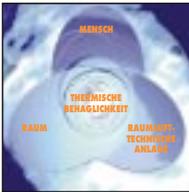


Klima in Bürogebäuden



Die in diesem Merkblatt enthaltenen technischen Lösungen schließen andere, mindestens ebenso sichere Lösungen nicht aus, die auch in technischen Regeln anderer Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder anderer Vertragsstaaten des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum ihren Niederschlag gefunden haben können.

1	Einleitung	4
2	Der Mensch	7
2.1	Wärmebilanz	7
2.2	Autonome Regulation	7
2.3	Thermoregulatorisches Verhalten	8
2.4	Richtwerte für die Klimaanlage	12
3	Der Raum	18
4	Die Klimaanlage	20
4.1	Frischlufbedarf und Luftqualität	21
4.2	Luftführung	23
4.3	Die Klimaanlage als Ursache von Luftverunreinigungen	25
5	Schlußfolgerungen	27
6	Literatur	28

1 Einleitung

Beschäftigte in klimatisierten Räumen, besonders in modernen Bürogebäuden, klagten häufig über eine Reihe von meist unspezifischen Beschwerden. Nach Befragungsaktionen sind dies vor allem:

Störungen des Wohlbefindens	Arbeitsplatz	
	klimatisiert	nicht klimatisiert
• Neigung zur Erkältung	32,7	18,1
• Trockene Schleimhäute	28,5	15,5
• Rheumat. Beschwerden	15,4	7,9
• Kopfschmerzen	20,5	15,5
• Rasche Ermüdung	20,0	15,0
Beeinträchtigung am Arbeitsplatz		
• Fehlende Fensterlüftung	38,2	13,8
• Zugerscheinungen	33,9	21,1
• Trockene Luft	37,8	25,7
• Wechselhafte Temperaturen	21,1	9,8
• Zu kühl	19,1	10,6
• Zu warm	24,7	18,7
• Verbrauchte Luft	31,0	26,2
• Räumliche Verhältnisse	19,1	15,1
• Unbefriedigende Tätigkeit	12,1	8,4
Gesamtzahl der Befragten	420	699

Werte aus Kröling 1985

Von Laien werden alle diese Klagen und Beschwerden überwiegend der „Klimaanlage“ angelastet. Eine solche Anlage existiert aber niemals für sich allein, sie ist vielmehr stets Teil eines Gebäudes. Sie kann also ihre Aufgabe, nämlich ein behagliches Klima zu schaffen, auch nicht allein erfüllen. In der Norm DIN 1946 werden daher die Einflußgrößen für die thermische Behaglichkeit durch drei sich überschneidende Bereiche dargestellt (Abb. 1), Mensch, Raum und raumlufttechnische Anlage (RLT-Anlage, Klimaanlage). Man müßte eigentlich als 4. Bereich die Umwelt des Raumes noch dazu rechnen.

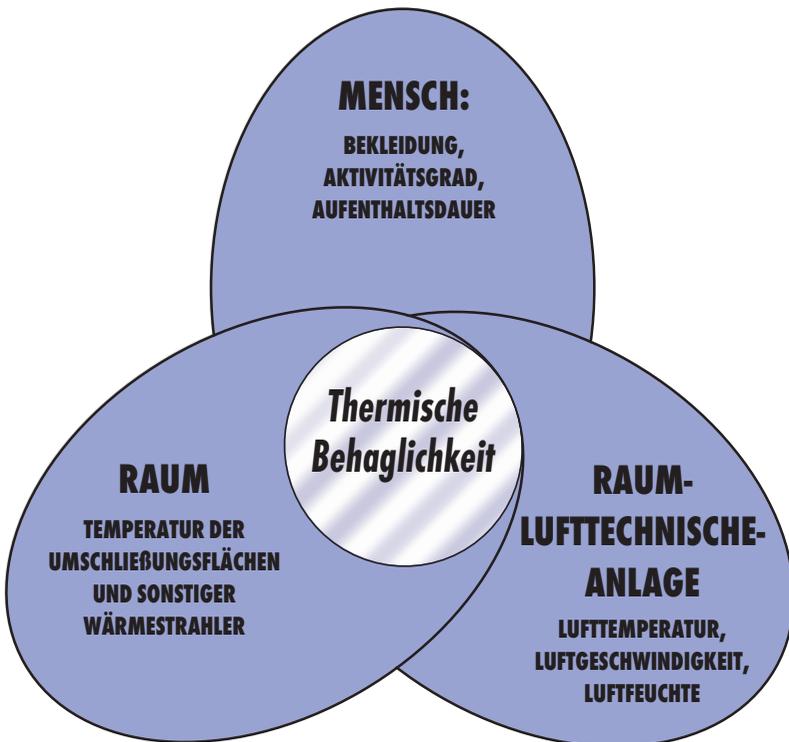


Abb. 1: Einflußgrößen auf die thermische Behaglichkeit von Personen in Räumen mit Klimaanlagen. Aus DIN 1946, Teil 2.

Wie das Bild zeigt, kann die Klimaanlage nur bestimmte klimatische Bedingungen in einem vorgegebenen Raum (bei gegebenen Umweltbedingungen) einhalten, und es ist nicht zu erwarten, daß alle in dem Raum tätigen Menschen diesen Bereich als komfortabel empfinden. Daraus folgt zwangsläufig, daß die genannten Beschwerden nicht unbedingt Folgen von raumluftechnischen Einrichtungen (Klimaanlagen) oder von Fehlern der Anlage sein müssen. Tatsächlich werden die genannten Beschwerden heute auch meistens unter der Bezeichnung „Building Illness Syndrom“ oder „Sick Building Syndrom“ geführt, um so die Bedeutung des Faktors „Raum“ stärker zu betonen. Im folgenden soll versucht werden, die drei Bereiche näher zu untersuchen.

Die Hauptaufgabe der Klimaanlage ist die Einstellung eines thermisch behaglichen Klimas. Daher sind zunächst einige Bemerkungen zur Thermoregulation des Menschen nötig.

2.1 Wärmebilanz

Bei jedem Lebewesen muß auf Dauer die Wärmebilanz ausgeglichen sein, d.h. Wärmebildung und Wärmeabgabe müssen im zeitlichen Mittel genau gleich groß sein:

$$M \pm W = (R + C + K) + E + \Delta S$$

Die eine Seite der Bilanzgleichung ist die metabolische Wärmebildung (M), vermindert oder vermehrt um die mechanische Arbeit (W), die andere Seite die Wärmeabgabe, die sich aus der „trockenen Wärmeabgabe“ (Strahlung R , Leitung C und Konvektion K) und der „feuchten Wärmeabgabe“ E (beim Menschen im wesentlichen über die Schweißverdampfung) zusammensetzt. ΔS , die Änderung des Wärmeinhaltes des Körpers, ist Null (und damit die Körpertemperatur konstant), wenn die Bilanz ausgeglichen ist. Über begrenzte Zeiträume kann die Wärmebilanz nicht ausgeglichen sein, z.B. bei Beginn und nach dem Ende von körperlicher Arbeit. Der Wärmeinhalt und die Körpertemperatur nehmen dann zu oder ab (Abb. 2).

