

Kapitel 1

Einleitung

Der Begriff Klimatisierung ist aus Sicht der Umwelt eher negativ behaftet. Nicht zuletzt die Problematik der in der Regel zur Abkühlung eingesetzten FCKW/FKW-Kältemittel in elektrisch betriebenen Kältemaschinen mit ihrer Treibhauswirkung führte dazu, dass Klimaanlage von vielen Menschen oft nur als Luxus empfunden werden.

Die verbesserte Wärmedämmung, die für die moderne Niedrigenergiebauweise notwendig ist, führte in den letzten Jahren zu einer erheblichen Reduzierung des Wärmebedarfs eines neuen Gebäudes im Winter. Durch diese Bauweise entstehen aber im Sommer Temperaturspitzen, die sich auch bei sorgfältiger Gestaltung des Gebäudes nicht immer vermeiden lassen. Durch die gestiegenen Ansprüche an Komfort und Behaglichkeit sind Klimaanlage in vielen Bereichen unverzichtbar geworden, z.B. in Bürogebäuden. Der Klimatisierungsbedarf ist daher in den letzten Jahren erheblich gestiegen. In den Jahren 1990 bis 2000 hat sich die klimatisierte Fläche in Deutschland etwa vervierfacht [EECCAC 2002]. In der Zukunft wird nochmal eine Zunahme um mehr als 60% bis zum Jahre 2020 vorhergesagt.

Oft wird *Klimatisierung* mit einer reinen *Abkühlung* der Luft gleichgesetzt und die Aufgabe der *Entfeuchtung* und der Frischluftversorgung vernachlässigt. Klimaanlage müssen aber in der Lage sein, die äußeren und inneren Lasten (Wärme- und Stofflasten) auszugleichen, die Frischluft zu be- oder entfeuchten und abzukühlen oder zu erwärmen. Dabei ist die Entfeuchtung nicht nur wichtig, um die Grenzen der thermischen Behaglichkeit einzuhalten und die Stofflasten abzuführen, sondern auch um eine bessere Luftqualität herzustellen. Zutreffenderweise formulierte *Fanger* [FANGER 2001, FANGER 2000] eine der Forderungen an die zukünftige Klimatisierungstechnik:

“Stelle die Luft kühl und trocken zur Verfügung”

Während zur Klimatisierung im Winter die Luft aufgewärmt und gegebenenfalls befeuchtet werden muss, ist diese im Sommer abzukühlen und in der Regel auch zu entfeuchten. Im Sommerfall muss in konventionellen Klimaanlage dabei die Luft deutlich unter die eigentliche Zulufttemperatur abgekühlt werden, da zur Entfeuchtung der Taupunkt unterschritten werden muss. Aus diesem Grund ist ein hoher Anteil der Kälteleistung nur für die Luftentfeuchtung notwendig. Diese Kälteleistung wird in der Regel durch elektrisch betriebene Kältdampf-Kompressionskältemaschinen zur Verfügung gestellt und führt daher zu einem hohen elektrischen Bedarf. So beträgt zum Beispiel in Deutschland der elektrische Energiebedarf für die

Bereitstellung von Kälte für stationäre Klimaanlage jährlich etwa 9.640 GWh bzw. 28.360 GWh Primärenergie [DKV 2002].

Eine Möglichkeit zur Energieeinsparung stellt die sorptionsgestützte Klimatisierung dar, bei der die Entfeuchtung nicht durch Taupunktunterschreitung, sondern mit Hilfe eines festen oder flüssigen Sorptionsmittels durchgeführt wird. Durch die Trennung der Abkühlung und Entfeuchtung wird der elektrische Energiebedarf reduziert und durch Wärme für die Entfeuchtung ersetzt. Die Verwendung der Sorptionstechnik ermöglicht es thermische Energie, z.B. als Abwärme aus Blockheizkraftwerken oder aus Sonnenkollektoren, für die Klimatisierung einzusetzen.

