

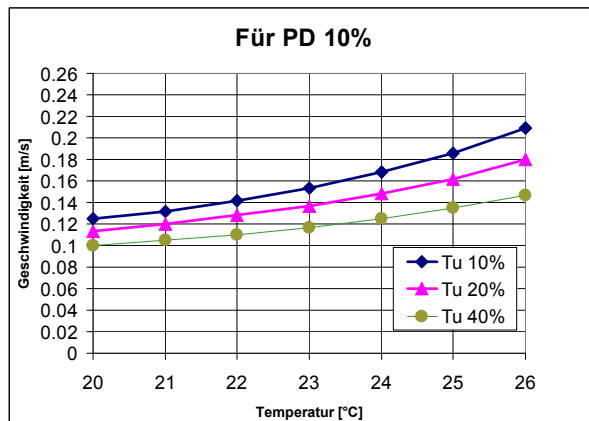
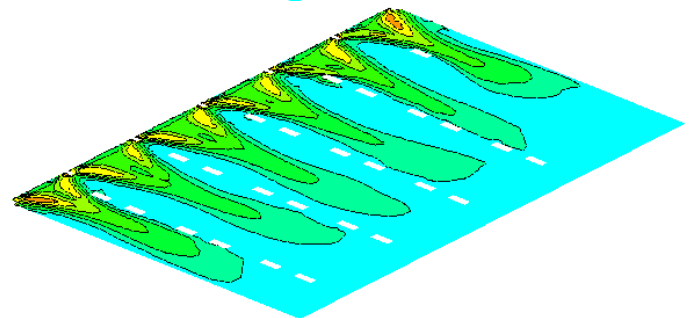
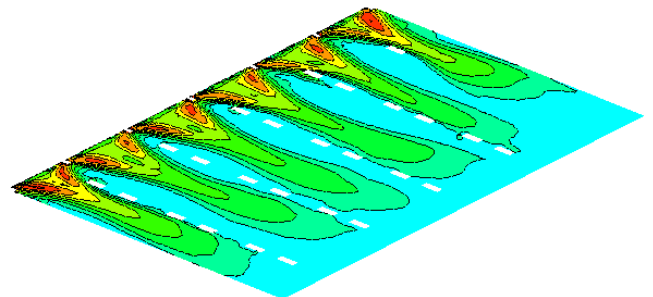
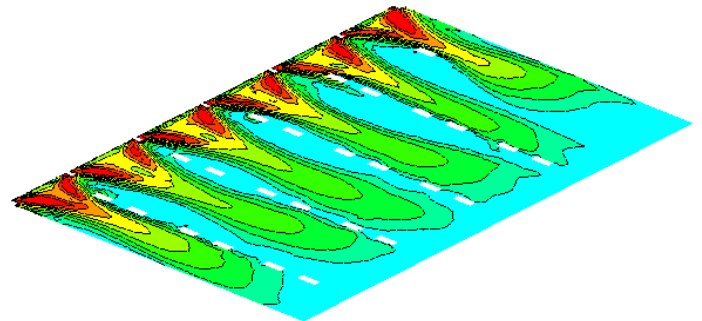
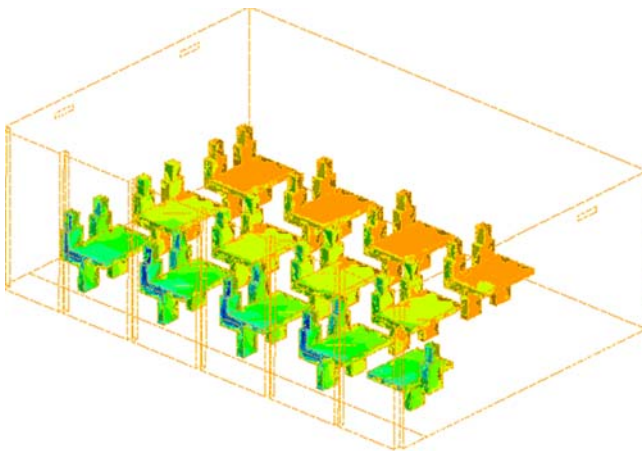