2.2 Autonome Regulation

Der Organismus paßt sich an wechselnde Bedingungen der Wärmebildung und -abgabe durch autonome Maßnahmen an. Die Wärmeabgabe wird durch Variation der Hautdurchblutung und der Schweißrate reguliert, die Wärmebildung in kalter Umgebung durch erhöhten Stoffwechsel, beim erwachsenen Menschen durch Muskelzittern. Diese effektorischen Maßnahmen lassen sich leicht quantifizieren und zu den durch mittlere Hauttemperatur und Kerntemperatur charakterisierten Eingangsgrößen des Regulationssystems korrelieren. Die Zentren verarbeiten die Eingangssignale additiv unterschiedlich gewichtet: Eine Änderung der

Kerntemperatur um 1 °C hat auf die Schweißrate etwa den gleichen Effekt wie eine Änderung der Hauttemperatur um 10 °C. In der gleichen Größenordnung liegt die Gewichtung für die Regulation der vermehrten Wärmebildung in der Kälte, während für die Regulation der Hautdurchblutung die Kerntemperatur weniger hoch gewichtet ist.

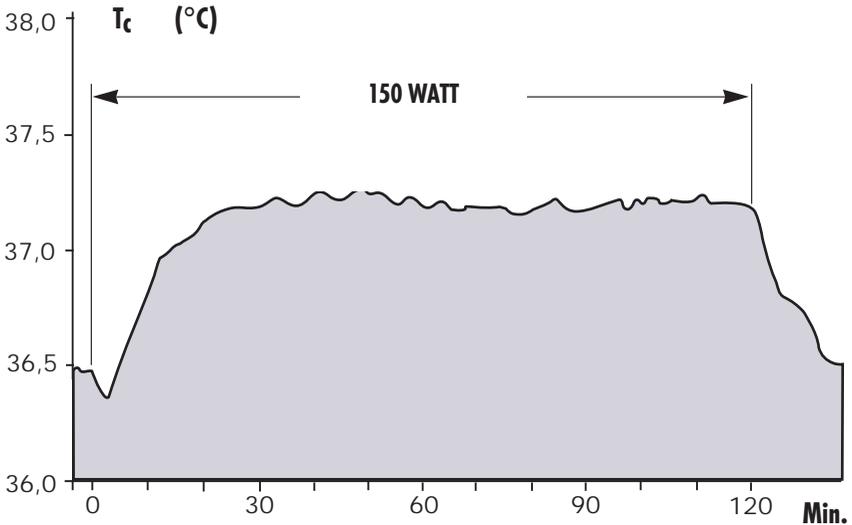


Abb. 2: Zeitgang der Kerntemperatur (T_c) bei einer gesunden trainierten Versuchsperson vor, während und nach Arbeit am Fahrradergometer. Zu Beginn und nach dem Ende der Arbeit ist die Wärmebilanz nicht ausgeglichen, die Kerntemperatur nimmt zu und wieder ab. Aus Bleichert (1977).

2.3 Thermoregulatorisches Verhalten

Erfahrungsgemäß benutzt der ruhende oder mäßig aktive Mensch in unseren Breiten die autonomen Maßnahmen der Schweißsekretion und des Kältezitterns fast nie zur Thermoregulation, er kommt also offenkundig mit der Änderung der Hautdurchblutung zur Erhaltung der Wärmebilanz auch bei mäßiger Aktivität aus. Tatsächlich beträgt unter definierten Versuchsbedingungen der Bereich der Umgebungstemperatur, in dem ein Mensch bei konstanter Kleidung und Aktivität weder schwitzt noch vor Kälte zittert (thermoneutraler Bereich), nur etwa 1 bis 3 °C, seine Lage hängt u.a. vom Energieumsatz und von der Kleidung ab (Abb.3). Von einem thermoneutralen „Bereich“ kann man also kaum sprechen. Wenn wir aber offenkundig fast immer in diesem thermoneutralen Bereich verbleiben, so ist die Ursache

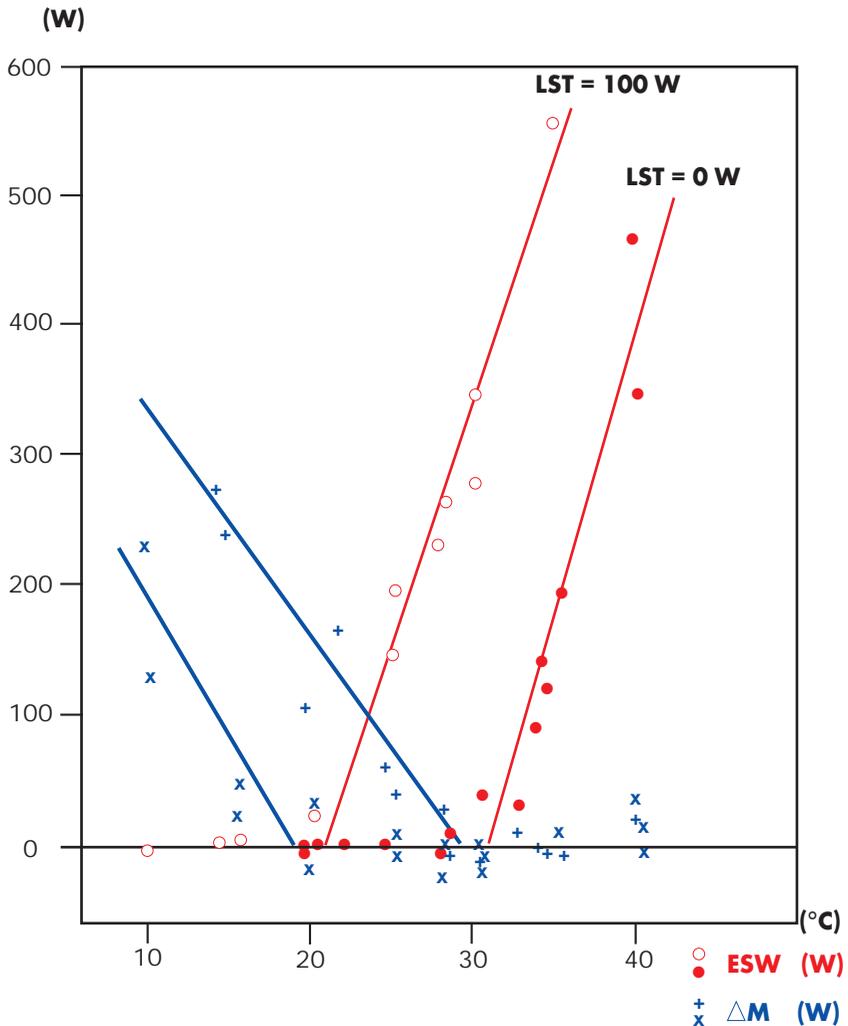


Abb. 3: Wärmeverlust durch Verdunstung (E_{sw} , rot) und zusätzliche metabolische Wärmebildung (ΔM , blau) im kalten Klima (Angabe in Watt, Ordinate) als Funktion der Umgebungstemperatur (T_a , Abszisse) bei einer unbedeckten Versuchsperson nach 2 Stunden Aufenthalt bei jeder Temperatur. Die dick ausgezogenen Geraden verbinden Werte vom ruhig sitzenden Probanden (Energieumsatz bei Temperaturen über 32 °C: 146 W), die dünnen Geraden gelten für Arbeit am Fahrradergometer (Leistung [LST] 100 W, Energieumsatz oberhalb 25 °C 490 W). Nach Werten von Kitzing et al. (1971).

dafür das thermoregulatorische Verhalten, mit dem wir, z.B. durch Wahl der Kleidung unser Mikroklima immer in einen Bereich verschieben, den wir als thermisch angenehm empfinden und dann unser thermoregulatorisches Verhalten nicht weiter ändern. Das thermoregulatorische Verhalten ist ein Teil des Systems der Thermoregulation, ja sogar seine wichtigste effektorische Maßnahme, ohne die uns ein Überleben fast nirgends auf der Erde möglich wäre. Trotzdem wird es in der Physiologie recht stiefmütterlich behandelt, nicht zuletzt weil es wegen seiner Vielfalt nur schwer quantitativ zu fassen ist.