Gegenstand der Untersuchung in dieser Arbeit sind Klimaanlage, bei denen ein festes Sorptionsmittel zum Einsatz kommt. Ziel dabei ist, die aus vergangenen hauptsächlich experimentellen Untersuchungen am Arbeitsbereich Technische Thermodynamik der TU Hamburg-Harburg [MÖCKEL 2003] gewonnenen Erfahrungen in die Praxis umzusetzen und daraus weitere Erkenntnisse zur Optimierung solcher Systeme zu gewinnen. Dazu wurden im Rahmen dieser Untersuchung eine Demonstrationsanlage in einem Bürogebäude in Hamburg-Stellingen geplant und messtechnisch begleitet. Die ermittelten Messergebnisse dienen dazu, die Anlage zu bilanzieren und deren Praxistauglichkeit nachzuweisen. Darüber hinaus wird in dieser Demonstrationsanlage die Technik der sorptionsgestützten Klimatisierung mit zwei weiteren innovativen, umweltfreundlichen Technologien kombiniert: Der Flächenkühlung über die Fußbodenheizung und der Nutzung des Erdreichs als Wärmesenke.

Um Klimaanlage zu optimieren, ist es wünschenswert, deren Verhalten mit Hilfe mathematischer Modelle im Rechner nachzubilden, um so aus den wechselnden Randbedingungen (z.B. Wetter, Gebäudeverhalten) und verschiedenen Schaltungsmöglichkeiten, eine für den jeweiligen Einsatzfall optimal abgestimmte Schaltung zu identifizieren. Kernstück sorptionsgestützter Klimaanlage ist dabei der Sorptionsrotor. Daher ist die Simulation des Wärme- und Stoffaustausches in einem Sorptionsrotor ein weiteres Ziel dieser Arbeit.

Nachfolgend wird in Kapitel 2 der Begriff der Behaglichkeit erläutert und die Rolle der Entfeuchtung bei der Klimatisierung behandelt. Anschließend wird im Kapitel 3 der Stand der Technik bei der konventionellen und sorptionsgestützten Klimatisierung beschrieben. Im darauf folgenden Kapitel 4 werden die physikalischen Grundlagen der Sorptionstechnik dargestellt und die Vorgehensweise bei der Modellbildung und Implementierung in einer geeigneten Simulationsumgebung gezeigt. In Kapitel 5 wird die ausgeführte Demonstrationsanlage vorgestellt, Messergebnisse gezeigt und ausgewertet. Anhand eines Vergleichs mit anderen möglichen Schaltungsvarianten wird die Anlage energetisch und wirtschaftlich bewertet. Aus der Modellierung entsteht eine Simulationsbibliothek, mit der weitere Anwendungsfälle in Kapitel 6 untersucht werden. Im Kapitel 7 werden die Erfahrungen aus dem Betrieb beziehungsweise aus der theoretischen Untersuchung zu Kriterien zusammengefasst, die für die Beantwortung der Frage nach der optimalen Einsetzbarkeit einer sorptionsgestützten Klimaanlage herangezogen werden können.

Kapitel 2

Behaglichkeit und Luftentfeuchtung

Wichtigste Aufgabe von raumluftechnischen Anlagen ist die Gewährleistung eines behaglichen Klimas in Räumen, in denen sich Menschen aufhalten. Im Folgenden wird auf den Begriff der Behaglichkeit eingegangen. Dabei ist die Luftfeuchte eine der Größen, die diese beeinflussen. Neuere Untersuchungen zeigen einen Zusammenhang zwischen Luftfeuchte und Luftqualität, der danach näher erläutert wird. Schließlich wird die Notwendigkeit der Luftentfeuchtung in der Raumklimatisierung dargelegt.

2.1 Thermische Behaglichkeitsskala und Behaglichkeitsbereich

Das Behaglichkeitsempfinden der Menschen ist sehr unterschiedlich und wird von vielen Faktoren beeinflusst, wie z.B. Aktivitätsgrad, Kleidung, Gesundheit, Beleuchtung, Luftqualität, Luftgeschwindigkeit, Temperatur der Umschließungsflächen, Lufttemperatur und Feuchte. Dominiierende Faktoren für die Einstellung eines *thermisch* behaglichen Raumklimas sind die Luftgeschwindigkeit, die Lufttemperatur, die Luftfeuchte und die Temperatur der Umschließungsflächen bzw. die Strahlungsasymmetrie.

