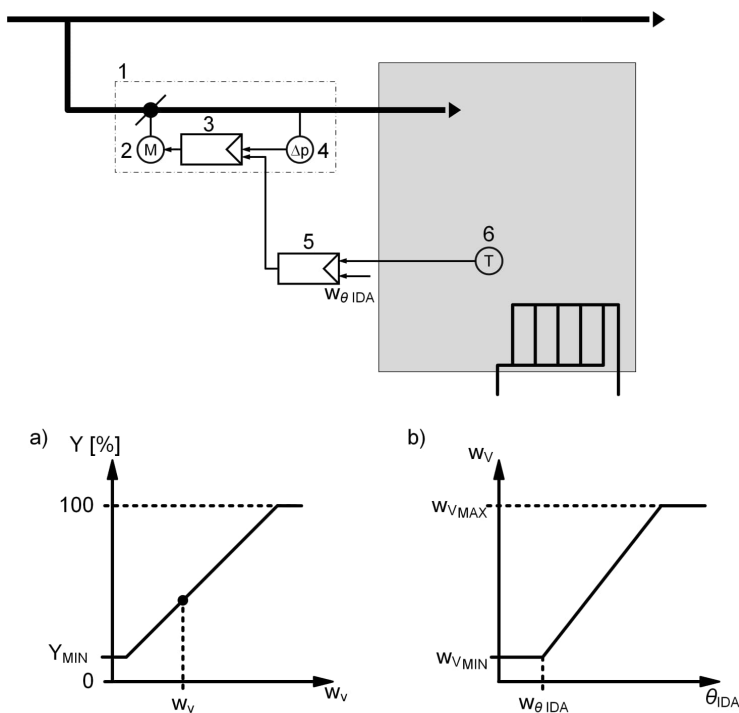


Fig. 8-7 Einzelraum-Temperaturregelung mit variablem Volumenstrom (VVS) z.B. im Kühlfall

- | | | | |
|---|----------------------------------|---|--|
| 1 | VVS-Regelgerät | 4 | Differenzdrucksensor (Messkreuz) des VVS-Regelgeräts |
| 2 | Stellantrieb des VVS-Regelgeräts | 5 | Raumtemperatur-Führungsregler |
| 3 | Regler des VVS-Regelgeräts | 6 | Raumtemperaturfühler |

- | | | | |
|-------------------------|------------------------------------|-------|---|
| a) | Wirkdiagramm des VVS-Reglers | b) | Wirkdiagramm des Raumtemperatur-Reglers |
| $w_{\theta \text{IDA}}$ | Sollwert des Raumtemperaturreglers | w_v | Sollwert des Volumenstromreglers |

VVS-Regelgerät

Die in Fig. 8-7 gezeigten Regeleinheit des Volumenstromreglers (3), Differenzdrucksensor (4) und Stellantrieb (2) werden grundsätzlich in einem VVS-Regelgerät (1) kombiniert.

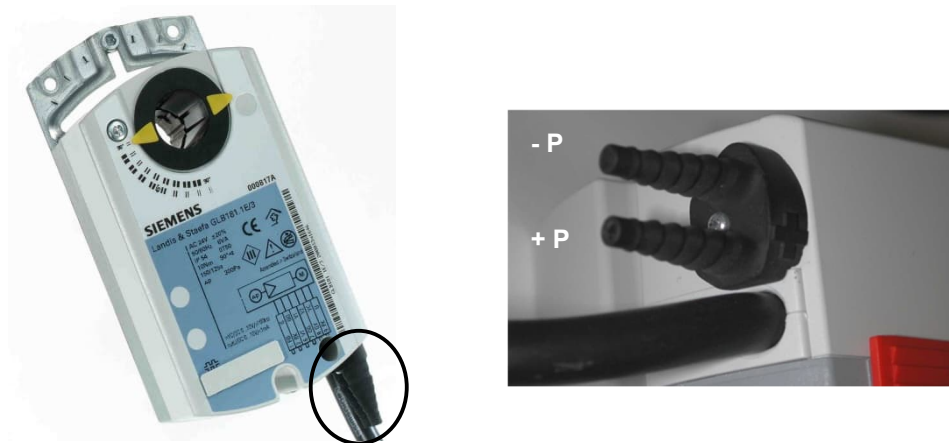


Fig. 8-8 VVS-Regelgerät mit Anschluss-Stutzen für Druckmessung (rechts: Detailansicht)

- P Anschluss für "niedrigeren" Druck der Messeinrichtung
- + P Anschluss für "höheren" Druck der Messeinrichtung

Die Messung des Volumenstroms erfolgt mit einem Membran-Drucktransmitter. Dieser wird über die Messleitung mit der Messeinrichtung (Messkreuz) der VVS-Box verbunden. Das Messsignal wird im Druckfühler direkt in ein, zum Volumenstrom proportionales, Messsignal umgewandelt.

Das VVS-Regelgerät wird üblicherweise vom VVS-Boxen-Lieferant auf die VVS-Box aufgebaut und auf die erforderliche Luftmenge (Nennvolumenstrom) eingestellt. Ebenso stellt der VVS-Boxen Lieferant den minimalen/maximalen Volumenstrom ($\dot{V}_{\min}$, $\dot{V}_{\max}$) ein.