Wie die autonomen Maßnahmen der Thermoregulation wird auch das thermoregulatorische Verhalten durch thermische Antriebe über Haut- und Kerntemperatur gesteuert. Unter Ruhebedingungen stimmt dabei die thermoneutrale Zone der autonomen Regulation mit der Komfortzone (dem Bereich, in dem sich der Mensch thermisch behaglich fühlt, also keine Änderung seiner thermischen Umgebung anstrebt) des thermoregulatorischen Verhaltens überein. Da jedoch die Kerntemperatur für das thermoregulatorische Verhalten geringer gewichtet ist als für die Regulation der Schweißrate – eine Änderung der Kerntemperatur um 1 °C hat auf das thermoregulatorische Verhalten den gleichen Einfluß wie eine gleichsinnige Veränderung der mittleren Hauttemperatur um 2 bis 4 °C – stimmen die thermoneutrale Zone und die thermische Komfortzone bei körperlicher Arbeit nicht überein. Wegen der bei Arbeit erhöhten Kerntemperatur wird eine Außentemperatur als komfortabel empfunden, bei der man schwitzt, und zwar um so mehr, je schwerer die Arbeit ist. Abb. 4a zeigt die von einem Probanden im Wasserbad als weder warm noch kalt empfundene selbst gewählte Wassertemperatur (= Komforttemperatur, untere Kurve) und die in der Speiseröhre gemessene Kerntemperatur (obere Kurve) während einer Ruhepause und bei körperlicher Arbeit. Während der Ruhepause bleiben beide Temperaturen weitgehend konstant. Mit Beginn der Arbeit steigt die Kerntemperatur an und der Proband stellt sich nahezu spiegelbildlich zur Kerntemperatur eine geringere Komforttemperatur ein. In Abb. 4b sind die Endwerte der Komforttemperatur bei verschiedenen Leistungsstufen als Funktion der durch die körperliche Arbeit variierten gleichzeitig gemessenen Kerntemperatur für zwei verschiedene Probanden eingetragen. Die linke Gerade gibt die in anderen Versuchen am gleichen Probanden bestimmte Grenze für die Schweißrate = 0 als obere Grenze der thermoneutralen Zone an. Sie läuft, wegen der höheren Gewichtung der Kerntemperatur, steiler als die Komfortgerade des gleichen Probanden.

Thermischer Komfort kann auch durch nichtthermische Faktoren beeinflusst werden. Dazu gehören z.B. Wasserverluste, Alkohol und Schlafentzug. Der Einfluß auf die Komforttemperatur ist aber gering. Akklimatisation, Alter, Geschlecht und ethnische Herkunft scheinen keinen Einfluß zu haben.

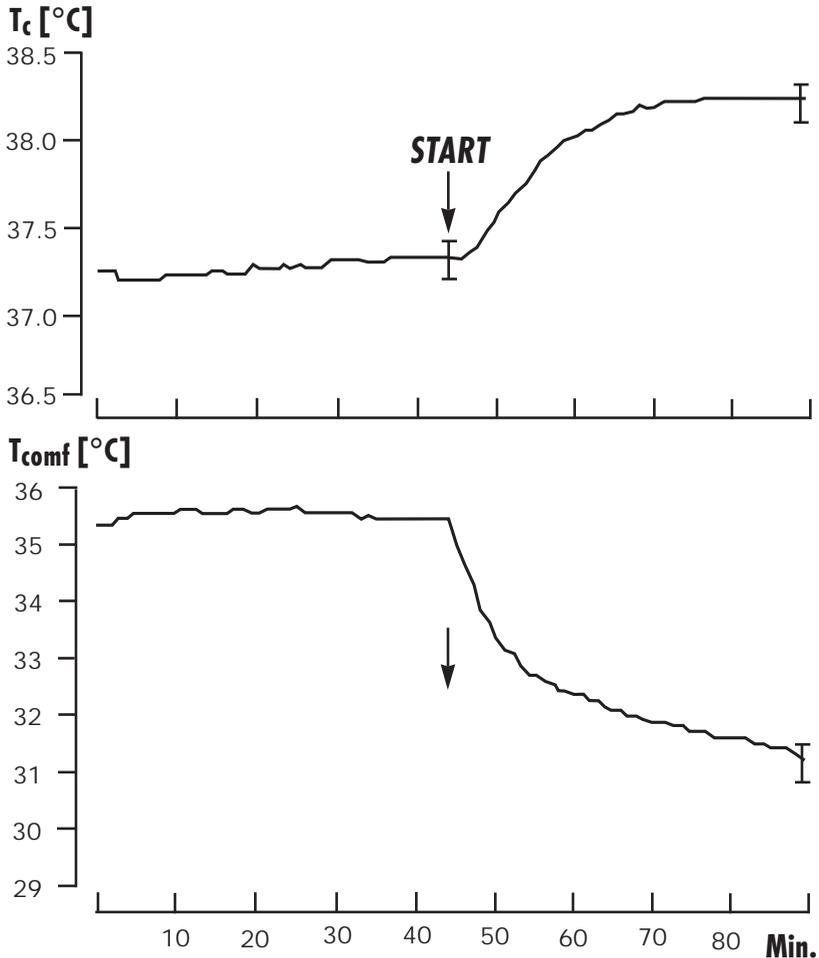


Abb. 4a): Ein im Wasserbad untergetauchter Proband kann die ihm behaglich erscheinende Wassertemperatur frei wählen. Während der ersten 45 Min. liegt er ruhig im Bad, während der folgenden 45 Min. arbeitet er an einem im Bad installierten Trekkurbelergometer. Zeitgang der Kerntemperatur (T_c , obere Kurve) und der Komforttemperatur (T_{comf} , untere Kurve).

2.4 Richtwerte für die Klimaanlage

Das Ziel einer Klimaanlage muß sein, die Raumtemperatur im Komfortbereich der im Raum beschäftigten Menschen zu erhalten, nicht aber unbedingt in deren thermoneutraler Zone. Dieses Ziel ist nicht für jeden einzelnen Mitarbeiter in einem Bürogebäude zu erreichen, sondern nur für die Mehrzahl der Beschäftigten, während die Minderheit das Klima als mehr oder weniger unbefriedigend beurteilt. Die Ursache ist z.T. die erhebliche Streuung in der individuellen Lage und Breite des Komfortbereiches, der bei manchen Menschen sehr eng ist. Abb. 4b gibt einen Vergleich der Einstellung des Komfortbereiches von zwei verschiedenen Probanden, beides hochtrainierte Radrennfahrer. Während der Proband JS seine Komforttemperatur mit extrem geringer Streuung einstellt, ist der Bereich, in dem der Proband HGR reguliert, besonders breit.