Die operative empfundene Temperatur (im Folgenden auch nur Raumtemperatur genannt) fasst die Lufttemperatur t_a und die Strahlungstemperatur der Umgebungsfläche t_r zusammen. Für eine Luftgeschwindigkeit kleiner als 0,2 m/s kann die operative Temperatur aus der Näherungsgleichung [DIN1946-2]

$$t_o = 0,5 \cdot (t_a + t_r) \quad (2.1)$$

bestimmt werden. Genauere Gleichungen unter Einbeziehung weiterer Einflussgrößen können [GLÜCK 1997] entnommen werden. Für die operative Temperatur gibt die [DIN1946-2] einen Zulässigkeitsbereich an, der in Abbildung 2.1 gezeigt ist. Diese Darstellung gilt für leichte Tätigkeit im Sitzen oder Stehen und bei leichter bis mittlerer Bekleidung. Bei hohen Außenlufttemperaturen im Sommerbetrieb wird ein Anstieg der operativen Raumtemperatur bis 27°C zugelassen. Treten hohe innere thermische Lasten kurzfristig auf, darf die Raumtemperatur bis 26°C ansteigen. Bei bestimmten Lüftungssystemen, z.B. Quelllüftung, können Temperaturen zwischen 20 und 22°C zugelassen werden.

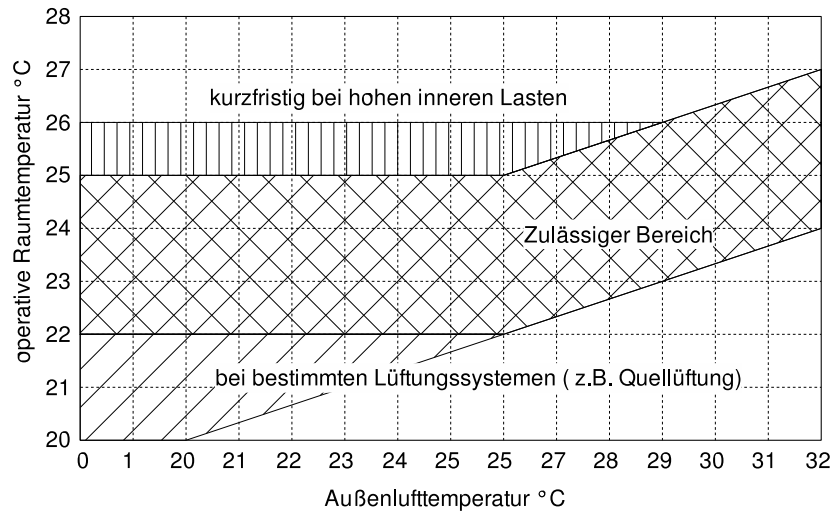


Abbildung 2.1: Empfohlener Bereich für die Raumtemperatur nach [DIN1946-2]

In letzter Zeit sind zum Thema thermische Behaglichkeit umfangreiche Untersuchungen vorgenommen worden, aus denen Empfehlungen hervorgegangen sind, die sich in den neuen überarbeiteten internationalen Normen wiederfinden [ISO7730], [ASH55], [CR1752].

Die [ISO7730] schlägt für ein akzeptables thermisches Raumklima drei Qualitätskategorien vor. Die Auswahl einer Kategorie beruht auf dem zu erwartenden PMV-Index (*Predicted Median Vote*), der den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung einer großen Personengruppe in einer 7-stufigen Skala von -3 (kalt) bis 3 (heiß) vorhersagt, vgl. Tabelle 2.1. In der Berechnung des PMV-Index gehen die Faktoren für die thermische Behaglichkeit ein: Wärmedämmung der Kleidung, Aktivitätsgrad, Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit.