Fig. 8-9 VVS-Box mit Messkreuz (Quelle: Trox Hesco)

8.5.2. Bedarfsgeführte Ventilator-Regelung - Fan Opti Control

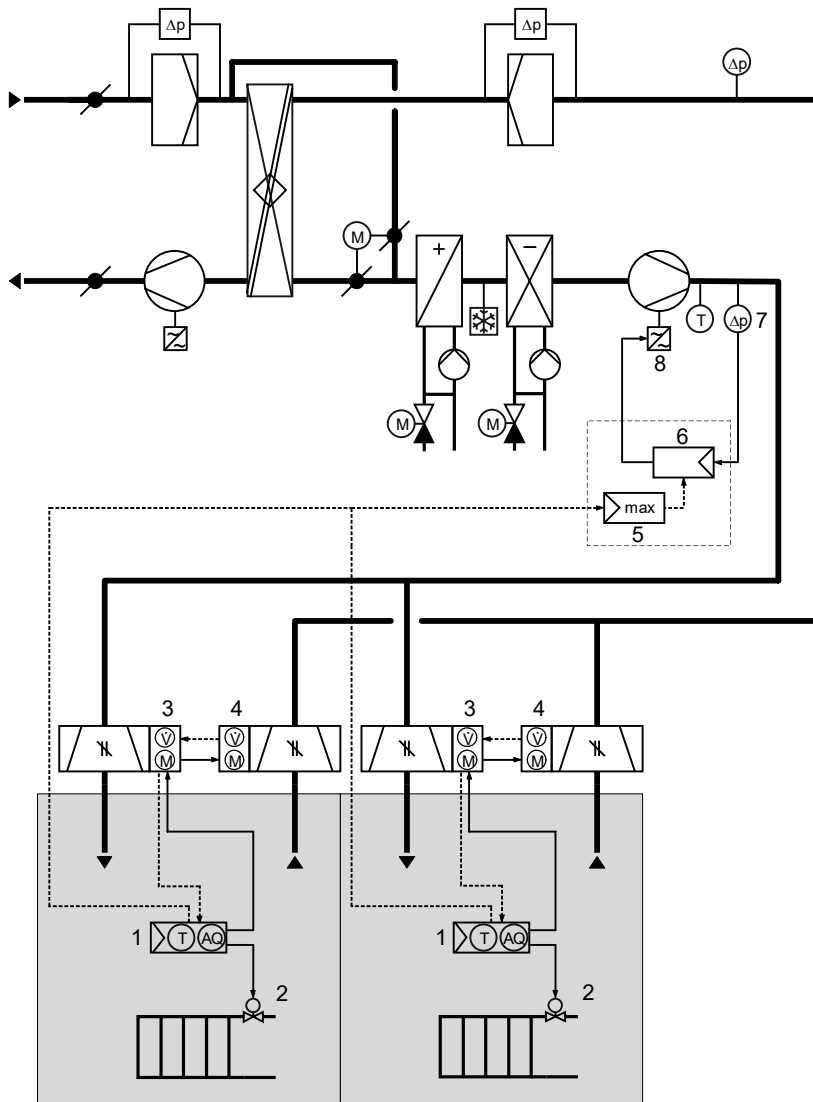


Fig. 8-10 Bedarfsgeführte Regelung des zentralen Zuluft-Volumenstroms in VVS-Anlagen

- 1 Einzelraumregler nach Temperatur (T) und Luftqualität (AQ)
- 2 Heizkörperventil
- 3 Zuluft-Volumenstromregler
- 4 Abluft Volumenstromregler
- 5 Max-Auswahl der Volumenstrom-Stellsignale
- 6 Zentraler Zuluft-Volumenstromregler
- 7 Differenzdruck Messung in der Zuluft
- 8 Frequenzumrichters des Zuluftventilators

Siemens Desigo Air Opti Control, ist nicht nur für den Lüftungsbereich einsetzbar, sondern auch zur Regelung der Versorgungstemperaturen der Heizung und Kühlung. Diese Bereiche werden in dieser Dokumentation jedoch nicht weiter erläutert, sondern der Fokus liegt auf der bedarfsgeführten Ventilator-Regelung (Fan Opti Control).

Der Einzelraumregler (1), gibt dem Zuluft-Volumenstromregler die gewünschte Luftmenge in Form eines stetigen Sollwert-Signals zwischen dem minimalen und maximalen Volumenstrom vor ($\dot{V}_{\min} \dots \dot{V}_{\max}$). Der Volumenstromregler (3) stellt die Klappe gemäß dem Sollwert-Signal ein und gibt den Befehl weiter an die Abluft Volumenstromregler (4).

Im Gebäudeautomations-System wird aus allen angeschlossenen Einzelraumreglern (1) die größte aktuelle Klappen-Stellposition ermittelt (5). Ist dieser Wert z.B. kleiner als 90%, dann reduziert der zentrale Zuluft-Volumenstromregler (6) den Sollwert für den Druck im Kanalnetz (7) und regelt auf

diesen mit Hilfe eines Frequenzumrichters (8). Dadurch sinkt der Druck im Zuluftkanal und die Einzelraumregler müssen ihr Stellsignal erhöhen, bis die größte Klappen-Stellposition dem Sollwert (z.B. 90%) der Max-Auswahl-Funktion (5) entspricht.

Dadurch wird vermieden, dass der Zuluftventilator einen unnötig hohen Druck aufbaut, welcher durch die Volumenstromregler in den einzelnen Räumen abgedrosselt und damit vernichtet wird.

Dies führt zu einer erheblichen Reduktion des Stromverbrauchs für den Ventilator im Teillast-Betrieb (vgl. Proportionalitätsgesetze).

Die Regelung des Abluftventilators funktioniert nach demselben Prinzip.

