

2.4 Luftaufbereitung

2.4.1 Einführende Beispiele

Die Luftaufbereitung wird oft als rein technisches und nicht leicht verständliches Problem gesehen, obwohl Prozesse der Luftaufbereitung tagtäglich in der Natur ablaufen, ohne dass man sich immer darüber im Klaren ist. Einige Beispiele aus [51] sollen dies verdeutlichen.

Beispiel 2.4-1:

Steigen in ein Auto mehrere Personen ein, so erhöht sich durch die Atemluft sehr schnell die absolute Luftfeuchte. Deshalb kommt es bei kühlen Außenluftzuständen oft vor, dass es an den inneren Oberflächen der Autoscheiben zu einer Taupunktunterschreitung kommt. Eine Kompensation ist im Allgemeinen nur durch Lüften mit kühlerer oder gekühlter Außenluft zweckmäßig.

Beispiel 2.4-2:

Obwohl alle Oberflächen in einem Bad nahezu die gleiche Temperatur wie die Raumluft haben, so beschlagen beim Duschen mit warmem Wasser die Flächen. Auch hier erhöht sich die absolute Feuchte der Luft und die Oberflächentemperatur liegt unter der Taupunkttemperatur des Luftzustands des Raums.

Beispiel 2.4-3:

Im Herbst ist am Morgen oft auf vielen Flächen Tau oder gar Reif zu beobachten. Dieser entsteht dadurch, dass durch nächtliche Abstrahlung der Oberflächen gegen den „kalten“ Himmel sich die Oberflächentemperatur abkühlt und unter die Taupunkttemperatur absinkt.

Beispiel 2.4-4:

Im Sommer erscheint der Aufenthalt in der Nähe von bewegten Wasserflächen oder Springbrunnen als behaglich und kühl. Durch die Verdunstung von Wasser wird der Luft Wärme entzogen, d. h., sie wird gekühlt, aber auch gleichzeitig befeuchtet.

Beispiel 2.4-5:

Das Mischen von zwei Luftströmen mit unterschiedlichen Zuständen erfolgt nahezu ständig in der Natur. Wird im Winter die feuchte und warme Atemluft ausgeatmet, so bildet sich „Hauch“, d. h. Nebel. Die kleine Luftmenge „Atemluft“ vermischt sich mit der großen Luftmenge „kalte trockene Außenluft“. Der Mischpunkt der beiden Mengen liegt im h,x -Diagramm „rechts“ neben der Sättigungslinie, d. h. im sogenannten Nebelgebiet.

Beispiel 2.4-6:

Beim Erwärmen von Luft verringert sich die Dichte, d. h., die warme Luft steigt auf. Die relative Feuchte sinkt, aber die absolute Feuchte bleibt gleich. Durch den Menschen wird dies als „trockene“ Luft empfunden.

Beispiel 2.4-7:

Am Beispiel der Nase kann die Wärmerückgewinnung und die Taupunktunterschreitung demonstriert werden. Die Nase ist ein regenerativer Wärmerückgewinner (Wechselspeicher). Die Nasenscheidewand und die Nasenflügel stellen die **Speichermasse** dar. Beim Einatmen der trockenen kalten Luft durch die Nase erwärmt sich die Luft an der Speichermasse, letztere wiederum kühlt sich ab. Beim Ausatmen der feuchten warmen Luft erwärmt sich die Speichermasse, die Luft kühlt sich ab. Ist die Oberflächen-temperatur der Speichermasse niedriger als die Taupunkttemperatur der Atemluft, so bildet sich Tauwasser (d. h., die Nase tropft, ohne dass man Schnupfen hat).

2.4.2 Aufbereitungsformen

Zustandsänderungen im Raum (Abbildungen 2.4-1 und 2.4-2)