Tabelle 2.1: Skala zur Klimabeurteilung (PMV-Index) nach ISO 7730

+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
heiß	warm	etwas warm	neutral	etwas kühl	kühl	kalt

Der PMV-Index ist als Mittelwert der Beurteilung einer großen Personengruppe zu verstehen. Einzelne Urteile schwanken um diesen Mittelwert. Mit dem PPD-Index (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) kann eine Aussage über den Prozentsatz an Personen getroffen werden, die das Raumklima als zu warm oder zu kalt empfinden. Tabelle 2.2 zeigt die PMV und PPD-Werte für die in der [ISO7730] vorgeschlagenen Qualitätskategorien.

Gemäß der [ISO7730] ist also ein thermisch akzeptables Raumklima als eine Umgebung definiert, die von einer Mehrheit einer Personengruppe als neutral empfunden wird. Für die Kategorie C wären das z.B. 85% (PPD-Wert < 15%), für die Kategorie A 94% (PPD-Wert < 6%), siehe Tabelle 2.2. Anhand des PMV-Index kann eine optimale operative Raumtemperatur für jede Kombination von Parametern (z.B. Luftgeschwindigkeit, Bekleidung) bestimmt werden. Basierend darauf gibt [ISO7730] einige Beispiele für den Bereich der operativen Temperatur für Räume in unterschiedlichen Gebäudetypen. Für Büroräume zeigt Tabelle 2.3 einige Auslegungswerte, sowie die zulässigen Grenzwerte für den vertikalen Lufttemperaturunterschied

Tabelle 2.2: *Qualitätskategorien für akzeptables thermisches Umgebungsklima nach ISO 7730*

Qualitäts-Kategorie	Thermischer Zustand des Körpers insgesamt		Lokale Unbehaglichkeit Prozentsatz Unzufriedener aufgrund von			
	PPD	PMV	Zugluft	Vertikaler Lufttemp.-unterschied	Fußboden-temperatur	Strahlungsasymmetrie
A	< 6%	-0,2 ... + 0,2	< 10%	< 3%	< 10%	< 5%
B	< 10%	-0,5 ... + 0,5	< 20%	< 3%	< 10%	< 5%
C	< 15%	-0,7 ... + 0,7	< 30%	< 10%	< 15%	< 10%

Tabelle 2.3: *Auslegungswerte für die operative Temperatur in Büroräumen nach ISO 7730 (Aktivität 1,2 met), zulässiger vertikaler Temperaturunterschied und empfohlene Oberflächentemperatur*

Kategorie	Operative Raumtemperatur in °C		Lufttemp.-Unterschied *) in K	Oberflächen-temperatur in °C
	Sommer	Winter		
A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	< 2	19 ... 29
B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	< 3	19 ... 29
C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	< 4	17 ... 31

*) zwischen 0,1 (Knöchel-) und 1,1 m (Sitzhöhe)

und die Oberflächentemperatur des Fußbodens, die für das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Klimatisierungskonzept noch beachtet werden müssen.

Der Einfluss der relativen Feuchtigkeit auf das Wärmeempfinden des Menschen *in einem gemäßigten Umgebungsklima* ist relativ gering. In der Regel wird eine um 10% höhere Luftfeuchte als genauso warm empfunden wie eine um 0,3°C höhere operative Temperatur [ISO7730, BERGLUND 1998]. [ISO7730] macht jedoch weiter keine verbindliche Angabe für den zulässigen Bereich der relativen Feuchte. Im Allgemeinen wird für thermische Behaglichkeit eine Luftfeuchte von 30% bis 70% empfohlen [FANGER 2000, FANGER 2001, OLESEN 2000, OLESEN and PARSONS 2002, RECKNAGEL 2003, RIETSCHEL 1994]. Die Richtlinie ASHRAE Standard 55-1992 [ASH55] legt eine Mindest-Taupunkttemperatur von 2°C und eine maximale Taupunkttemperatur von 18°C (ca. 13 g/kg) im Winter und 20°C (15 g/kg) im Sommer fest. Allerdings ist in der Revision der Norm ein engerer Bereich mit einem maximalen Taupunkt von 17°C (12 g/kg) in der Diskussion [OLESEN 2000, OLESEN and PARSONS 2002].

Aus gesundheitstechnischer Sicht legt die [DIN1946-2] eine obere Grenze des absoluten Feuchtegehaltes der Luft bei 11,5 g/kg und 65% relativer Feuchte fest. Als untere Grenze soll demnach 30% relative Luftfeuchte gelten, allerdings werden hierfür keine gesicherten Erkenntnisse angeführt.