8.5.3. Konstante statische Druckregelung in den Luft-Kanälen

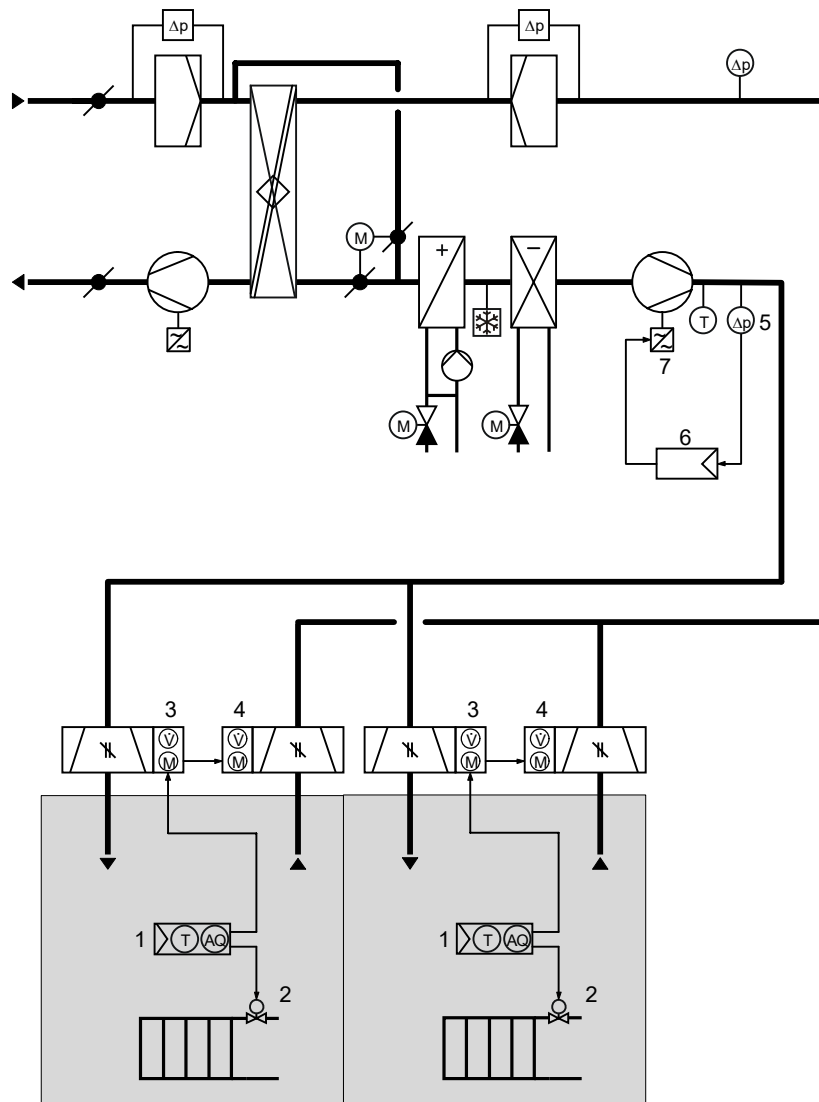


Fig. 8-11 Konstante statische Druckregelung in den Luftkanälen von VVS-Anlagen

- 1 Einzelraumregler nach Temperatur (T) und Luftqualität (AQ)
- 2 Heizkörperventil
- 3 Zuluft-Volumenstromregler
- 4 Abluft Volumenstromregler
- 5 Differenzdruckfühler
- 6 Zentraler Zuluftkanal-Druckregler
- 7 Frequenzumrichter des Zuluftventilators

Die Drosselung der Luftauslässe durch die Einzelraum- oder Zonenregler bewirkt, bei konstanter Drehzahl des Ventilators, einen Anstieg des statischen Druckes im Verteilkanal. Dieser Druckanstieg entspricht der Steilheit der Ventilator-Kennlinie und kann durch eine Regelung des statischen Druckes (Fig. 8-11) im betreffenden Verteilkanal verhindert werden. Der effizienteste Stelleingriff des Druckreglers ist in diesem Falle die Drehzahlanpassung der Ventilatoren in der zentralen Luftaufbereitungs-Anlage.

Die Platzierung der Kanal-Druckfühler muss besonders gut geplant werden. Sie sollen an einem Ort eingesetzt werden, wo 50 ... 70 % des betreffenden Kanalwiderstandes, bei Vollast-Luftmenge, erfasst werden kann. Die Differenzdruckfühler (5) übermitteln dem Druckregler (6) den Messwert. Der Regler vergleicht diesen mit dem eingestellten Sollwert und ändert bei Abweichung die Drehzahl des Zuluftventilators. Die Drehzahl des Abluftventilators kann, wenn das Abluftkanalnetz eine ähnliche Druckabfall-Kennlinie aufweist wie das Zuluftkanalnetz, mit einer Nachlaufsteuerung synchron verändert werden. Wenn jedoch der Druckabfall nicht ähnlich ist, dann muss anstelle der Drehzahl-Synchronisation, eine separate Abluft-Volumenstrom-Regelung eingesetzt werden.