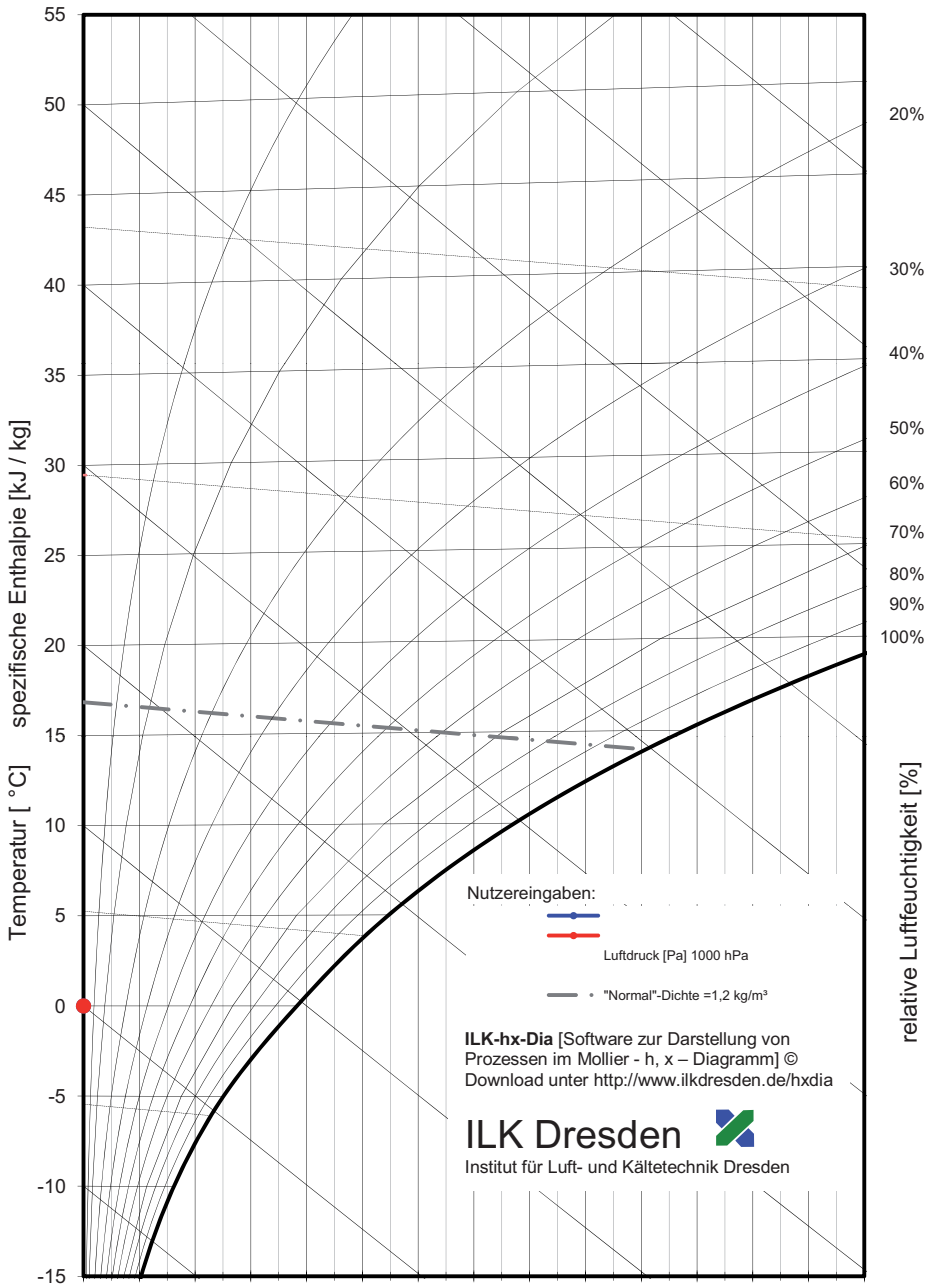
Für die Gewährleistung der geforderten Raumklimaparameter ist es notwendig, den Luftvolumenstrom q_V in Abhängigkeit von der im Raum vorhandenen Wärme- und/oder Stofflast aufzubereiten. Der Zuluftvolumenstrom $q_{V,ZUL} \equiv q_{V,SUP}$ ist so aufbereitet dem Raum zuzuführen, dass

- die Raumparameter (im Allgemeinen: Raumlufttemperatur θ_a , Raumluftfeuchte (x_a bzw. $\varphi_{D,a}$)) gewährleistet werden **und gleichzeitig**
- die entsprechende Wärme- und/oder Stofflast im Raum

kompensiert wird.

Die Veränderung des Luftzustands im Raum infolge der Belastung (Zustandsverlauf) wird zweckmäßigerweise schematisch im h,x -Diagramm nach *Mollier* dargestellt. Die Zustandsänderung wird durch das Verhältnis $\Delta\theta/\Delta x$ dargestellt, welches im Wertebereich von $+\infty$ bis $-\infty$ liegen kann.

Im Allgemeinen ist für Dimensionierung der Aufbereitungsgeräte der Auslegungsfall (Heizfall = winterliche Bedingungen; Kühlfall = sommerliche Bedingungen) von Interesse (Abbildungen 2.4-1 und 2.4-2). Die Bedingungen sind u. a. in VDI 2078 und DIN EN 12831-1 determiniert bzw. **müssen** mit dem Auftraggeber **schriftlich** vereinbart werden. Dies betrifft sowohl die Außenklimabedingungen als auch die Nutzungs- bzw. Behaglichkeitsbedingungen im Raum, wobei die technischen Regeln wie z. B. DIN EN 16798-3, DIN EN 15251 und DIN EN 12831-1 im Allgemeinen nur Standardwerte bzw. Richtwerte vorgeben.



Um den erforderlichen Zuluftzustand zu erreichen, kommen die Aufbereitungsformen „Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten“ und die Prozesse „Mischen und Energierückgewinnung“ zur Anwendung. Die Darstellung der Aufbereitung und der Prozesse kann zweckmäßigerweise im h,x -Diagramm nach *Mollier* vorgenommen werden.