Komfortuntersuchungen an Schulbauten mit hohem Glasanteil

Projekt 04-001

Anhang C Komfortparameter

Berichtversion 1.2, 15. November 2004



Komfortuntersuchungen an Schulbauten mit hohem Glasanteil

Projekt 04-001

Anhang C Komfortparameter

Berichtversion 1.1, 29. November 2004

Adressen Auftraggeber

Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Lindenhofstr. 21, 8021 Zürich, www.hbd.stzh.ch

Dr. Heinrich Gugerli Fachstelle nachhaltiges Bauen,
Tel. 01 216 26 81, Fax 01 270 92 78, heinrich.gugerli@hbd.stzh.ch

Werner Kälin Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik.
Tel. 01 216 21 73, Fax 01 270 95 40, werner.kaelin@hbd.stzh.ch

Bearbeitung / Autor:

Dr. Alois Schälín Air Flow Consulting, Weinbergstr. 72, 8006 Zürich
Tel. 01-350-3595, Fax 01-350-3596; schaelin@afc.ch

Das Titelbild zeigt einige Komfortdarstellungen aus dem Hauptbericht und Anhang B..

Umfang Dokumentation

Merkblatt

Bericht 2.5 Komfortuntersuchungen

 Anhang A Messungen Komfort

 Anhang B Strömungsberechnungen

 Anhang C Bestimmungsparameter Komfort

Inhalt

1 Einleitung.....	1
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Lage im Raum	1
1.3 Schwellwert für Akzeptanz.....	2
1.4 Zur Komfortbewertung.....	3
2 Thermischer Komfort nach Fanger: PMV und PPD	4
3 Komfort aufgrund Luftzug nach Fanger: PD.....	7
4 Weitere Aspekte des thermischen Komfortes	10
4.1 Temperaturgradient der Luft.....	10
4.2 Strahlungsasymmetrie.....	11
4.3 Bodentemperatur allein, beim Tragen von Hausschuhen.....	11
Literatur	11

1 Einleitung

1.1 Einleitung

Die Komfortbewertung auf Basis statistischer Auswertungen hat schon eine über 30-jährige Geschichte und geht auf die PMV/PPD-Bewertung nach ASHRAE zurück (Parameter: Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Geschwindigkeit, Bekleidung, Tätigkeit, Feuchte), aus der Zeit vor Fanger (Abschnitt 2). Diese ist relativ einfach zu erfüllen.

Fanger hat wesentliche Erweiterungen entwickelt, vor allem die Berücksichtigung von Luftgeschwindigkeit, Turbulenz und Lufttemperatur in der PD-Skala für Luftzugsrisiko (Abschnitt 3), die zusätzlich bewertet werden muss und strenger zu erfüllen ist als die PPD-Anforderung.

Weitere Komfortanforderungen sind vertikaler Gradient, Strahlungsasymmetrie u.a. (siehe Abschnitt 4).

Generell müssen alle Komfortbedingungen im Bereich des ganzen Körpers eingehalten werden, d.h. an Füßen, Beinen, Rumpf und Kopf, auch wenn dies nicht explizit erwähnt wird. Verschiedene Körperpartien sind jedoch unterschiedlich empfindlich auf Zug (siehe Bild xx).

Bezüglich Kaltluftabfall sind die Füße klar am kritischsten, weil im Fussbereich die tiefsten Temperaturen und die höchsten Geschwindigkeiten auftreten.

1.2 Lage im Raum

Aufenthaltsbereich nach SIA 382/1 (2004)

Die Komfortanforderungen müssen im Aufenthaltsbereich nach SIA 382/1 (2004) gewährleistet werden, für jeden Platz **einzel**n, besonders auch die randnahen Plätze, s. Bild 1.