Vergleich konstante statische Druckregelung und bedarfsgeführte Fan Opti Control

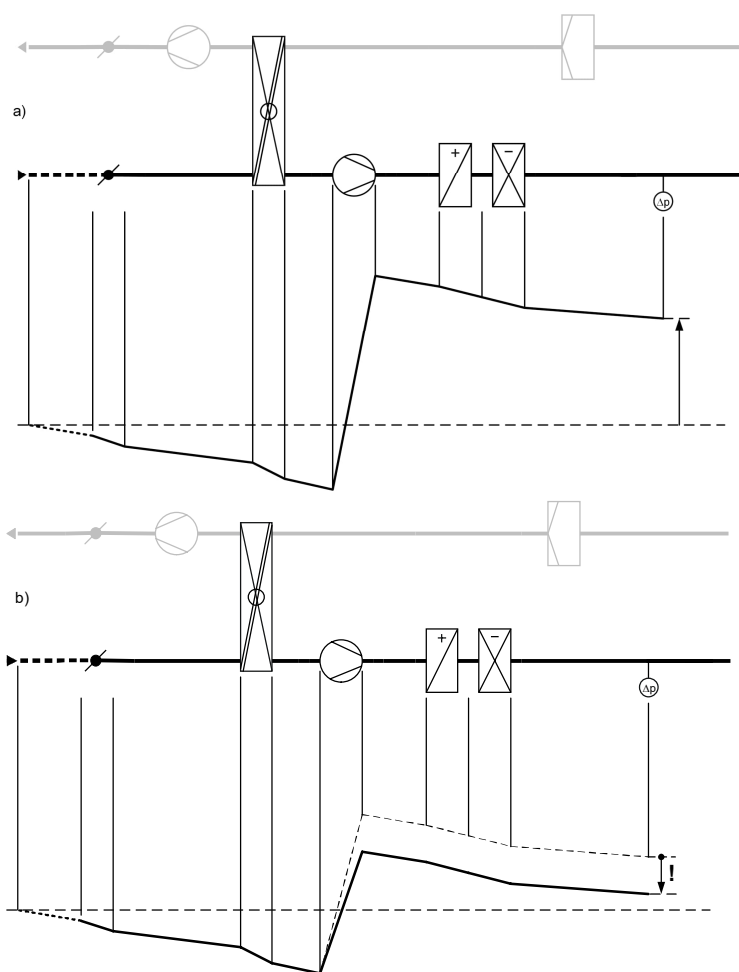


Fig. 8-12 Statische Druckregelung in den Luftkanälen von VVS-Anlagen

a) Konstante statische Druckregelung b) Bedarfsgeführte Druckregelung mit Fan Opti Control

Der Unterschied zwischen der statischen Druckregelung und der Fan Opti Control Strategie ist deutlich zu sehen. Der Druck, welcher bei der statischen Druckregelung erzeugt wird, wird gar nicht benötigt. Durch die Regelung mit Fan Opti Control kann somit substantiell elektrische Energie eingespart werden – je nach Anlagesituation bis zu 50% weniger Stromverbrauch über ein Betriebsjahr betrachtet.

8.6. Wasseranschlusssysteme

Bei allen Wärmeübertrager bei den es möglich ist zu Heizen und zu Kühlen gibt es die Möglichkeit, dies mit einem Zwei- oder Vierleistersystem zu realisieren.

8.6.1. Zweileistersystem

Zweileistersysteme kommen meistens zum Einsatz, wenn nur gekühlt oder nur geheizt wird. Wenn jedoch mit dem gleichen System gekühlt und geheizt wird, muss das System umschaltbar sein („Change-over-System“). Der große Nachteil bei diesem System ist die große Trägheit zwischen dem Heiz- und Kühlbetrieb. Ein direktes Umschalten hätte zur Folge, dass die Rücklauftemperaturen im Heizkessel zu tief und in der Kältemaschine zu hoch wären und es somit zu Betriebsstörungen führen würde. Deshalb muss der Heizkessel respektive die Kältemaschine zeitverzögert zugeschaltet werden.

Das heißt, Change-over-Zweileistersysteme sind nur dann geeignet, wenn alle angeschlossenen Räume gleichzeitig einen Heiz- oder Kühlbedarf haben und der Wechsel zwischen Heizen und Kühlen nur selten notwendig ist.

8.6.2. Vierleistersystem

Jedes Abgabesystem wird im Vierleistersystem in getrennten Kreisläufen an das Warmwasser- und Kaltwassernetz angeschlossen. Dabei wird je ein differenzdruckunabhängiges Regelventil (PICV) im Vorlauf, sowie ein 3 Weg-Kugelhahn oder je ein On-off-Ventil im Rücklauf benötigt. Der große Vorteil dieses System ist es, dass jede Zone separat geregelt werden kann. Dabei sollte aber beachtet werden, dass gerade in der Übergangszeit (Frühjahr, Herbst) sowohl die Wärme- wie auch die Kältebereitstellung in Betrieb ist.

8.7. Ventilator-Konvektor-Anlagen

Ventilator-Konvektor-Anlagen sind ideale Luftheiz- und Luftkühlanlagen für z.B. Hotelzimmer. Im Heizbetrieb liefert eine außentemperaturgeführte Zentralheizung (Fußbodenheizung) die Grundlast, d.h. die Raumtemperatur wird im Sparbetrieb auf ca. 16 °C gehalten. Bei Umschaltung auf Komfortbetrieb erreicht das Ventilator-Konvektor-Gerät innerhalb weniger Minuten die gewünschte Komforttemperatur. In allen anderen Räumen bleiben die Ventilator-Konvektor-Geräte auf Sparbetrieb bzw. ausgeschaltet.