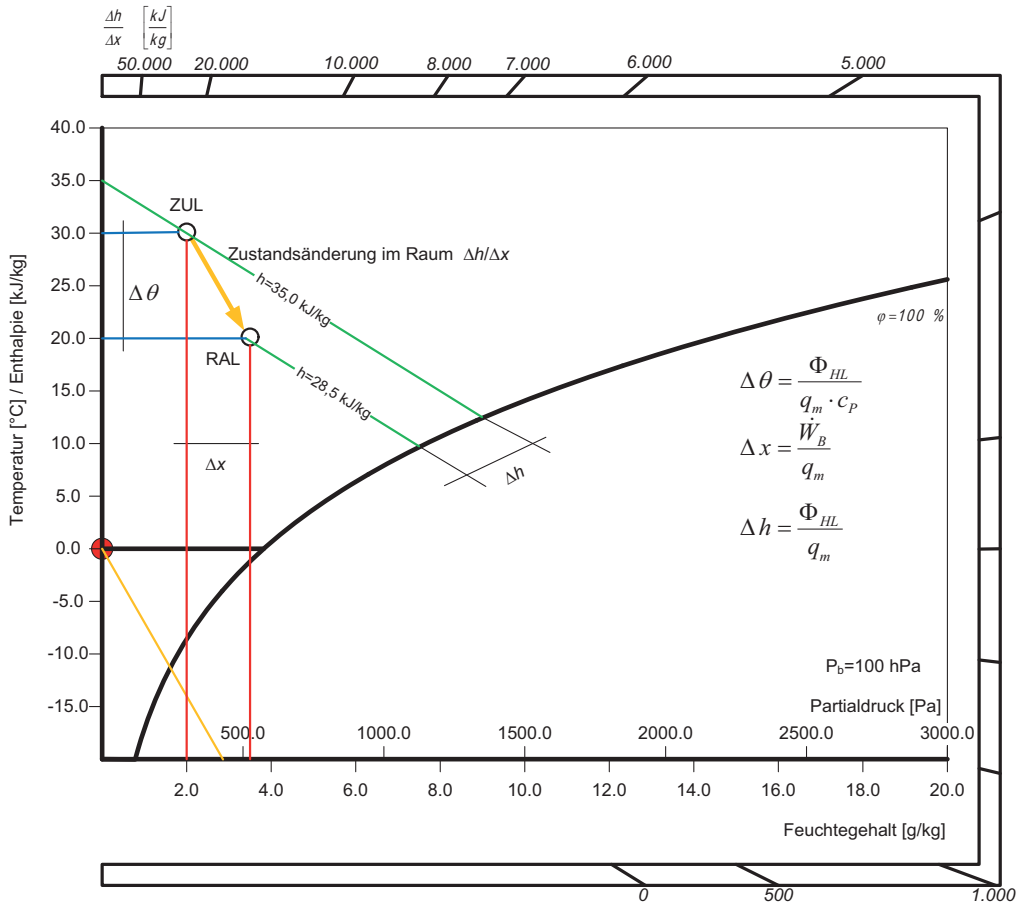


Abb. 2.4-1 Schematische Darstellung der Zustandsänderung im Raum für den Winterfall

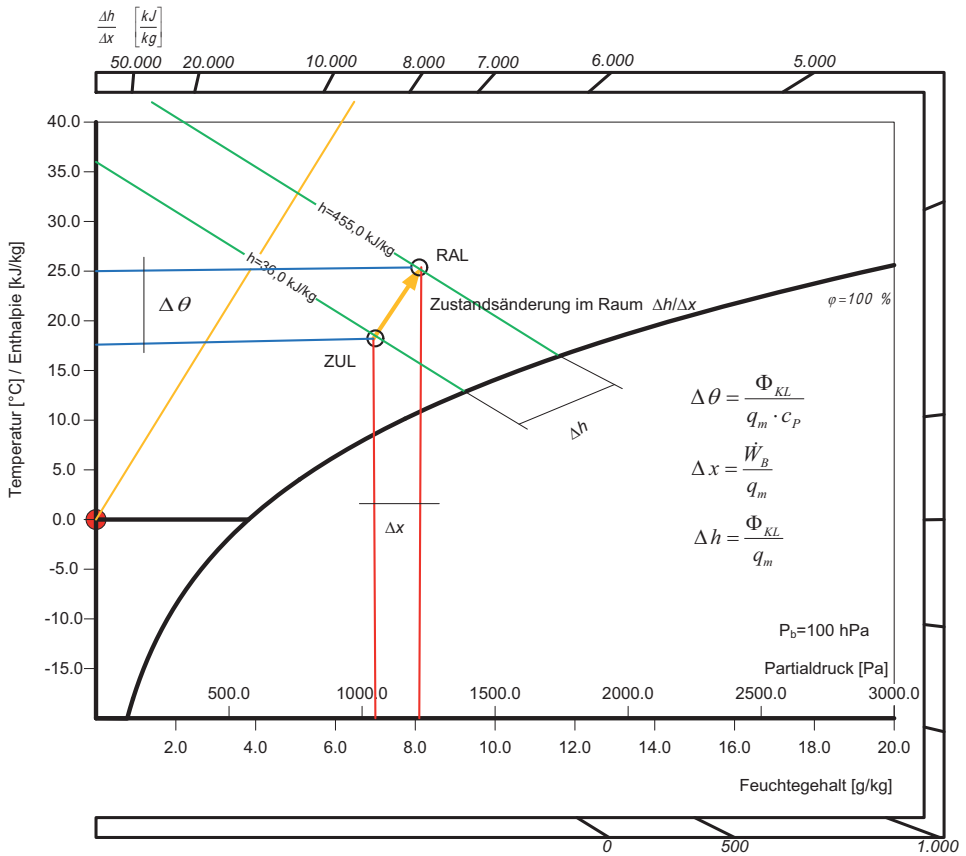


Abb. 2.4-2 Schematische Darstellung der Zustandsänderung im Raum für den Sommerfall

Zustandsänderungen bei der Aufbereitung der Luft

Heizen (Abbildung 2.4-3)

Erwärmen der Luft vom Zustand 1 zum Zustand 2

Veränderlich ist	Konstant bleibt
Temperatur θ	absolute Feuchte x
relative Feuchte φ_D	
spezifische Enthalpie h	
Rohdichte der Luft ρ_L	