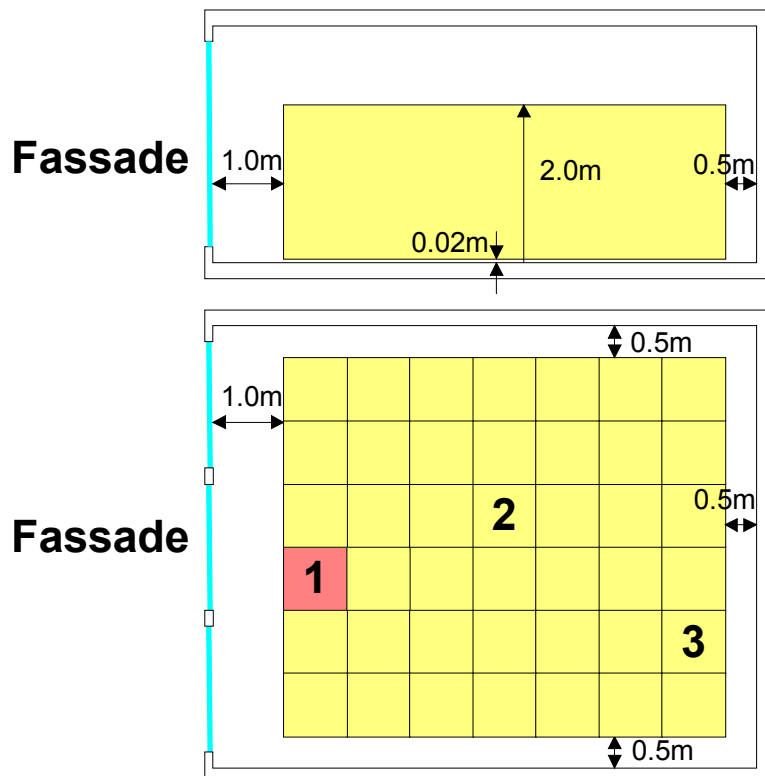


Bild 1: Aufenthaltszone für Komfortbedingungen mit Beispielpätzen 1, 2 und 3, nach SIA 382/1 (2004). Oben: Schnitt, unten Grundriss. Platz 1 ist wegen der Nähe zum Fenster am meisten gefährdet.

1.3 Schwellwert für Akzeptanz

Der Knackpunkt bei allen Komfortbewertungen ist aber die Frage des Massstabes, d.h. welcher Prozentsatz unzufriedener Personen akzeptiert wird, oder wo eben der Schwellwert gelegt wird.

Bekanntlich ist es ja nicht möglich, aufgrund unterschiedlicher Empfindungen von „warm“ und „kalt“ alle Personen zufriedenzustellen; dies ist im theoretischen Optimum, bzw. des Minimums des PPDs oder PDs von 5% (und nicht 0%) berücksichtigt.

Im CEN Report CR 1752 ist folgender Vorschlag mit 3 Komfortklassen A, B und C enthalten:

Komfort-kategorie	PPD (Wärme-zustand)	PD (Luft-zugsrisiko)	PD (Vert. Gradient)	PD (Warmer/Kalter Boden)	PD (Strahlungs-asymmetrie)
A (hoch)	< 6%	< 15%	< 3%	< 10%	< 5%
B (mittel)	< 10%	< 20%	< 5%	< 10%	< 5%
C (tief)	< 15%	< 25%	< 10%	< 15%	< 10%

Tabelle 1: Komfortklassen nach CR 1752.

Für die SIA-Norm 382/1 von 1999 wurde für höchste Ansprüche (z.B. Bürotätigkeit) ein **PD-Wert von 10%** angesetzt.

Dies ist eine **strengere Anforderung** als nach dem CEN-Vorschlag, der ebenfalls für das SIA-Merkblatt 2021 übernommen wurde.

Der Grund für die strengere Anforderung liegt in der folgenden Überlegung:

Ein PD von 15% bedeutet, dass 3 von 20 Personen sich beklagen (oder 15 von 100). Dies ist ein hoher Wert, der von den meisten Bauherren nicht erwünscht ist. 10% heisst: 2 von 20 (oder 10 von 100) beklagen sich und ist ein wesentlich besserer Wert, faktisch sogar „doppelt so gut“, wenn man bedenkt, dass ein besseres Ergebnis als 5% gar nicht erzielt werden kann (5% sind immer unzufrieden).