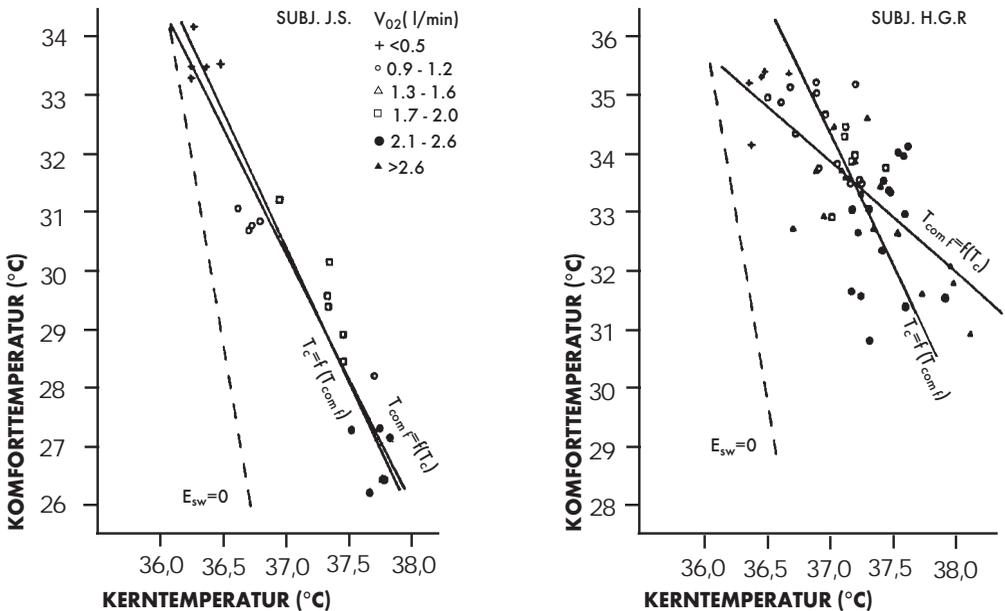


Abb. 4b): Endwerte der von zwei trainierten Probanden im Wasserbad gewählten Komforttemperaturen (T_{comf} , Ordinate) als Funktion der gleichzeitig gemessenen Kerntemperaturen (T_c , Abszisse) bei verschiedenen Leistungen. Die gestrichelten Geraden (Schweißrate $E_{sw} = 0$) sind die obere Grenze der thermoneutralen Zone, die aus anderen Versuchen am gleichen Probanden bestimmt wurde.

Nach Bleichert et al. (1972).

Fanger (1973) hat von einer großen Zahl Probanden Klimabedingungen in einer mehrstufigen Skala (von -3 = kalt bis $+3$ = heiß) beurteilen lassen und damit die Möglichkeit gewonnen, für jede Klimabedingung die mittlere subjektive Beurteilung vorherzusagen.

Das so gewonnene Maß für die jeweilige Klimabedingung wird „predicted mean vote“ (PMV) genannt. Aus ähnlichen Versuchen kann man den Prozentsatz der mit den Klimabedingungen Unzufriedenen abschätzen. Das Maß wird „predicted percentage of dissatisfied“ (PPD) genannt. Beide Größen stehen in einem Zusammenhang. Abb. 5 zeigt, wie schon bei geringfügigen Abweichungen von der mittleren Beurteilung „neutral“ (= 0) der Prozentsatz der mit den thermischen Verhältnissen Unzufriedenen ansteigt, aber auch bei der mittleren Beurteilung „neutral“ sind 5 % der Betroffenen unzufrieden.

Richtwerte für die Einstellung von Klimaanlage lassen sich nur aus einer großen Zahl von Versuchen an Menschen unter den verschiedensten experimentellen Bedingungen aufstellen. Dabei sind 6 Größen zu variieren:

1. Lufttemperatur
2. Strahlungstemperatur
3. Luftbewegung
4. Luftfeuchte
5. Isolationswirkung der Kleidung
6. Wärmebildung des Menschen (im allg. der Energieumsatz).

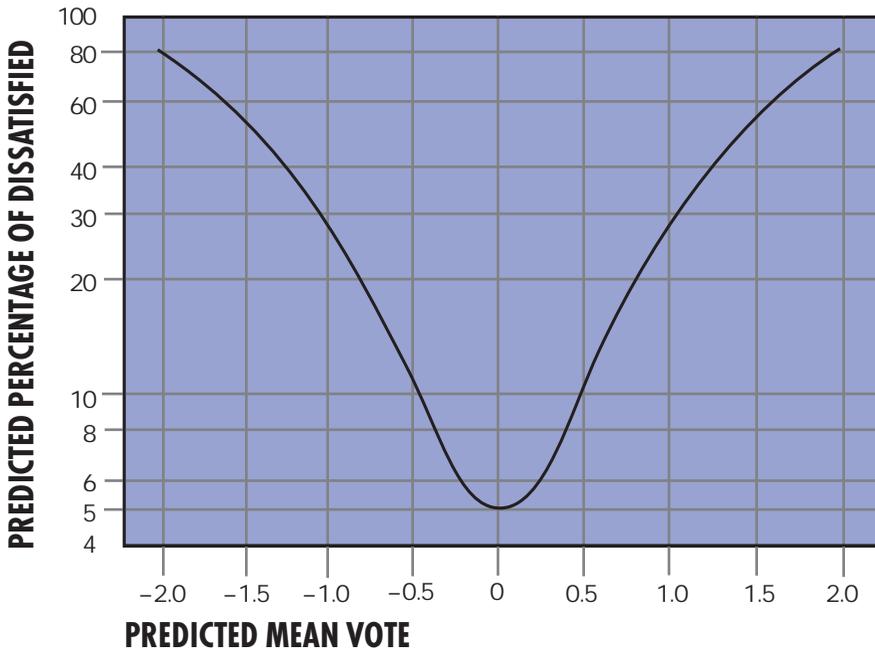


Abb. 5: Prozentsatz der mit den Klimabedingungen Unzufriedenen (predicted percentage of dissatisfied, PPD, Ordinate) als Funktion der mittleren Klimaeneinschätzung (predicted mean vote, PMV, Abszisse, -2 = kühl, -1 = leicht kühl, 0 = neutral, 1 = leicht warm, 2 = warm). Aus Fanger (1973)

Für die beiden zuletzt genannten Größen haben sich anschauliche Maßeinheiten eingebürgert: die Einheit „clo“ für die Isolation der Kleidung und „met“ für den Energieumsatz:

$$1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}, 1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$$

Diese Zahlenwerte entsprechen der Isolationswirkung eines leichten Straßenanzuges und dem Energieumsatz bei sitzender Tätigkeit. Folglich beträgt die Wärmeabgabe eines erwachsenen Menschen bei sitzender Tätigkeit etwa 100 W.

Fanger hat durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen für die Kombination der verschiedensten Werte der genannten 6 Variablen „Behaglichkeitsgleichungen“ aufgestellt und in Kurven dargestellt. Dabei werden jeweils 3 der Variablen konstant angenommen, und die verbleibenden in ihrem funktionellen Zusammenhang dargestellt. Diese Kurven sind eine gute Grundlage, Richtwerte für die Einstellung der Klimaanlage zu finden. Abb. 6 gibt ein Beispiel, bei dem die Isolation der Kleidung, der Energieumsatz und die rel. Luftfeuchtigkeit mit den für Büroarbeitsplätze typischen Werten (1 clo, 1 met, 50 % r.F.) als konstant angesehen werden. Die eingetragenen Kurven verbinden Werte von Luft- und Strahlungstemperatur, die bei der angegebenen Windgeschwindigkeit von der Mehrzahl der Probanden als „behaglich“ eingestuft wurden. Der als Beispiel 1 eingezeichnete Punkt gibt die Lufttemperatur = Strahlungstemperatur an, für die PMV = 0 ist (23 °C), Beispiel 3 gibt die Lufttemperatur an, die eingestellt werden muß, wenn die Differenz zur Strahlungstemperatur 5 °C beträgt (z.B. im Winter bei schlechter Isolation der Wände) (26 °C). In Abb. 7 sind Luftgeschwindigkeit und relative Feuchte konstant gehalten, die Behaglichkeitswerte sind als Funktion des Wärme-widerstandes der Kleidung für verschiedene Aktivitätsgrade aufgetragen. Diese Kurven reichen aus, die Richtwerte für die Klimaanlage eines Bürogebäudes zu finden (wenn man die Luftgeschwindigkeit stets < 0,1 m/s wählt), weil die Luftfeuchtigkeit dann nur einen sehr geringen Einfluß auf die Behaglichkeitstemperatur hat. Man erkennt aber auch die erhebliche Bedeutung der Kleidung. Ein Unterschied um 0,5 clo (entsprechend etwa dem Unterschied zwischen einem leichten Sommeranzug und einem durchschnittlichen Straßenanzug) würde bei sitzender Beschäftigung eine Differenz von ca. 3 °C in der Komforttemperatur bedeuten.