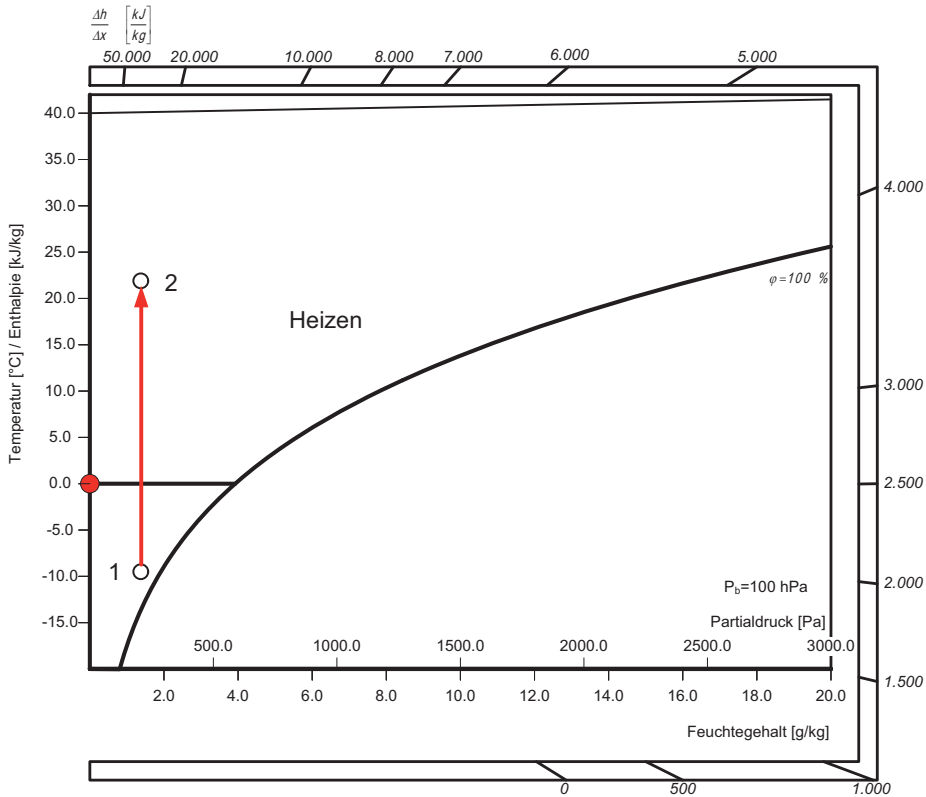


Abb. 2.4-3 Schematischer Zustandsverlauf beim *Erwärmen* eines Luftzustands 1 zum Luftzustand 2

Beispiel: 2.4.-1
gegeben:

Zustand 1 $\theta_L = -5^\circ\text{C}$, $x = 2\text{ g/kg}$;
 $\varphi = 80\%$; $h = 0\text{ kJ/kg}$, $\rho = 1,295\text{ kg/m}^3$

Zustand 2 $\theta_L = 25^\circ\text{C}$, $x = 2\text{ g/kg}$;
 $\varphi = 10\%$; $h = 30\text{ kJ/kg}$, $\rho = 1,17\text{ kg/m}^3$

Massestrom: $q_m = 1\text{ kg/s}$

gesucht:

Spezifische Heizenergie: $\Delta h = h_{L,2} - h_{L,1} = 30 - 0 = 30\text{ kJ/kg}$

Heizleistung: $\Phi = 1 \cdot 30 = 30\text{ kJ/s} = 30\text{ kW}$

Kühlen (Abbildung 2.4-4)

Kühlen der Luft vom Zustand 1 zum Zustand 2

Veränderlich ist	Konstant bleibt
Temperatur θ	absolute Feuchte x
relative Feuchte φ_D	
spezifische Enthalpie h	
Rohdichte der Luft ρ_L	

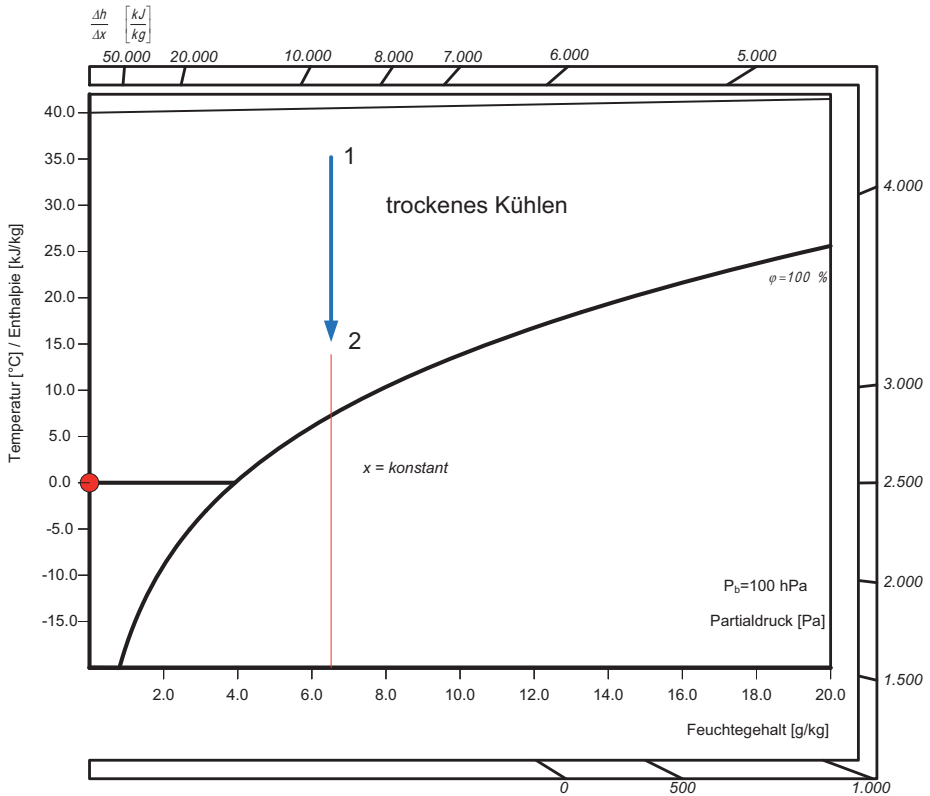


Abb. 2.4-4 Schematischer Zustandsverlauf beim **Kühlen** eines Luftzustands 1 zum Luftzustand 2