Im Entwurf der neuen SIA-Norm 382/1 (Juli 2004 in der Vernehmlassung) wird neu ein **PD-Wert von 13%** als Akzeptanzkriterium für höchste Ansprüche vorgeschlagen, als Kompromiss, da es oft sehr schwierig ist, ein PD von 10% zu erreichen.

Die SIA 180 (von 1999) hat hingegen nur einen relativ schlechten Wert von PD=20% gefordert. Dieser kann für natürliche Lüftung gelten, da grössere Luftgeschwindigkeit kaum zu vermeiden sind.

Die unterschiedlichen Schwellwerte für die Komfortklassen der weiteren Parameter (s. Kolonnen rechts in Tabelle 1) wurden vermutlich deswegen so gewählt, da die einen Bedingungen schwieriger, die andern leichter einzuhalten sind. Für den 10%-Bereich des PD aufgrund warmem oder kaltem Boden ist das Temperaturfenster schmal, nämlich zwischen 19°C und 28°C (siehe Abbildung 4.4).

1.4 Zur Komfortbewertung

Der Komfort wird von verschiedenen Faktoren wie Luftzug, Temperatur usw. beeinflusst, die durch verschiedene Formeln oder Diagrammen dargestellt werden. Primär wird wie in SIA 2021 die PD-Skala für Luftzugsrisiko (PD = Prozentsatz unzufriedener Personen) herangezogen zur Komfortbewertung, da diese Bedingung am kritischsten ist.

Es wurden Komfortstufen 1-4 von 10%, 15%, 20%, 25% definiert. Für **gute Komfortqualität wird Komfortstufe 1 (PD <10%) empfohlen**. Der bestmögliche Wert ist 5% (da niemals alle zufriedenzustellen sind).

Ich schlage hier folgende Komfortbewertung vor, wobei nur der PD aufgrund Luftzug im vorliegenden Fall von Bedeutung ist, da die andern Komfortparameter problemlos eingehalten werden können:

Komfortstufe	PPD (Wärmezustand)	PD (Luftzugsrisiko)	PD (Vert. Gradient)	PD (Warmer/Kalter Boden)	PD (Strahlungsasymmetrie)
1 Sehr gut	< 6%	< 10%	< 3%	< 10%	< 5%
2 Mittel/gut	< 8%	10–15%	< 3%	< 10%	< 5%
3 Mässig	< 10%	15–20%	< 5%	< 10%	< 5%
4 Tief	< 15%	>20%	< 10%	< 15%	< 10%

Tabelle 2: Vorschlag Komfortklassen.

Man kann nun darüber diskutieren, ob in einem Schulzimmer die höchste Komfortstufe, die man sicher einem Büroarbeitsplatz zugesteht, gewährleistet werden soll, oder nur die zweithöchste (mit der Bemerkung, dass die Schüler selten ruhig sitzen).

Tatsache ist sicher, dass der Lehrerarbeitsplatz meist in Fensternähe angeordnet ist und dass die Lehrer oder der Lehrerin wahrscheinlich am meisten Zeit im Schulzimmer verbringen (Vorbereitungsarbeiten).

Der Komfort am Arbeitsplatz der Lehrperson ist jedenfalls wie ein Büroarbeitsplatz zu erwarten; zudem hat das Komfortgefühl der Lehrperson einen wichtigen Einfluss auf die Meinungsbildung der Benutzerzufriedenheit.

Ich schlage daher vor, das Erreichen der Komfortstufe 1 gemäss obiger Tabelle anzustreben, einen PD-Wert von 12-13% minimal zu empfehlen, und PD-Werte von 15% oder höher für ein Schulzimmer als ungenügend zu bewerten.