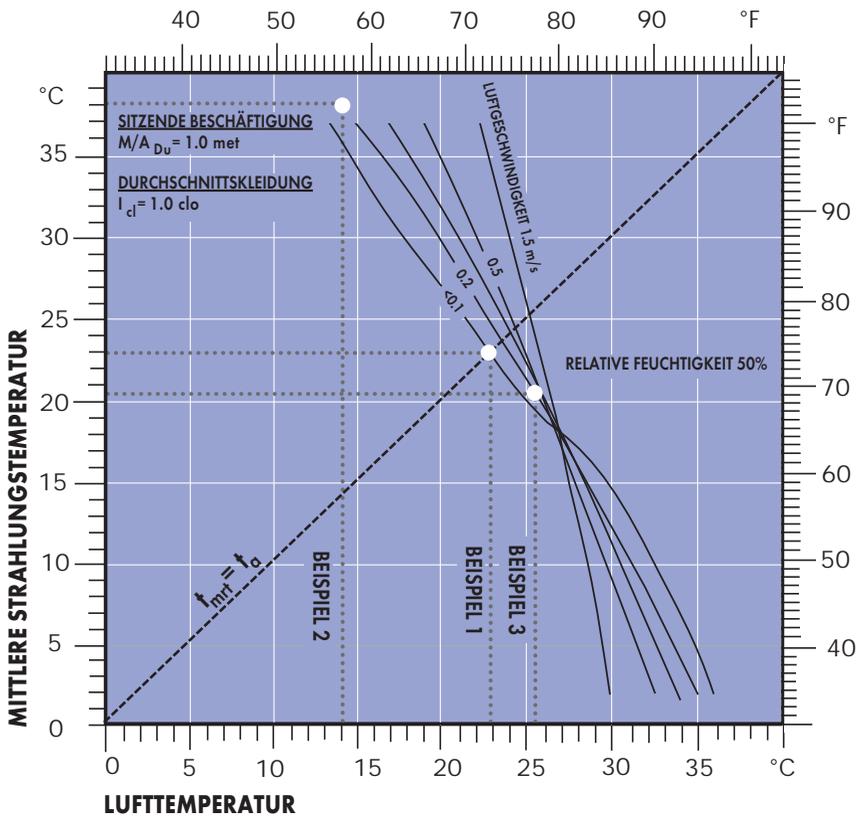


Abb. 6: Komfortdiagramm für den Einfluß von Luft- und Strahlungstemperatur und Luftgeschwindigkeit bei 50 % rel. Feuchte, gültig für Personen mit sitzender Tätigkeit (Energieumsatz 1 met) und mittlerer Kleidung (1 clo).
Aus Fanger (1973).

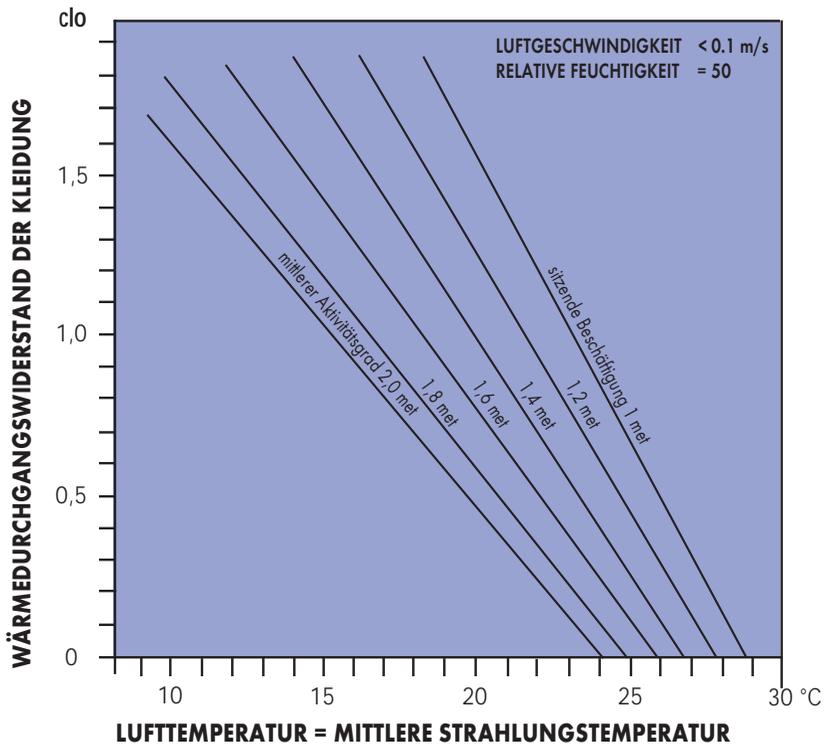


Abb. 7: Komfortdiagramm für den Einfluß des Wärmewiderstandes der Kleidung auf die Behaglichkeitstemperatur.
Nach Fanger (1973).

Klimatechnische Probleme, deren Hauptursache nicht die Klimaanlage, sondern der Raum ist, treten besonders in modernen Geschäfts-, Verwaltungs- und Schulgebäuden auf. Sie sind so gravierend, daß man die ganze Problematik das „Sick Building Syndrom“ nennt. Solche Gebäude haben, verglichen mit älteren Gebäuden, drei wesentliche Nachteile:

1. Der Anteil der Fensterflächen an der gesamten Fassadenfläche ist sehr hoch.
2. Wegen der Leichtbauweise ist die Wärmekapazität der Wände gering.
3. Die Fenster können meistens nicht geöffnet werden.

Die beiden ersten Punkte beeinflussen das Raumklima direkt. Das Hauptproblem sind die großen Fensterflächen, die meistens eine größere Wärmeleitfähigkeit haben als die Wände: $1,5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ für eine 24 cm Ziegelwand, bis etwa 0,6 bei zusätzlicher Isolation, $2,8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ für Doppelverglasung, bei Isolierverglasung bis etwa 2,0. Daher sind im Winter die Fensterflächen kälter als die Außenwände. Die über diese Fensterflächen ab- oder einstrahlende mit dem Sonnenschein wechselnde Wärme führt nicht nur zu relativ raschen Änderungen der Lufttemperatur im Raum, sondern auch zu zeitlichen und örtlichen Unterschieden in der Oberflächentemperatur der Raumumkleidung, der Strahlungstemperatur. Die geringe Wärmekapazität der Wände begünstigt räumliche und zeitliche Schwankungen der Strahlungstemperatur und der Lufttemperatur. Diese Schwierigkeiten sind nur durch eine Klimaanlage (und manchmal nicht ohne Kompromisse) zu beherrschen. Alte Gebäude mit ihren kleinen Fensterflächen, ihrem massiven Mauerwerk und der Möglichkeit, die Fenster zu öffnen, benötigen in unseren Breiten wohl eine Heizung, kaum aber eine Klimaanlage.