Beispiel: 2.4.-2
gegeben:

Zustand 1 $\theta_L = 32^\circ \text{C}$, $\varphi = 40\%$

$x = 12 \text{ g/kg}$; $h = 63 \text{ kJ/kg}$, $\rho = 1,13 \text{ kg/m}^3$

Zustand 2 $\theta_L = 18,2^\circ \text{C}$; $\varphi = 90\%$

$x = 12 \text{ g/kg}$; $h = 48 \text{ kJ/kg}$, $\rho = 1,18 \text{ kg/m}^3$

Massestrom: $q_m = 1 \text{ kg/s}$

gesucht:

Spezifische Kühlenergie: $\Delta h = h_{L,1} - h_{L,2} = 63 - 48 = 15 \text{ kJ/kg}$

Kühlleistung: $\Phi = 1 \cdot 15 = 15 \text{ kJ/s} = 15 \text{ kW}$

Kühlen mit Taupunktunterschreitung (Abbildung 2.4-5)

Die Taupunkttemperatur θ_τ ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Linie $x_1 = \text{konst.}$ mit der Linie $\varphi_D = 100 \%$, d. h., die Luft ist bei dieser Temperatur mit Wasserdampf gesättigt. Liegt eine Oberflächentemperatur unter der Taupunkttemperatur ($\theta_o < \theta_\tau$), so schlägt sich auf der Oberfläche Wasser nieder (**Tau**).

Kühlen der Luft vom Zustand 1 zum Zustand 2

Veränderlich ist	Konstant bleibt
Temperatur θ	
relative Feuchte φ_D	
spezifische Enthalpie h	
Rohdichte der Luft ρ_L	
absolute Feuchte x	

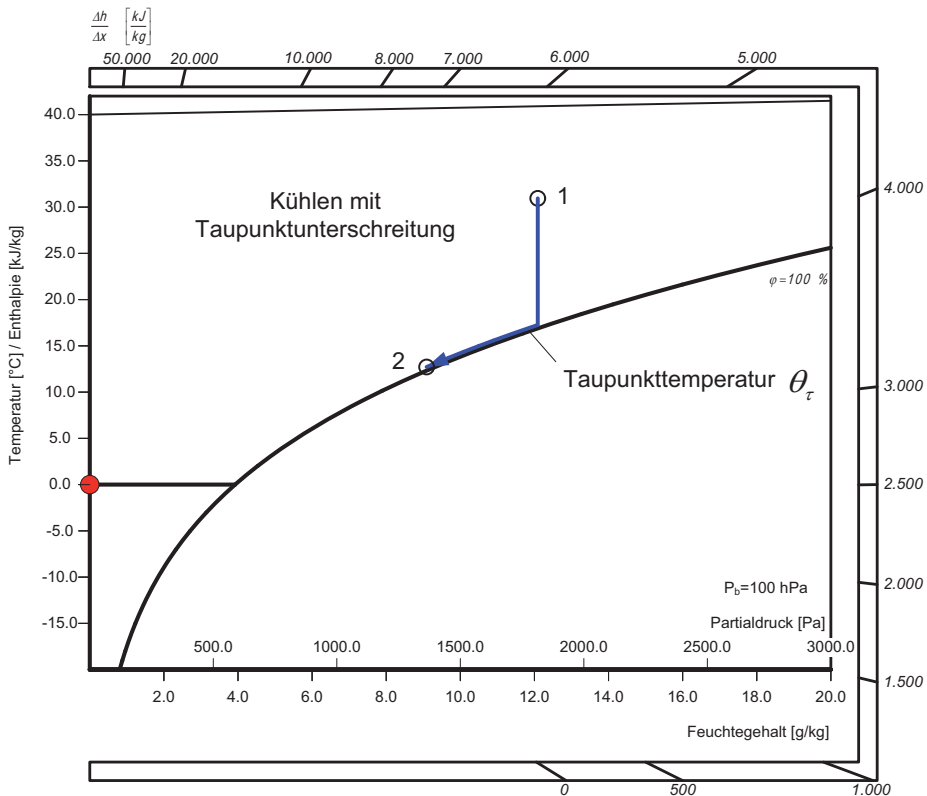


Abb. 2.4-5 Schematischer Zustandsverlauf (idealisiert) beim **Kühlen** eines Luftzustands 1 zum Luftzustand 2 mit **Taupunktunterschreitung**