2 Thermischer Komfort nach Fanger: PMV und PPD

Die Berechnung der thermischen Behaglichkeit nach Fanger ist in die internationalen ISO-Normen (ISO 7730, CEN Technical Report CR 1752) eingeflossen und in der Schweiz auch in der SIA-Norm 180 "Wärmeschutz im Hochbau" enthalten.

Statistische Untersuchungen vor allem über thermisches Komfortempfinden sind schon früh gemacht worden, z.B. in den 50er und 60er Jahren von Nevins (siehe ASHRAE Fundamentals). 1971 haben Rohles und Nevins haben 1600 Studenten über ihr thermisches Komfortempfinden befragt und dabei folgendes Bewertungsschema benutzt, die als ASHRAE-Wärme-Empfindungsskala und, heutzutage auch bei uns, als PMV-Skala bekanntgeworden ist ("Predicted Mean Vote"):

+3	zu heiss
+2	zu warm
+1	etwas zu warm
0	neutral (d.h. guter Komfort, angenehm)
-1	etwas zu kühl
-2	zu kühl
-3	zu kalt

Es gehört zu den entscheidenden Leistungen von Fanger, diese Komfortwerte mit physiologischen Variablen wie die körperliche Aktivität M (in Watt) und die Hauttemperatur zu verbinden.

Ausgangspunkt dafür ist ein einfaches Modell für eine stationäre Energiebilanz des Körpers mit Wärmeabgabe durch Schwitzen (latente Wärme), konvektive Abgabe an die Luft, Wärmeleitung durch die Kleider und Strahlung an Strahlungspartner (warme und kalte Wände). Der Körper kann in einem weiten Bereich einen stationären Betrieb aufrechterhalten, es ist aber bei weitem nicht immer angenehm (es ist zu kühl oder zu warm).

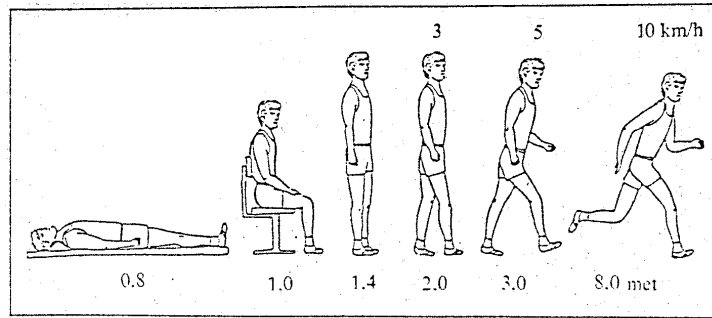
Mithilfe weiterer empirisch ermittelter physiologischer Zusammenhänge für neutrales Komfortempfinden kann dann eine Komfortgleichung hergeleitet werden, die es erlaubt, für eine gegebene Situation den PMV-Wert zu errechnen:

$$PMV = f(\text{Aktivität, physikalische Arbeit, Bekleidung, Temperatur der Strahlungspartner, Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Feuchtigkeit})$$

Das komplette Formelset ist relativ umfangreich (2-3 Seiten) und wird hier deshalb nicht wiedergegeben. Der Komfortwert PMV ist physiologisch vor allem abhängig von der körperlichen Aktivität und von der Bekleidung und umgebungsbedingt besonders von den Temperaturen der Luft und der Strahlungspartner.

Für die körperliche Aktivität ist die Einheit $1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$ geläufig ("met" für *metabolism*). Die effektive Oberfläche eines durchschnittlichen Menschen ist 1.8 m^2 . Die Aktivität eines sitzenden Menschen entspricht gerade etwa 1.0 met . Für die Bekleidung wird oft die Einheit $1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2\text{K/W}$ (für *clothing*) verwendet. Dies entspricht einem Wärmewiderstand von normaler Strassenbekleidung. Abbildung 2.1 zeigt typische Werte von körperlicher Aktivität und Bekleidung.