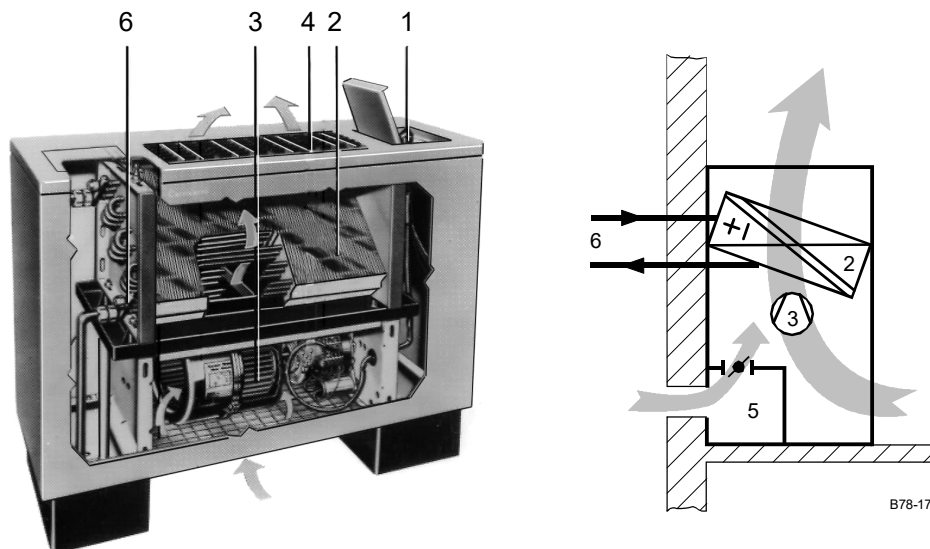


Fig. 8-13 a) Ventilator-Konvektor-Gerät mit seinen Komponenten

b) Ventilator-Konvektor-Gerät mit Außenluftkasten

- 1 Steuer- und Regelorgane
- 3 Ventilator
- 5 Außenluftkasten mit Luftklappe

- 2 Rippenrohr-Wärmeübertrager
- 4 Verstellbares Zuluftgitter
- 6 Warm- oder Kaltwasser-Kreislauf (Zweileiter-System)

Das Ventilator-Konvektor-Gerät (Fig. 8-13) wird an eine geeignete Wand des Raumes montiert und an das Kalt- und Warmwassernetz, sowie an das elektrische Stromversorgungsnetz angeschlossen. Wird das Gerät an einer Außenwand platziert, kann durch eine Öffnung mit Hand-Einstellklappe oder auch einer geregelten Klappe (5), ein kleiner Außenluft-Anteil mitangesaugt und der Umluft beigemischt werden.

Grundsätzlich wird die im Raum oder in der entsprechenden Raumzone anfallende Heiz- oder Kühllast durch den Warm- und Kaltwasserkreislauf, im Zwei- oder Vierleitersystem, abgedeckt. Das Zweileitersystem kann nur zentral auf Heiz- oder Kühlbetrieb geschaltet werden („Change-over-System“), während mit dem Vierleitersystem in jedem Raum individuell geheizt oder gekühlt werden kann. Je nach Bauart der Ventilator-Konvektor-Geräte, stehen für die Raumtemperatur-Regelung luft- oder wasserseitige Stellgeräte zu Verfügung. Fig. 8-14 zeigt die Regelung an einem Zweileiter-Ventilator-Konvektor mit wasserseitigem Stellgerät.

Der Raumtemperaturregler (2) vergleicht die vom Fühler (1) gemessene Raumtemperatur mit dem eingestellten Sollwert. Bei einer Abweichung bewirkt er das Verstellen des Ventils (3). Je nachdem, ob im Vorlauf Warm- oder Kaltwasser zirkuliert, schaltet der „Change over“-Thermostat (4) den Regler auf Wirksinn „Heizen“ oder „Kühlen“. Steht der Regler auf Wirksinn „Heizen“, öffnet er das Ventil bei unter den Sollwert sinkender Raumtemperatur, steht er auf Wirksinn „Kühlen“, öffnet er das Ventil bei über den Sollwert steigender Raumtemperatur (vgl. Wirkdiagramm in Fig. 8-14). Es ist dabei möglich und sinnvoll, den Kühlsollwert um 3...4 K höher als den Heizsollwert einzustellen (Totzonenregelung siehe Kapitel 1.6).

Raumgeräte bieten auch die Möglichkeit, manuell oder automatisch (Präsenzsteuerung) zwischen „Comfort“- und „Economy“-Betrieb umzuschalten. Im „Economy“-Betrieb wird auf einen ca. 5 K tieferen Sollwert geheizt und das Stellsignal „Kühlen“ gesperrt. Außerdem wird bei geschlossenem Ventil der Ventilator ausgeschaltet.

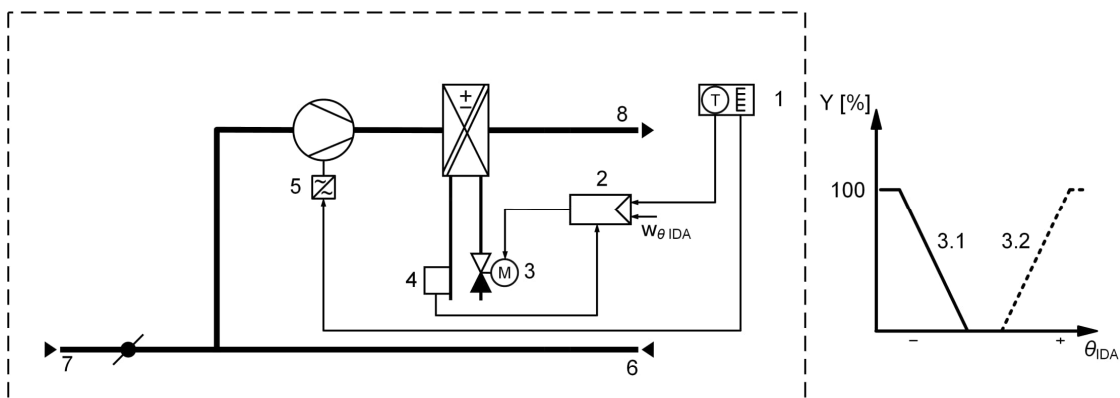


Fig. 8-14 Wasserseitige Regelung und Steuerung eines Ventilator-Konvektor-Gerätes (Zweileitersystem)
Aufbau (links), Wirkdiagramm (rechts)