3 Dezentrale Klimatisierung mittels VRF-Multisplittechnologie¹

3.1 Allgemeine Vorbemerkungen

Die VRF²-Multisplitanlagen, bedeutendster Vertreter der Luft-Kältemittel-Anlagen (s. a. Kapitel 2.1), haben sich seit Mitte der 1990er-Jahre als dezentrale Klimasysteme auch in Europa durchgesetzt [59]. Die Anwendung der VRF-Technik ist besonders in Asien als auch in Europa überproportional zu beobachten. So wurden allein in Deutschland jährlich mehr als 10.000 Außen- und ca. 75.000 Innengeräte angeschlossen [88]. Mit der VRF-Technologie ist es gelungen, analog zur Massenstromregelung der Pumpen-Warmwasser-Heizung bzw. der Volumenstromregelung in der Lüftung, den Massenstrom des Kältemittels energetisch effektiv an die jeweiligen Heiz- und Kühllasten des Gebäudes anzupassen. Die VRF-Multisplittechnik setzt dort an, wo die Grenzen der „normalen“ Splitklimatetechnik erreicht sind. Sie erschließt der sogenannten „anderen Klimatechnik“ neue Anwendungsfelder. Komplexe Klimatisierungslösungen, wie in Abbildung 3-1 schematisch dargestellt, sind äußerst wirtschaftlich realisierbar. Die technisch-technologischen Defizite der Mono- und kleinen Multisplitanlagen bezüglich Rohrleitungsführung und -länge, Ölrückführung, Kompaktheit der Anlagenkomponenten und Regelungsmöglichkeiten, um nur einige zu nennen, wurden beseitigt. Zum besseren Verständnis sei an dieser Stelle in Erinnerung gebracht, dass die Verfahrensbasis der Splitklimatetechnik die einstufige, luftgekühlte Kompressionskältemaschine ist, wodurch die **direkte Luftkühlung bzw. Luftheizung** (Luft-/Luft-Wärmepumpe) realisiert wird. Weitere Ausführungen zu den Grundlagen der Splitklimatetechnik finden sich in [60] und [61]. In [88] werden ausführlich Betriebserfahrungen und Anwendungsbeispiele mit der VRF-Technik beschrieben und auch auf die Implementierung in die Regelwerke der DIN V 18599, DIN EN 16798-3 und DIN EN 16798-17, die EnEV 2014 im Zusammenhang mit der Umsetzung der EPBD 2010 verwiesen. Nicht zuletzt durch die optimale Ausschöpfung nachfolgender Entwicklungsfaktoren haben sich Luft-Kältemittel-Anlagen, neben den anderen RLT-Anlagen, auch am deutschen Klimamarkt fest etabliert.

1 In Anlehnung an [60]

2 VRF = Variable Refrigerant Flow = Variabler Kältemittelstrom; fabrikatsbezogen auch VRV = Variable Refrigerant Volume = Variables Kältemittelvolumen

- Einflussfaktor Maschinen- und Anlagenbau:
 - leistungsgeregelte Kältemittelverdichter verfügbar,
 - umfangreiche Rohrnetze für Direktverdampfung durch VRF-Multisplittechnik möglich,
 - drehzahlgeregelte Ventilatoren mit hoher Luft- und niedriger Schalleistung verfügbar,
 - elektronische Einspritzorgane und
 - HFCKW-freie Kältemittel verfügbar (aktuell R410A, Entwicklungstrend zu R32).

- Einflussfaktor Mikroelektronik:
 - Optimierung des Kälteprozesses,
 - hohe Jahresarbeitszahlen im Teillastbetrieb,
 - Einzelraumregelung, DDC, Gebäudemanagement und
 - innovative Regelstrategien z. B. VRT (Variable Kältemitteltemperatur).

- Einflussfaktor Architektur und Bauwesen:
 - bauphysikalische Veränderungen der Gebäude,
 - Energieeinsparverordnung 2014, europäische Gebäudeeffizienzrichtlinie EPBD 2010, EEWärmeG 2009/2011,
 - Luft-Kühl- und Heizsysteme gewährleisten auch bei extremer Gebäudedichtheit optimale Bedingungen, denn Lufterneuerung und Entfeuchtung benötigen das Medium Luft!

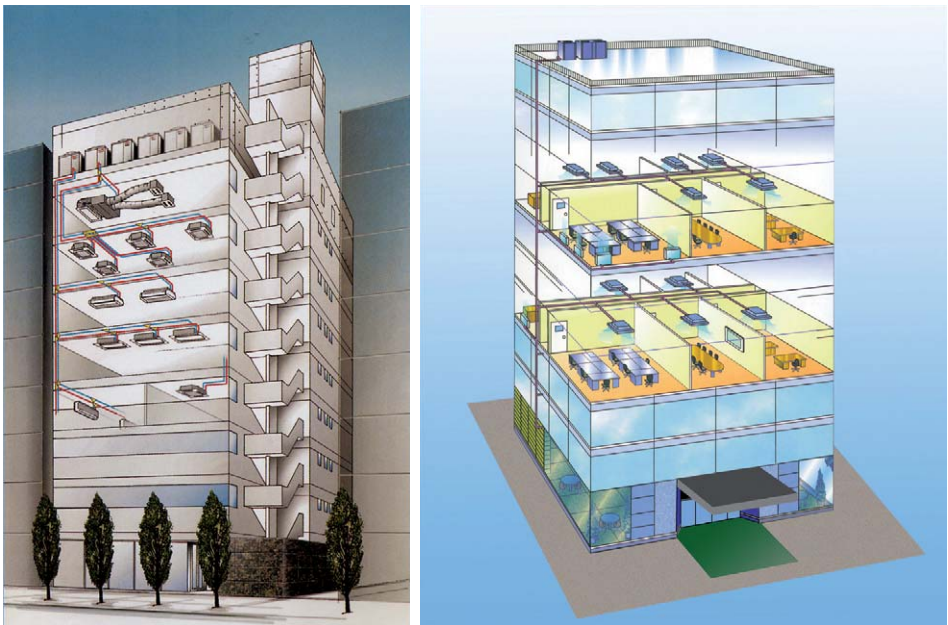


Abb. 3-1 Anwendungsprinzip für VRF-Multisplitsysteme (Werkbild: Fa. Kaut)

Um die Vorzüge der VRF-Systeme ausschöpfen zu können, sind die exakte Planung und Berechnung sowie die kompetente Kälte- und klimatechnische Installation unabdingbar. Da die Wärmeübertrager der Inneneinheiten direkt mit Kältemittel beaufschlagt werden, ist die Einhaltung der DIN EN 378-1-4 abzusichern. Das wiederum kann aber nur durch den Kälte-Klima-Fachmann geschehen. Jeder Auftraggeber ist daher gut beraten, hierbei keine Kompromisse einzugehen.