Bei der Beurteilung des Klimas geht man im Regelfall von räumlichen Mittelwerten der Luft- und Strahlungstemperatur aus. Eine solche Berechnung ist zwar für die Beurteilung der Richtwerte der Klimaanlage richtig, sie bietet aber nicht die Gewähr, daß alle in einem Bürogebäude beschäftigten Mitarbeiter unter

thermischen Komfortbedingungen arbeiten. Erhebliche räumliche und zeitliche Schwankungen der Strahlungstemperatur in einem Bürogebäude sind durch keine Klimaanlage ganz befriedigend zu kompensieren, der Prozentsatz der Unzufriedenen wird trotz optimaler mittlerer Einstellung der Klimaanlage mehr oder weniger über 5 % liegen. Das Problem läßt sich in manchen Gebäuden auch mit anderen Mitteln nicht vollständig in den Griff bekommen, wenn auch gute Wärmeschutzgläser und Außenjalousien den Zustand wesentlich verbessern können. Außerdem können bei Fenstern mit schlechter Wärmedämmung im Winter nicht nur erhebliche Belastungen durch die Strahlungswärme auftreten, es können sich auch Konvektionsströmungen der vor dem Fenster abkühlenden Luft ausbilden, die dann im Fußbodenbereich abfließen und Anlaß für Zugerscheinungen sind. Raumbedingte Zuglufterscheinungen können auch durch undichte Außenwände (meist an den Fenstern und Türen) entstehen; sie lassen sich relativ einfach mit einer Rauchquelle aufspüren. Gelegentlich wird es kaum vermeidbar sein, Arbeitsplätze aus solchen klimatisch ungünstigen Bereichen (Fenster Nähe) zu entfernen und den Arbeitsbereich des Raumes zu beschränken.

Trotz allem ist es sicher nicht ganz richtig, wenn man glaubt, die alten Heiz- und Baumethoden seien in allen Belangen besser als der heutige Zustand. Die relative Größe der Behaglichkeitszone, also des Anteils am Raum, in dem komfortable Temperaturen erzielt werden können, hat ganz sicher im Laufe der Entwicklung vom Kohleofen und der Einfachverglasung über die Zentralheizung bei Doppelverglasung bis zur Klimaanlage und Isolierverglasung erheblich zugenommen.

4 Die Klimaanlage

Die Aufgabe einer modernen Klimaanlage ist es, die Raumtemperatur und die Luftfeuchtigkeit nach beiden Richtungen zu regeln und möglichst konstant zu halten und für die nötige Frischluft zu sorgen. Sie soll gleichzeitig energetisch wirtschaftlich arbeiten. Eine solche Anlage muß also heizen, kühlen und die Luft befeuchten und filtern. Sie muß ferner einen Teil der Luft umwälzen, während ein anderer Teil der Luft durch Außenluft ersetzt werden muß. Dabei stellt die Regelung der Temperaturen in der Klimaanlage heute wohl kein wesentliches Problem mehr dar, Anhaltspunkte für die richtige Einstellung liefern die Komfortdiagramme von Fanger. Die relative Luftfeuchtigkeit soll möglichst im Bereich von 50 bis 65 % liegen, bei hohen Temperaturen an der unteren Grenze. Bei ausreichend dimensionierten Klimaanlagen können entsprechende Werte ohne weiteres eingehalten werden. Wird trotzdem über „trockene“ Schleimhäute oder Augen geklagt, so liegt dies meistens an zu hohen Luftgeschwindigkeiten oder an Verunreinigungen der Luft. Das Auftreten von elektrostatischen Aufladungen, insbesondere im Zusammenhang mit Textil- oder Kunststoffbodenbelägen, ist ein deutlicher Indikator dafür, daß die relative Luftfeuchtigkeit unter 50 % liegt und zu gering ist.

Die häufig gehörte Klage, daß in klimatisierten Räumen die Fenster nicht zu öffnen sind, ist sicher zum Teil ein psychologisches Problem, darum aber nicht weniger wichtig. Wahrscheinlich bereitet es dem Menschen Schwierigkeiten, sein individuelles (nicht nur thermoregulatorisches) Verhalten einem kollektiven Verhalten unterzuordnen. Wo es die Gegebenheiten zulassen, sollte man das Öffnen der Fenster ermöglichen, wobei dann die Klimaanlage in dem betreffenden Bereich während dieser Zeit abgeschaltet werden muß.

Die wichtigsten Probleme liegen in der Luftumwälzung, die sowohl aus Gründen der Frischluftzufuhr als auch zur Erhaltung der Temperaturkonstanz notwendig ist. Fehler in diesem Bereich der Anlage sind wahrscheinlich die Hauptursache der Klagen. Sie lassen sich auf zwei Problemkreise reduzieren: Mangelnde Luftqualität und Zuglufterscheinungen wegen zu hoher Luftgeschwindigkeit.

4.1 Frischluftbedarf und Luftqualität

Der Frischluftbedarf ergibt sich aus der Zahl der im Raum beschäftigten Personen und deren Energieumsatz. Er kann erheblich größer werden, wenn in dem Raum geraucht wird. Ein Anhalt für den Bedarf ist der CO_2 Gehalt der Luft. Luft in der freien Natur enthält 0,03 % CO_2 , der Grenzwert für eine zumutbare Luftqualität wird mit 0,15 % angenommen, weil dann in aller Regel auch der Gehalt der Luft an anderen schädlichen oder zumindest unangenehmen Stoffen zu hoch wird. Die Luft wird als stickig empfunden.

Ein Mensch erzeugt bei sitzender Beschäftigung ca. 15 l/h CO_2 . Es müssen also pro Person mindestens 10 000 l/h = 10 m³/h Frischluft zugeführt werden. Die diesbezüglichen Regelungen liegen höher, weil der Mensch nur zu etwa 25 bis 30 % zur gesamten Luftverunreinigung beiträgt (siehe unten). Die Norm DIN 1946 legt 40 bzw. 60 m³ pro Stunde und Person fest, der höhere Wert gilt für Großraumbüros. Der Sauerstoffanteil der Luft spielt hingegen praktisch keine Rolle, weil sich der normale Gehalt (21 %) durch die Sauerstoffaufnahme der Menschen nur etwa um den gleichen Prozentsatz ändern kann wie der CO_2 Gehalt; solche geringfügigen Änderungen spielen aber für die Sauerstoffaufnahme keine Rolle, sie sind z.B. wesentlich geringer als die durch Luftdruckunterschiede bedingten Änderungen bei einer Reise von Hamburg nach München.

Die Beurteilung der Raumluftqualität aufgrund der CO_2 Konzentration ist in vielen Fällen unbefriedigend. Trotz relativ niedriger Werte wird die schlechte Luftqualität oft bemängelt. Häufig geben auch alle anderen chemischen Analysen keinen Anhalt, was wegen der riesigen Zahl der möglichen Stoffe, die zur „stickigen“ Luft beitragen, nicht verwunderlich ist. Der Maßstab für die Luftqualität ist in solchen Fällen der Mensch, der in dem Raum arbeitet. Fanger (1987) hat deswegen in einer großen Zahl von Feldstudien den Versuch unternommen, das Problem durch subjektive Beurteilung der Luftqualität zu lösen, ausgehend von der Annahme, daß der menschliche Geruchssinn für dieses Problem der chemischen Analyse überlegen sei, vor allem dann, wenn nicht nur eine Substanz, sondern deren viele die Qualität der Luft vermindern. Als Grundeinheit der Geruchsintensität definiert er den Geruch, der von einer ruhenden Standardperson bei thermischem Komfort ausgeht. Diese Einheit nennt er „olf“ (von olfaction). Durch etwa 200 Beurteiler beiderlei Geschlechtes ließ er 20 technisch belüftete Büro- und Versammlungsräume

testen, die vorher nicht durch schlechte Luftqualität aufgefallen waren. Alle Räume wurden dreimal beurteilt: unbesetzt und nicht belüftet, unbesetzt und belüftet und besetzt und belüftet. Aufgrund dieser Versuche konnten die Anteile der Luftverunreinigung, die vom Raum selbst, von der Klimaanlage und von den Menschen verursacht waren, getrennt geschätzt werden. Das Ergebnis ist in Abb. 8 dargestellt. Im Mittel wurden in den leeren und nicht belüfteten Räumen 58 olf geschätzt. Durch die Belüftung kamen 62 olf dazu und durch die Besetzung mit durchschnittlich 17 Personen, darunter 5 Rauchern, weitere 42 olf. Jeder Raucher lieferte also 6 olf.