Bei hohen Raumtemperaturen, wie sie im Sommer auftreten, wirkt sich eine hohe Luftfeuchte negativ auf die Selbstregulierung des Wärmehaushalts des Menschen aus. Durch die hohe Luftfeuchtigkeit wird die Verdunstung von Schweiß auf der Hautoberfläche erschwert, so dass solche Zustände als schwül empfunden werden. Außerdem kann bei hohen Luftfeuchtigkeiten an kalten Stellen Feuchtigkeit auskondensieren, so dass die Bausubstanz beschädigt werden kann oder durch Schimmelbildung an organischen Stoffen Gerüche abgegeben werden können [RECKNAGEL 2003].

Bei Feuchtigkeiten unter 30%, wie sie leicht in beheizten Räumen im Winter auftreten können, wird die Staubbildung erleichtert. Es kann zu Austrocknung und Schleimhautreizungen kommen. Außerdem werden Kunststoffe elektrisch aufgeladen, was zu unangenehme Entladungserscheinungen führen kann.

ASHRAE Standard 62-1999 (Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality) [ASH62] gibt auch aus Gründen der Luftqualität und Hygiene (Minimierung von Schimmelwachstum) einen zulässigen Bereich von 30% bis 60% an.

Mit diesen Angaben und mit dem Zulässigkeitsbereich der operativen Temperatur ergibt sich der *Behaglichkeitsbereich* im h,x -Diagramm für feuchte Luft, siehe Abbildung 2.2. Dabei gilt der untere Bereich für Winter, der obere Bereich für den Sommerbetrieb.