Ausdruck der Vielseitigkeit dieser Anlagentechnik ist das hohe Maß der Anpassungsfähigkeit an alle, auch komplizierteste Gebäudestrukturen. Die geringen Abmessungen und der damit verbundene niedrige Raum- und Grundflächenbedarf ermöglichen die äußerst wirtschaftliche Lösung unterschiedlicher Klimatisierungsprobleme. Die große Vielfalt der Komponenten, Einzelraumregelung und Gebäude-Klimamanagement erfüllen die Anforderungen an Komfort-Klimaanlagen (s. a. [62], [63] und [64]).

Bedingt durch den modularen Aufbau dieser Anlagentechnik sind Auslegungsleistungen bis in den MW-Bereich durchaus realistisch und auch bereits realisiert. Auch in Deutschland wurden inzwischen Großgebäude (u. a. auch Logistikhallen) und Gebäudekomplexe mit VRF-Klimaanlagen ausgerüstet.

Die guten Erfahrungen werden in den *Thesen zur Dezentralen Klimatisierung mittels Luft-Kältemittel-Anlagen* überschaubar widergespiegelt.

1. Heiz- und Kühllasten werden direkt, z. B. über das umweltfreundliche, ungiftige und nicht-brennbare Kältemittel R410A (Ozonschädigungspotenzial ODP = 0, Treibhauspotenzial GWP = 1890), durch im zu klimatisierenden Raum installierte lufttechnische Geräte (Inneneinheiten) abgeführt.
Hinweis: Bei einer möglichen Einführung des Kältemittels R32 (ODP = 0) wird aufgrund des sehr niedrigen Treibhauspotenzials, GWP (Global Warming Potential) < 700, eine relativ geringe Entflammbarkeit in Kauf genommen.
2. Dezentrale Lastabführung **und** Dezentrale Heiz- und Kühlenergiebereitstellung.
3. **Eine** Anlage – 3 Luftbehandlungsfunktionen: Heizen, Kühlen, Entfeuchten.
4. Nutzung der Luft-/Luft-Wärmepumpe als Heizkomponente führt zu signifikanter Primärenergieeinsparung und Reduzierung der Schadstoffemission.
5. Hohe Energieeffizienz, da Energietransport und -übertragung nur mit **einem** Wärmeträger erfolgen.
6. Hohe Betriebssicherheit durch modularen Aufbau, optimierte Baugruppen und Komponenten sowie einen spezialisierten Anlagenbau.
7. Die Anlagen bestehen aus Inneneinheiten (Wärmeübertragereinheiten) und elektrisch oder gasmotorisch angetriebenen Außeneinheiten (Wärmeübertrager/Kompressoreinheiten).
8. Eine Außeneinheit kann bis zu 64 Inneneinheiten versorgen.
9. Energietransport zwischen Innen- und Außeneinheiten über Kältemittelleitungen kleinen Durchmessers; keine großdimensionierten Luftkanäle erforderlich.

10. Ausführung als 2- und 3-Rohrsysteme (zeitgleiche Bereitstellung von Heiz- und Kühlleistung) mit Gesamtrohrnetzen von 300 bis 1.100 m je Außeneinheit.
11. Durchgängige dezentrale Bauweise (nicht nur dezentrale Anordnung der Inneneinheiten, sondern auch dezentrale Leistungsbereitstellung durch die Außeneinheiten) garantiert maximale Flexibilität bei Umnutzung der klimatisierten Flächen.
12. Große Versorgungsleistungen werden durch regelungstechnische Verknüpfung einzelner, schnellreagierender Kältekreise bzw. Außeneinheiten problemlos erreicht.
13. Dezentrale Anordnung der Außeneinheiten (dezentrale Bereitstellung der Heiz- und Kühlleistung) führt zur Optimierung und Minimierung der Leitungswege zu den Inneneinheiten.
14. Außenluftzufuhr entweder dezentral oder zentral aufbereitet über kleine Luftkanalquerschnitte.
15. Komfortable Bedienungs- und Gebäudeklima-Managementsysteme gehören zum Anlagen-Know-How. Einzelraumregelung und Energie-Einzelraumabrechnung für jede Inneneinheit sind Standardausrüstung.

Nicht zuletzt ist die Energieeffizienz der VRF-Systeme ein entscheidender Beitrag zur Durchsetzung von Energiesparkonzepten in der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA).

3.2 Anlagenkonzeption und Komponenten

Die Grundstruktur einer VRF-Anlage (kältetechnisches Anlagenschema s. Abbildung 3-2) beinhaltet folgende Baugruppen:

a) Außeneinheit(en)

Hier werden zwei unterschiedliche Antriebssysteme eingesetzt, die das VRF-Prinzip „*Energetisch effektive Anpassung des Kältemittelmassenstroms an die jeweilige Heiz- bzw Kühlleistung*“ verwirklichen.