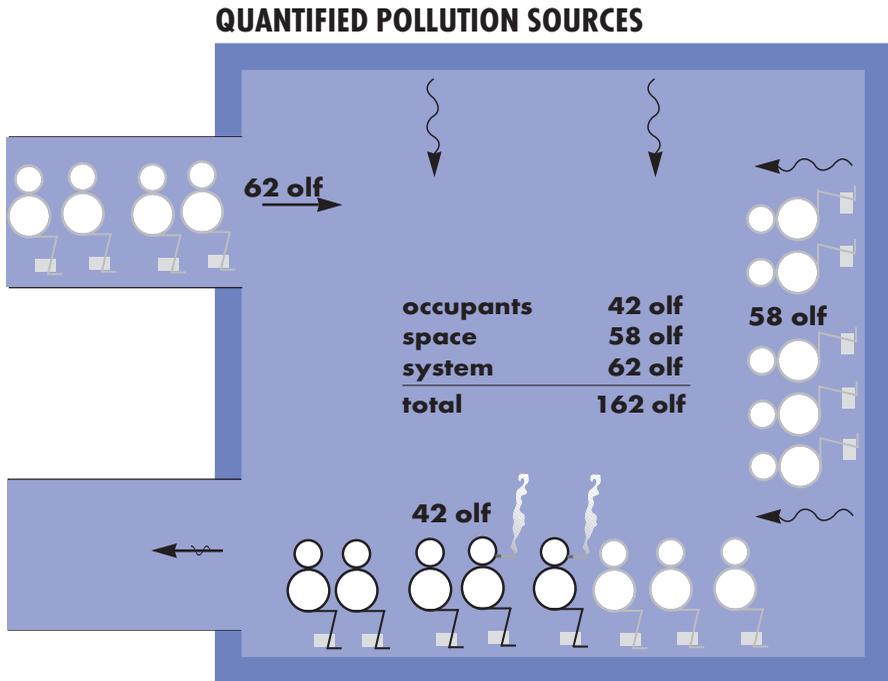


Abb. 8: Mittelwerte für die Quellen der Luftverunreinigung in 20 Büro- und Versammlungsräumen in Kopenhagen, die vorher nicht durch schlechte Luftqualität aufgefallen waren. Mittlere Größe der Räume 210 m², besetzt mit durchschnittlich 17 Personen, davon 5 Raucher. Aus Fanger (1987).

Die Ergebnisse zeigen, daß neben Raum und Mensch die Klimaanlage selbst eine wichtige Emissionsquelle sein kann, entweder direkt oder durch Beimischung von schlechter Zuluft. Bei den untersuchten Räumen trugen im Mittel der Raum, die Klimaanlage und die Menschen jeweils zu etwa einem Drittel zur Verschlechterung der Luftqualität bei. Im Einzelfall können aber die Anteile sehr unterschiedlich sein. Emissionsquellen sind z.B. auch verschmutzte Luftkanäle der Anlage, feuchte Stellen im Gebäude, oder Ausgasungen von Möbeln und Akten.

Selbstverständlich ist die subjektive Beurteilung der Luftqualität allein nicht ausreichend. Das Vorkommen schädlicher Gase, Dämpfe und Stäube muß ausgeschlossen sein. Insbesondere muß schon bauseitig die Verwendung von Materialien unterbleiben, die gesundheitsschädliche Stoffe wie z.B. Formaldehyd, Radon, Dioxine oder Asbestfeinstaub an die Raumluft abgeben können.

4.2 Luftführung

Für Klimaanlagen gibt es verschiedene Luftführungssysteme (LFS).

Beim tangentialen LFS (Abb. 9a) strömt die Luft tangential an Umschließungsflächen des Raumes entlang. Dabei bildet sich im Schnittbild meistens eine walzenförmige Luftbewegung aus, mit Zonen unterschiedlicher Lufttemperatur und Luftqualität. Im Bereich der Stagnationszone ist die Luft schlechter als im Strömungsbereich. Der Nachteil dieses Systems ist, daß sich die Köpfe der Beschäftigten häufig in der Stagnationszone befinden. Bei großen Räumen kann sich neben der Primärwalze durch thermische Konvektion eine Sekundärwalze ausbilden (Abb. 9b), wenn die zugeführte Warmluft sich abkühlt und absinkt, bevor sie die gegenüberliegende Raumseite erreicht hat. Im Bereich der Sekundärwalze erfüllt die Klimaanlage ihre Funktion nur sehr mangelhaft. Weitere Nachteile dieser Luftführung sind vor allem senkrechte Temperaturgradienten und Zuglufterscheinungen, weil die abfließende Abluft kälter ist als die Zuluft und weil die Luftgeschwindigkeit im Bereich der Walze zu groß sein kann. Auch kann die Möblierung ein solches System erheblich stören.

Beim diffusen LFS befinden sich die Luftenlässe oberhalb der Aufenthaltszone, so daß die strömende Luft bei Erreichen dieser Zone nur noch eine geringe Geschwindigkeit hat und keine Zuglufterscheinungen verursacht. Die Luftströmung in der Aufenthaltszone ist dann diffus, und Zuglufterscheinungen treten nur bei Fehlern in der Anlage auf.

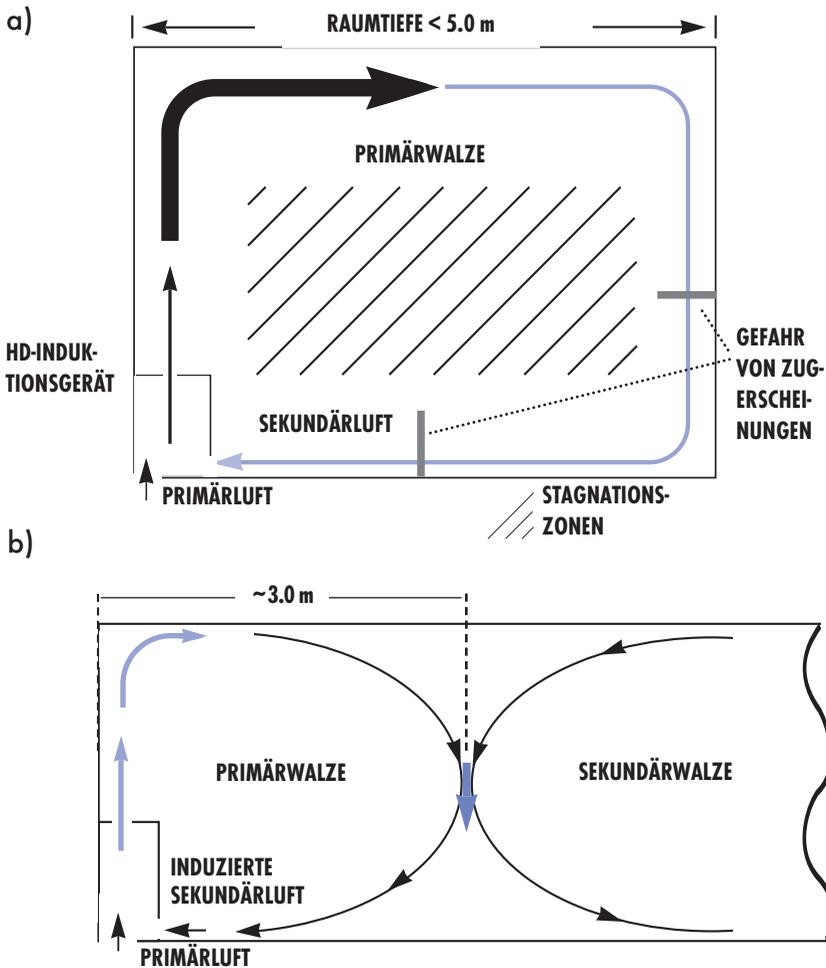


Abb. 9: Luftströmung bei einem tangentialen Luftführungssystem.
 a) In einem Raum bis zu etwa 5 m Tiefe bildet sich eine walzenförmige Luftbewegung (Primärwalze) mit Stagnationszone und Zugluftbereichen.
 b) In großen Räumen kann eine Sekundärwalze entstehen, wenn die Luft der Primärwalze abkühlt, bevor sie die gegenüberliegende Wand erreicht.
 Aus Moog (1986).