- | | | | |
|-----|---|-----|-----------------------------------|
| 1 | Raumgerät mit Temperaturfühler und Wahlschalter für Ventilator-drehzahl | 3 | Ventil zum Lufterwärmer / -kühler |
| 2 | Raumtemperaturregler | 3.1 | Ventil im Lufterhitzer Modus |
| 3.1 | Ventil im Lufterhitzer Modus | 3.2 | Ventil im Luftkühler Modus |
| 4 | „Change-over“-Thermostat | 5 | Ventilator-Drehzahlsteuergerät |
| 6 | Umluft | 7 | Außenluft |
| 8 | Zuluft | | |

In größeren Gebäuden (z.B. Hotels) werden die Ventilator-Konvektoren mit digitalen, kommunikationsfähigen Regel- und Steuergeräten betrieben, welche von einem Gebäudeautomations-System über ein kommunikatives Netzwerk (Bussystem) geführt und überwacht werden.

Dieses System übernimmt dann folgende Funktionen:

- Vorgabe der Normal-Sollwerte für den „Comfort“- und „Economy“-Betrieb
- Aufschaltung von Sollwert-Führungseinflüssen
- Vorgabe sämtlicher Regelparameter
- Sperrung des „Comfort“-Betriebs
- Überwachung der Regel- und Steuerfunktionen

8.8. Induktionsanlagen

Anstelle eines Ventilators enthalten die Induktionsgeräte eine geräuschabsorbierende Primärluft-Kammer mit aufgesetzten Düsen. Die Primärluft wird mit hoher Geschwindigkeit in die Staukammer (4) eingeblasen, wo der dynamische Druck in statischen Druck umgewandelt wird. Dieser statische Druck bewirkt dann, dass sich die Primärluft gleichmäßig auf alle Düsen verteilt und mit hoher Geschwindigkeit in die Mischkammer ausgeblasen wird. Durch die Injektor-Wirkung dieser Luftströme entsteht ein Unterdruck zur Raumluft, wodurch diese als Sekundärluft über den Rippenrohr-Wärmeübertrager (6) angesaugt (induziert) wird.

Der Wärmeübertrager wird, je nach Bedarf, mit Warm- oder Kaltwasser, versorgt. Die induzierte Sekundärluft (2) nimmt im Wärmeübertrager (6) die erforderliche Sekundär-Heiz- oder Kühlleistung auf und vermischt sich anschließend mit der Primärluft (1). Das Gemisch von Sekundär- und Primärluft wird schließlich in den Raum ausgeblasen.

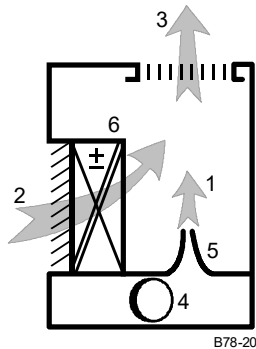


Fig. 8-15 Prinzipieller Aufbau eines Induktionsgerätes (Zweileitersystem)

1	Primärluft (aufbereitete Außenluft)	2	Sekundärluft (Raumluft)
3	Zuluft	4	Staukammer mit Primärluft-Anschluss
5	Induktionsdüsen	6	Rippenrohr-Wärmeübertrager

Wie bei der Ventilator-Konvektor-Anlage wird die im Raum oder in der entsprechenden Raumzone anfallende Heiz- oder Kühllast grundsätzlich durch den Wasserkreislauf, im Zwei- oder Vierleitersystem übernommen. Die Primärluft kann jedoch eine zusätzliche Be- oder Entfeuchtung übernehmen. Um die Raumtemperaturregelung nicht zu stören, wird die Primärluft in der Regel mit einer konstanten Temperatur, die normalerweise dem Heiz-Sollwert der Raumtemperatur entspricht, eingeblasen.

8.9. Sollwertführung der Vorlauftemperaturen

In Fan-Coil- oder Induktionsanlagen, in denen die Raumklimageräte mit zentral aufbereitetem Warm- und Kaltwasser versorgt werden, kann es sinnvoll sein, die Vorlauftemperaturen dem Lastzustand dieser Luftheiz- und Luftkühlgeräte anzupassen. Als Führungsgröße können dabei die aktuellen Stellsignale der Raumtemperaturregler dienen. Voraussetzung für dieses Regelkonzept (Fig. 8-16) ist die Kommunikation der Einzelraum-Regler mit einem Gebäudeautomations-System über ein Kommunikationsnetzwerk (z.B. BACnet, KNX, ...).