1. Elektro-VRF: Die Kältemittelverdichter in den Außeneinheiten werden elektrisch, überwiegend mittels Frequenzumrichter (Inverter), angetrieben.
2. Gas-VRF: Die Kältemittelverdichter in den Außeneinheiten werden mittels Gasmotor angetrieben. Sonderausführung mit Generator.

Je Kältekreis wird eine **Außeneinheit** eingesetzt, an die bis zu 64 einzeln geregelte **Inneneinheiten** angeschlossen werden können. Jede Außeneinheit besteht je nach Leistungsanforderung aus 1 bis 3 Modulen (s. Abbildung 3-3), wobei bei Ausführungen der neuesten Generation alle Module stetig regelbar sind. Die möglichen, praxis-

relevanten Nennleistungsbereiche liegen im Heizbetrieb zwischen 12 kW und 162 kW und im Kühlbetrieb (bezogen auf $t_{tr} = +35\text{ °C}$, $t_f = +19\text{ °C}$ und ein Kälteleistungsverhältnis Inneneinheiten/Außeneinheiten von 1,3) zwischen 11 kW und 184 kW. Die Leistungsangaben verstehen sich hierbei je Kältekreis. Bei Anforderung größerer Leistungen werden mehrere Kältekreise über BUS-Systeme regelungstechnisch zu einer Gesamt-Versorgungseinheit zusammengeschaltet. Leistungen $> 500\text{ kW}$ sind gegenwärtig kein Problem und wurden weltweit, auch in Deutschland, bereits realisiert (s. Abbildung 3-8). Angesichts der kompakten Bauweise der Module (Grundfläche ca. $0,3\text{ bis }2,1\text{ m}^2$, Höhe ca. $1,2\text{ bis }2,25\text{ m}$) wird deutlich, welch geringer Platzbedarf erforderlich ist.

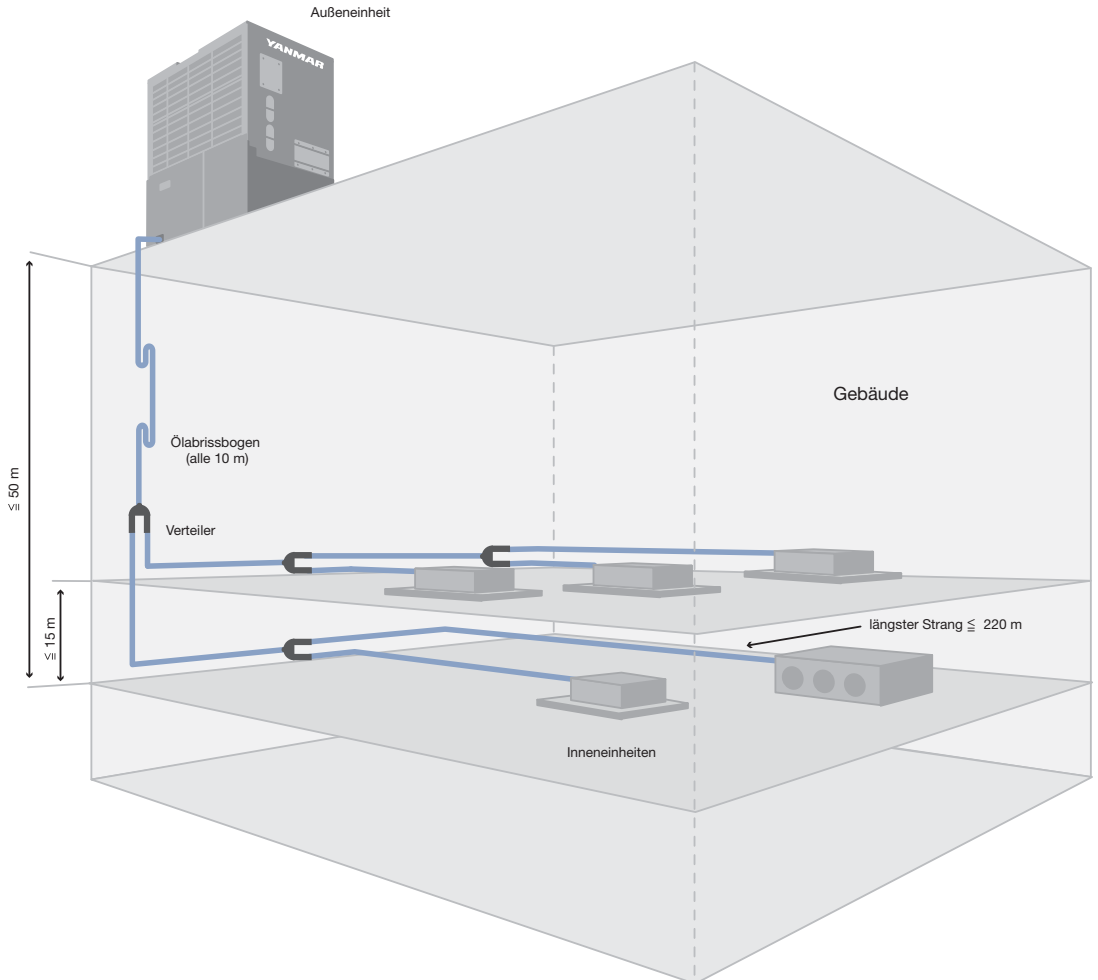


Abb. 3-2 Kältetechnische Grundstruktur einer VRF-Multisplitanlage
(Werkbild: Fa. KKU Concept)