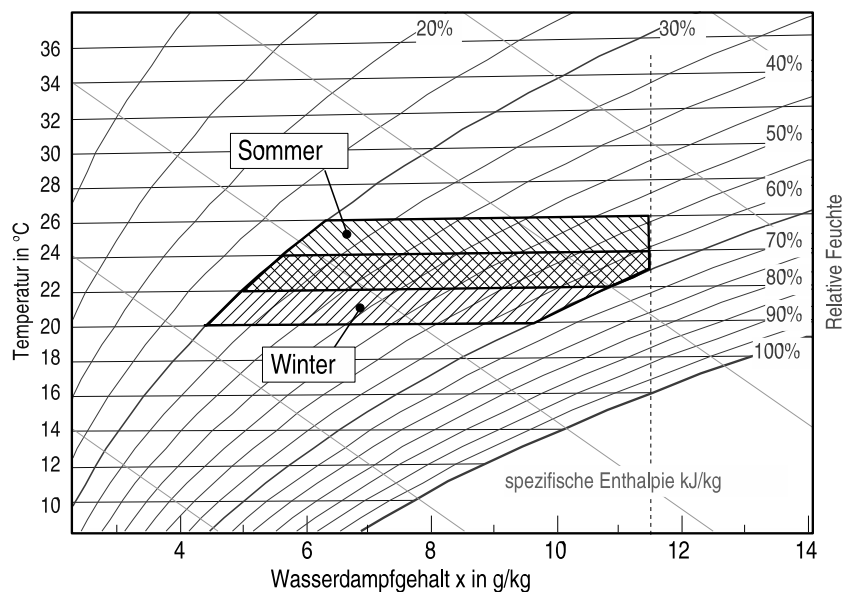


Abbildung 2.2: Behaglichkeitsfeld im Mollier h,x -Diagramm

2.2 Einfluss der Feuchtigkeit auf die Luftqualität

Obgleich die relative Feuchte eine untergeordnete Rolle bei der Regulierung des Wärmehaushalts des Menschen in einem gemäßigten Umgebungsklima spielt, haben Untersuchungen gezeigt, dass die Luftfeuchtigkeit einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die empfundene Luftqualität hat. Experimentelle Untersuchungen [BERGLUND 1998] ergaben, dass trockenere Luft bei konstanter Temperatur als frischer und weniger stickig empfunden wird. Die Versuchspersonen fühlten sich auch kühler, trockener und behaglicher in einer leicht trockenen Umgebung. Für Temperaturen am Rande der Behaglichkeitsgrenze stieg die Unzufriedenheit mit steigender Feuchtigkeit stark an. Die Unzufriedenheit war dabei mit der Feuchtigkeit der Haut verbunden. *Berglund* führte dies teilweise auf größere Friktionskoeffizienten zwischen Kleidung und Haut bei höherer Feuchtigkeit zurück. Weitere Untersuchungen an der *Technischen Universität von Dänemark* [TOFTUM et al. 1998] ergaben, dass die spezifische Enthalpie der Raumluft einen starken Einfluss auf die Akzeptanz und auf die empfundene Luftqualität

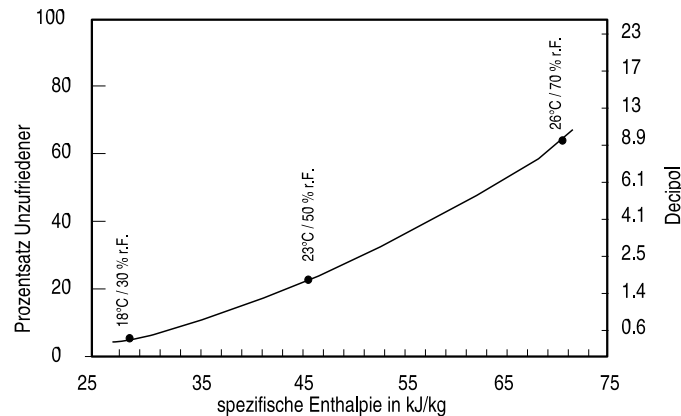


Abbildung 2.3: Wahrnehmung sauberer Luft bei verschiedenen Werten für die Raumluftenthalpie (Angaben aus [FANGER 2000, FANGER 2001])

hat. Abbildung 2.3 zeigt die Wahrnehmung sauberer Luft für verschiedene Raumluftenthalpien und gleich bleibendes thermisches Empfinden. Offensichtlich empfinden es Menschen als angenehm, mit jedem Atemzug eine Kühlung des Atmungstraktes zu erzielen, da so ein Frischegefühl erzeugt wird. Findet diese Kühlung nicht statt, kann die Luft als abgestanden und stickig empfunden werden [FANGER 2000].

2.3 Notwendigkeit der Luftentfeuchtung

Die einem klimatisierten Raum zugeführte Luft muss so weit entfeuchtet werden, dass zum einen die Stofflasten im Raum, z.B. durch Wasserdampfabgabe der Insassen, und zum anderen die Luftqualität und die Behaglichkeit sichergestellt werden können.

Wie stark während des Betriebes einer Klimaanlage oder wie oft entfeuchtet werden muss, hängt hauptsächlich vom Wassergehalt der Außenluft und vom einzustellenden Zuluftsollwert bzw. vom gewünschten Raumluftzustand ab,

$$\Delta x = x_{AU} - x_{ZU} \quad . \quad (2.2)$$

Der Feuchtegehalt der Zuluft wird aus dem Raumluft Sollwert und der Feuchtelast $\Delta \dot{m}_w$ mit einer Feuchtebilanz um den Raum bestimmt,

$$\dot{m}_a \cdot (x_{RL} - x_{ZL}) = \Delta \dot{m}_w \quad . \quad (2.3)$$

Wenn keine nennenswerten Feuchtelasten im Raum vorhanden sind, ergibt sich mit $x_{RL} \approx x_{ZL}$

$$\Delta x = x_{AL} - x_{RL} \quad . \quad (2.4)$$

Für eine Raumtemperatur $\vartheta_{RL} = 24^\circ\text{C}$ und $\varphi = 50\%$ errechnet sich ein Sollwert für die absolute Raumluftfeuchte $x_{RL} = x_{ZL} \approx 9 \text{ g/kg}$.