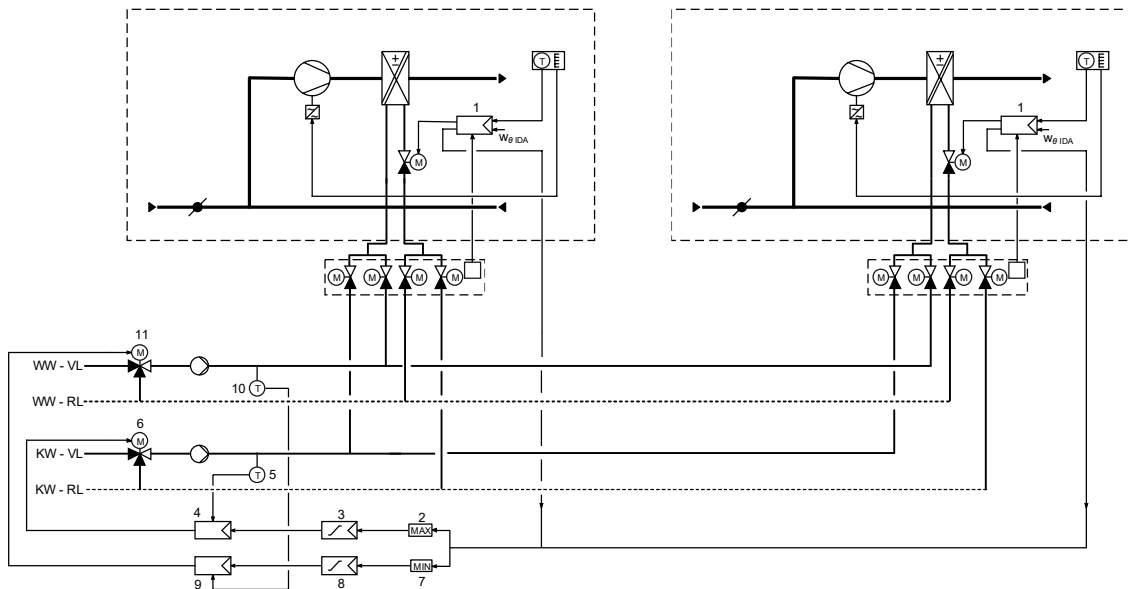


Fig. 8-16 Führung der Vorlauftemperaturen für Ventilator-Konvektor- und Induktions-Anlagen

- | | | |
|-------|---|-----------------------------|
| 1 | Regelgerät des Ventilator-Konvektors | |
| 2 / 7 | Maximal- oder Mittelwertbildung der Raumtemperatur-Stellsignale | |
| 3 / 8 | Sollwert-Führungsgeber für die Vorlauftemperatur | |
| 4 | Kaltwasser-Temperaturregler | 9 |
| 5 | Kaltwasser-Temperaturfühler | 10 |
| 6 | Kaltwasser-Stellgerät | 11 |
| | | Warmwasser-Temperaturregler |
| | | Warmwasser-Temperaturfühler |
| | | Warmwasser-Stellgerät |

Das Gebäudeautomations-System wählt aus den angeschlossenen Einzelraumreglern (1) das größte aktuelle Stellsignal (2 oder 7, Kühlen oder Heizen) aus und übermittelt dieses dem nachgeschalteten Sollwert-Führungsgeber (3 und 8).

Wird das größte Stellsignal mit Wirksinn „Heizen“ kleiner als der eingestellte Führungswert, dann beginnt die stetige Absenkung des Sollwertes der Warmwasser-Vorlauftemperatur, entsprechend dem programmierten Führungseinfluss. Wird das größte Stellsignal mit Wirksinn „Kühlen“ kleiner als der eingestellte Führungswert, dann beginnt die stetige Anhebung des Sollwertes der Kaltwasser-Vorlauftemperatur, entsprechend dem programmierten Führungseinfluss.

Je nach unterschiedlichem Lastverhalten der einzelnen Räume könnte, anstelle des Maximal-Stellsignals, auch der Mittelwert aller Stellsignale als Führungsgröße dienen. Des Weiteren, könnte auch über die Außentemperatur eine Führungsgröße erstellt werden. Jedoch ist gebäudespezifisch, welche Führungsgröße Sinn ergibt.

8.10. Einzelraum-Kompakt-Klimageräte

Einzelraum-Kompakt-Klimageräte dienen zur Kühlung (und teilweisen Entfeuchtung) oder Erwärmung der Raumluft. Sie werden vom Hersteller mit den erforderlichen Regel-, Steuer- und Sicherheitsorganen ausgerüstet und als "Stecker- oder anschlussfertige" Geräte geliefert. Zu dieser Gruppe gehören:

- Fenster-Klimageräte
- Truhen-Klimageräte
- Schrank-Klimageräte
- Split-Klimageräte

8.10.1. Fenster-Klimageräte

Bei diesen Geräten lässt sich die Ventilator Drehzahl sowie die Heiz- und Kühlleistung zwischen einer Minimal- und Maximalstufe manuell einstellen. Bei Fensterklimageräten, die Kühlung und Heizung ermöglichen (Wärmepumpengeräte), erfolgt die Umschaltung von Kühl- auf Heizbetrieb durch Umkehr des Kältemittelflusses mittels eines Vierwegventils. Dadurch werden die Funktionen zwischen Verdampfer und Kondensator vertauscht.

Die Thermodynamik des Kältekreislaufs ist in BT_0099_DE Kältetechnik beschrieben.

8.10.2. Truhenklimageräte

Truhenklimageräte erfüllen die gleichen Funktionen wie die Fensterklimageräte und sind auch mit den gleichen Regel- und Steuergeräten ausgerüstet.