Für den thermischen Komfort ist die Geschwindigkeit der Luftbewegung eine entscheidende Größe. Sie sollte, auch aus hygienischen Gründen, an keinem Ort des Aufenthaltsbereiches mehr als 0,1 m/s betragen. Wegen der räumlich unterschiedlichen Verteilung der Luftströmung muß man die Geschwindigkeit an vielen Stellen im Raum messen. Dabei kann auch eine Rauchprobe nützlich sein, um versteckte Luftströmungen aufzufinden. Die Meßgeräte müssen sehr rasch reagieren und empfindlich sein, um auch turbulente und zeitlich inkonstante Luftbewegungen zu erfassen. Geeignet sind vor allem thermische Anemometer, bei denen ein dünner elektrisch beheizter Widerstandsdraht durch die bewegte Luft abgekühlt wird. Die dadurch bewirkte Widerstandsänderung ist ein Maß für die Luftgeschwindigkeit. Bei diesen Geräten ist zu beachten, daß sie relativ schwer zu kalibrieren sind und daß bei vielen Konstruktionen die Empfindlichkeit von der Strömungsrichtung der Luft abhängig ist.

4.3 Die Klimaanlage als Ursache von Luftverunreinigungen

Eine einwandfrei errichtete und gewartete Klimaanlage trägt nicht zur Luftverunreinigung bei. Bei einer solchen Anlage wird die Außenluft an einer durch Schadstoffe möglichst wenig belasteten Stelle entnommen, nahe der Entnahmestelle gefiltert und der Umluft beigemischt. Weitere Filter sowie Heiz- und Kühlelemente und die Luftbefeuchtung sind im Umluftkreislauf angeordnet. Die hinsichtlich der Luftqualität besonders kritischen Stellen sind die Filter und die Befeuchtungsanlage, aber auch die Kühlanlage und die Kanäle. Alle diese Teile müssen leicht zugänglich angelegt werden, damit sie regelmäßig kontrolliert und gewartet werden können. Besondere Sorgfalt ist dabei der Luftbefeuchtung zu widmen. Umlaufsprühbefeuchter, wie sie in alten Anlagen noch vorkommen, sollten durch Verdampfungssysteme ersetzt werden. Das feuchtwarme Milieu in Sprühbefeuchtern ist ein ideales Klima für die Ansiedlung von Mikroorganismen aller Art, von pathogenen Keimen (Legionärskrankheit) bis zu Schimmelpilzen und Algen. Ein großer Teil dieser Mikroorganismen spielt als Allergen eine wichtige Rolle (Montagsfieber, Befeuchterfieber). Viele der Mikroorganismen tragen auch durch muffigen Geruch zur Verschlechterung der subjektiv wahrnehmbaren Luftqualität bei. Ähnliche

Probleme treten am Kühlsystem durch kondensierende Luftfeuchtigkeit auf. Beim Dampfbefeuchter besteht kein Rücklauf von Wasser aus der Befeuchtungskammer in das Reservoir, das Wasserbecken wird daher relativ gut keimfrei erhalten. Trotzdem können natürlich auch beim Verdampfersystem an feuchtwarmen Stellen innerhalb der Befeuchtungsstrecke Keime auftreten und sich vermehren. In jedem Falle muß die Wasserqualität häufig überprüft werden. Umlaufwasser in der Befeuchteranlage soll Trinkwasserqualität haben. Die Beimischung von Desodorantien ist nicht erlaubt. Die ganze Anlage ist regelmäßig zu warten und gründlich zu reinigen. Desinfektionsmittel, die bei der Reinigung verwendet wurden, müssen gründlich ausgespült werden. Zur regelmäßigen Wartung gehören auch die Reinigung oder Erneuerung der Filter und die Reinigung der Luftkanäle.

5 **Schlußfolgerungen**

Klimaanlagen wären in unseren Breiten bei konventioneller Bauweise entbehrlich. Bei den aus Flächenmangel häufig unvermeidbaren Leichtbauweisen mit ihren großen Fensterflächen und Wänden mit geringer Wärmekapazität sind sie aber notwendig. Beschwerden über die Klimaanlage sind daher häufig durch die Bauweise bedingt.

Komfortempfinden, gesundheitliches Wohlergehen und damit auch die Leistung der Mitarbeiter hängen wesentlich von den Klimabedingungen und der Luftqualität im Büroraum ab. Wegen individueller Unterschiede in der thermischen Empfindlichkeit, im Energieumsatz und in der Isolationswirkung der Kleidung ist auch im Idealfall nicht damit zu rechnen, alle Mitarbeiter zufriedenzustellen. Kleinere Abweichungen vom thermischen Komfort können aber von den Mitarbeitern durch entsprechende Wahl der Kleidung behoben werden. Die Hauptprobleme treten in Verbindung mit der Luftbewegung und der Luftbefeuchtung auf. Durch die Wahl geeigneter Systeme und durch sorgfältige Wartung lassen sich jedoch viele negative Auswirkungen vermeiden.

Bleichert, A. (1977):

Hitze und Arbeit. Hamb. Ärztebl. 31, 440-443

Bleichert, A., Behling, K., Scarperi, M., Scarperi, S. (1972):

Thermoregulatory behavior of man during rest and exercise. Pflüg. Arch. 338, 303-312

DIN 1946 Teil 2

„Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI Lüftungsregeln)“ (Ausgabe 1994)

Fanger, P.O. (1973):

Assesment of man's thermal comfort in practice.
Brit. J. Industrial Med. 30, 313-324

Fanger, P.O. (1987):

Solution of the sick building mystery. Proc. of indoor air,
Berlin Bd. 4, 49-55

Kitzing, J., Behling, K., Bleichert, A., Scarperi, M., Scarperi, S. (1971):

Antriebe und effektorische Maßnahmen der Thermoregulation bei Ruhe und während körperlicher Arbeit.
Int. Z. angew. Physiol. 30, 119-131 (1971)

Kröling, P. (1985):

Gesundheits- und Befindensstörungen in klimatisierten Gebäuden.
Zuckschwerdt-Verlag, München.

Moog, W. (1986):

Erfassung von Raumströmungen. In „Klima und Luft“, herausgegeben vom Inst. f. angew. Arbeitswissenschaften. Wirtschaftsverlag Bachem, Köln.

Weitere Information zu dem Thema enthält auch „Die große Büroserie“.

Herausgeber:

VBG



Verwaltungs-Berufsgenossenschaft
Deelbögenkamp 4
22297 Hamburg
Postanschrift: 22281 Hamburg

Verfasser:

Prof. Dr. med. A. Bleichert
Lenhartzstraße 10, 20249 Hamburg

Druck:

C.L. Rautenberg-Druck
Königstraße 41 - 25348 Glückstadt
Ausgabe: September 1997