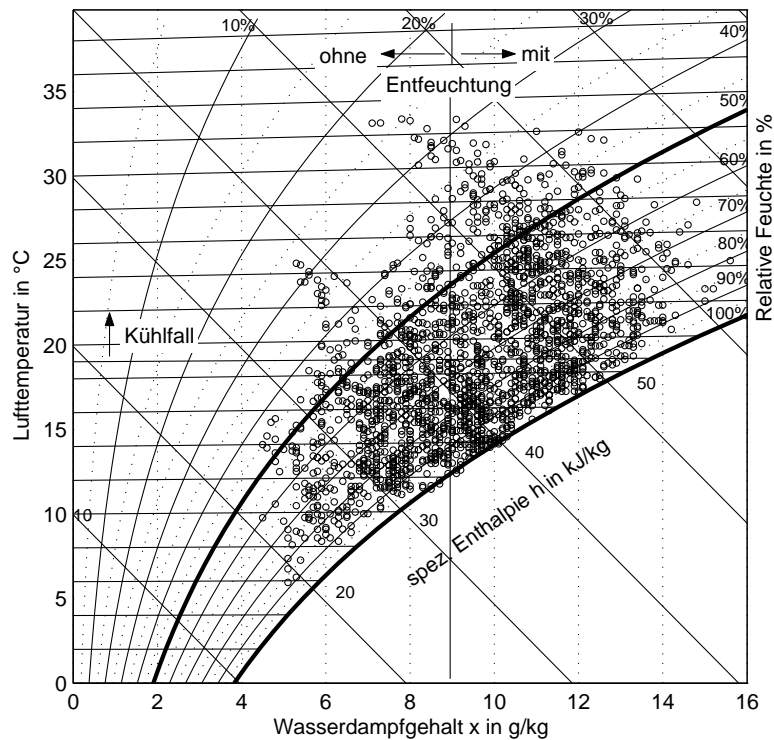


Abbildung 2.4: Verteilung der Außenluftzustände für die Klimadaten des Testreferenzjahres TRY05 [DWD 2004] im h,x -Diagramm

Abbildung 2.4 zeigt die Verteilung der stündlichen Luftzustände während der Sommermonate Juni bis August (2088 Zustände) im h,x -Diagramm für die Klimadaten des Testreferenzjahres TRY05¹ [DWD 2004]. Mit einer festgelegten Zulufttemperatur von 19°C und 9 g/kg Zuluftfeuchte ergeben sich für verschiedene Klimazonen die in Tabelle 2.4 gezeigten Stunden für den Kühlfall ($t > 19^\circ\text{C}$) und den Entfeuchtungsfall ($x > x_{ZL}$). Es sind deutlich mehr Zustände im Bereich Kühlung und Entfeuchtung vorhanden, als im Kühlfall allein.

Werden kombinierte Systeme aus Klimaanlage und Flächenkühlung eingesetzt, wie z.B. Kühldecken, Fußbodenkühlung oder Betonkernaktivierung, kann es sinnvoll sein, den Sollwert für die Raumluft- bzw. Zuluftfeuchte niedriger anzusetzen, um unerwünschte Tauwasserbildung auszuschließen.

Gerade wenn die Lüftungsanlage so klein bemessen wird, dass nur der geforderte Frischluftvolumenstrom gedeckt wird und der Hauptteil der sensiblen Lasten vom Flächenkühlsystem aufgenommen wird, ist aufgrund des geringeren Luftmassentromes eine niedrigere Zuluftfeuchte als oben angegeben notwendig, um die Feuchtelasten weiterhin abführen zu können. Bei einer Frischluftfrate von $\dot{V} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer Wasserdampfabgabe von $\dot{m}_w = 40 \text{ g/h}$ pro Person [RECKNAGEL 2003] erfährt die Luft im Raum eine Feuchteänderung

$$x_{RL} - x_{ZL} = \frac{\dot{m}_w}{\dot{V} \cdot \rho_a} = 0,86 \text{ g/kg} \quad . \quad (2.5)$$

Um den Raumluft Sollwert $x_{RL} = 9 \text{ g/kg}$ zu halten, muss die Zuluftfeuchte um 1 g/kg auf etwa 8 g/kg verringert werden. So ein verringerter Sollwert hat weitere ca. 100-150 Entfeuchtungs-

¹Niederrheinisch Westfälische Bucht und Emsland