8.10.3. Split-Klimageräte

Der funktionelle Aufbau eines Split-Klimagerätes (Fig. 8-17) besteht prinzipiell aus einem Kältemittel-Kreisprozess mit Kompressor (3), luftgekühlten Kondensator (4), Expansionsventil (5) und Direktverdampfer-Luftkühler (2). Als Zusatzkomponente im Umluftgerät könnte noch ein Lufterwärmer als Nachwärmer eingebaut werden, falls der Luftkühler auch zur Luftentfeuchtung dienen muss.

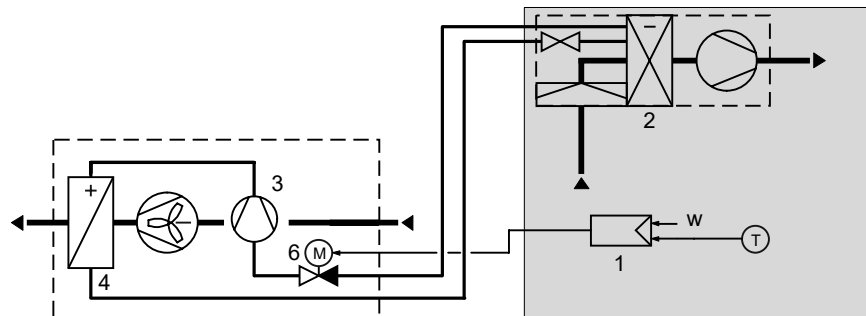


Fig. 8-17 Aufbau eines Split-Klimagerätes

1	Raumtemperatur-Regelgerät	2	Luftkühler (Verdampfer)
3	Kompressor	4	Kondensator (luftgekühlt)
5	Expansionsventil	6	Saugdrosselventil

Die Regelung der Raumtemperatur (1) erfolgt durch Eingriff in den Kältemittelkreislauf mittels Saugdrosselventil. Damit kann die Kühlleistung zwischen ca. 40 % bis 100 % stetig, und unterhalb 40 % durch EIN/AUS-Schaltung dem Bedarf angepasst werden. Ist noch ein Elektro-Lufterwärmer eingebaut, dann muss eine zusätzliche Heizsequenz des Reglers über einen Stufenschalter oder ein Stromventil dessen Leistung steuern.

8.11. VRV- VRF

Bei einem VRF-(Variable Refrigerant Flow = Variabler Kältemittelstrom) oder VRV-(Variable Refrigerant Volume = Variables Kältemittelvolumen) Multi-Split-System handelt es sich weitgehend um eine Weiterentwicklung von einem konventionellen Split-Klimasystem. Das Grundprinzip bleibt gleich wie bei einem einfachen Multi-Split-Klimasystem. Der Unterschied liegt darin, dass im Gegensatz zum Split-Klimasystem, bei welchem jede Inneneinheit mit einer eigenen Außeneinheit verbunden ist, beim VRF-System nur noch 1 Außeneinheit für mehrere (bis zu ca. 50) Inneneinheiten benötigt wird. Dadurch kann bei geringem Platzbedarf verhältnismäßig große Fläche klimatisiert werden.

Eine weitere Eigenschaft ist es, dass die Anlage modular erweitert werden kann. Weiter kann mit einem drei Leiter System sichergestellt werden, dass jeder Raum separat klimatisiert (d.h. gekühlt oder geheizt) werden kann.

Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit einer Einbindung ins Gebäudeautomations-System.

Smart Infrastructure verbindet auf intelligente Weise Energiesysteme, Gebäude und Industrien und verbessert die Art und Weise, wie wir leben und arbeiten, um Effizienz und Nachhaltigkeit deutlich zu steigern.

Gemeinsam mit unseren Kunden und Partnern schaffen wir ein Ökosystem, das sowohl intuitiv auf die Bedürfnisse der Menschen reagiert als auch Kunden dabei unterstützt, ihre Geschäftsziele zu erreichen.

Ein Ökosystem, das unseren Kunden hilft zu wachsen, das den Fortschritt von Gemeinschaften fördert und eine nachhaltige Entwicklung begünstigt, um unseren Planeten für die nächste Generation zu schützen.

Creating environments that care.

[siemens.com/smart-infrastructure](https://www.siemens.com/smart-infrastructure)

Herausgeber
Siemens Schweiz AG

Smart Infrastructure
Global Headquarters
Theilerstrasse 1a
6300 Zug
Schweiz
Tel. +41 58 724 24 24

Siemens AG
Smart Infrastructure
Lyoner Straße 27
60528 Frankfurt am Main
Deutschland
Tel. +49 69 797-0

Siemens Schweiz AG
Smart Infrastructure
Sennweidstrasse 47
6312 Steinhausen
Schweiz
Tel. +41 585 579 200

Siemens AG Österreich
Smart Infrastructure
Siemensstraße 90
1210 Wien
Österreich
Tel. +43 (51707) 0

Siemens S.A.
Smart Infrastructure
21, rue Edmond Reuter
5326 Contern
Luxembourg
Tél. +352 43843 900

Schutzgebühr € 50

Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Die Informationen in diesem Dokument enthalten lediglich allgemeine Beschreibungen bzw. Leistungsmerkmale, welche im konkreten Anwendungsfall nicht immer in der beschriebenen Form zutreffen bzw. welche sich durch Weiterentwicklung der Produkte ändern können. Die gewünschten Leistungsmerkmale sind nur dann verbindlich, wenn sie bei Vertragsschluss ausdrücklich vereinbart werden.

© Siemens 10/2022