**Stoffwechselwerte
verschiedener
Tätigkeiten
(1 met = 58 W/m²)**



**Isolierwerte
verschiedener
Bekleidungen
(1 clo = 0,155 m² K/W)**

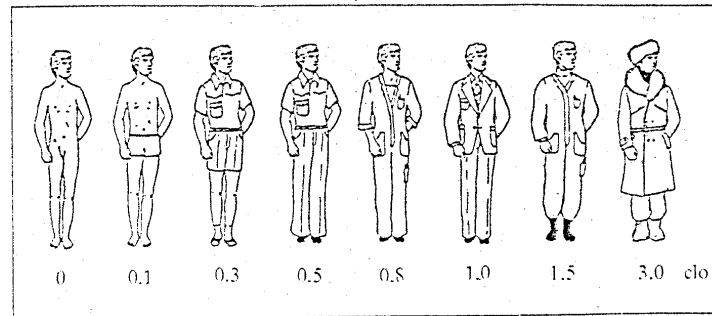


Abbildung 2.1: Körperliche Aktivität und Bekleidungsisolierwerte.

Fanger stellte weiter durch statistische Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen dem PMV-Wert und dem Prozentsatz unzufriedener Personen (PPD-Wert, "Predicted Percentage Dissatisfied") her:

$$PPD = 100 - 95 \exp [- (0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)]$$

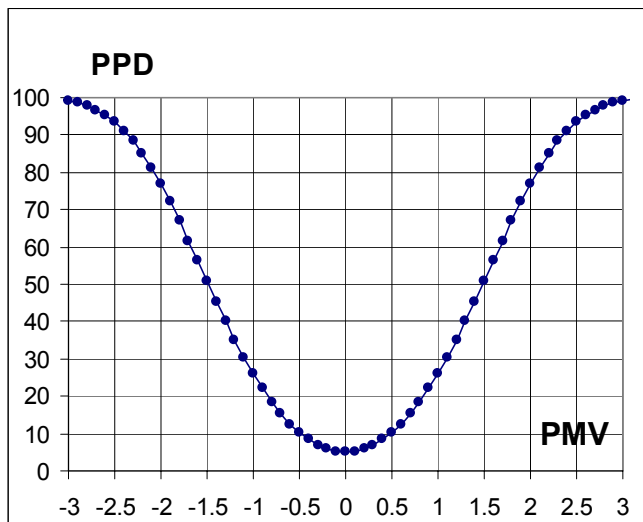


Abbildung 2.2: Zusammenhang PMV und PPD (Prozentsatz Unzufriedener aufgrund thermischem Komfort).

Abbildung 2.2 zeigt diesen Zusammenhang. Im flachen Teil dieser Kurve besteht eine gewisse Unempfindlichkeit gegenüber einer Variation eines Parameters, im steilen Kurventeil verursacht eine geringe Änderung eines Wertes, z.B. der Strahlungstemperatur, schon eine grössere Veränderung des PPD-Wertes.

Abbildung 2.3 zeigt die Sensitivität des PMV-Wertes auf Temperaturänderungen, und Abbildung 2.4 die Sensitivität auf Änderungen in der Bekleidung und der Aktivität.

	Bei PMV = - 0.7	Bei PMV = 0.0	Bei PMV = + 0.7
Lufttemperatur + 1 Grad	0.13	0.10	0.08
Strahlungstemp. + 1 Grad	0.11	0.08	0.07

Abbildung 2.3: Änderung von PMV bei einer Temperaturänderung von 1 Grad.

	Bei PMV = - 0.7	Bei PMV = 0.0
Bekleidung + 0.2 clo	0.35	0.25
Aktivität + 0.2 met	0.50	0.40

Abbildung 2.4: Änderung von PMV bei einer Änderungen in der Bekleidung und der Aktivität.

Abbildung 2.5 zeigt optimale Arbeitstemperaturen für verschiedene Aktivitäten und Beileiungen bei typischen Werten der weiteren Parameter. Erstaunlicherweise ist die Abhängigkeit dieses Komfortempfindens von Geschlecht, Alter und Nationalität erstaunlich gering. Allerdings wird bemängelt, dass Fanger in seinen damaligen Untersuchungen die Empfindlichkeit der Frauen generell zu wenig berücksichtigt hat.

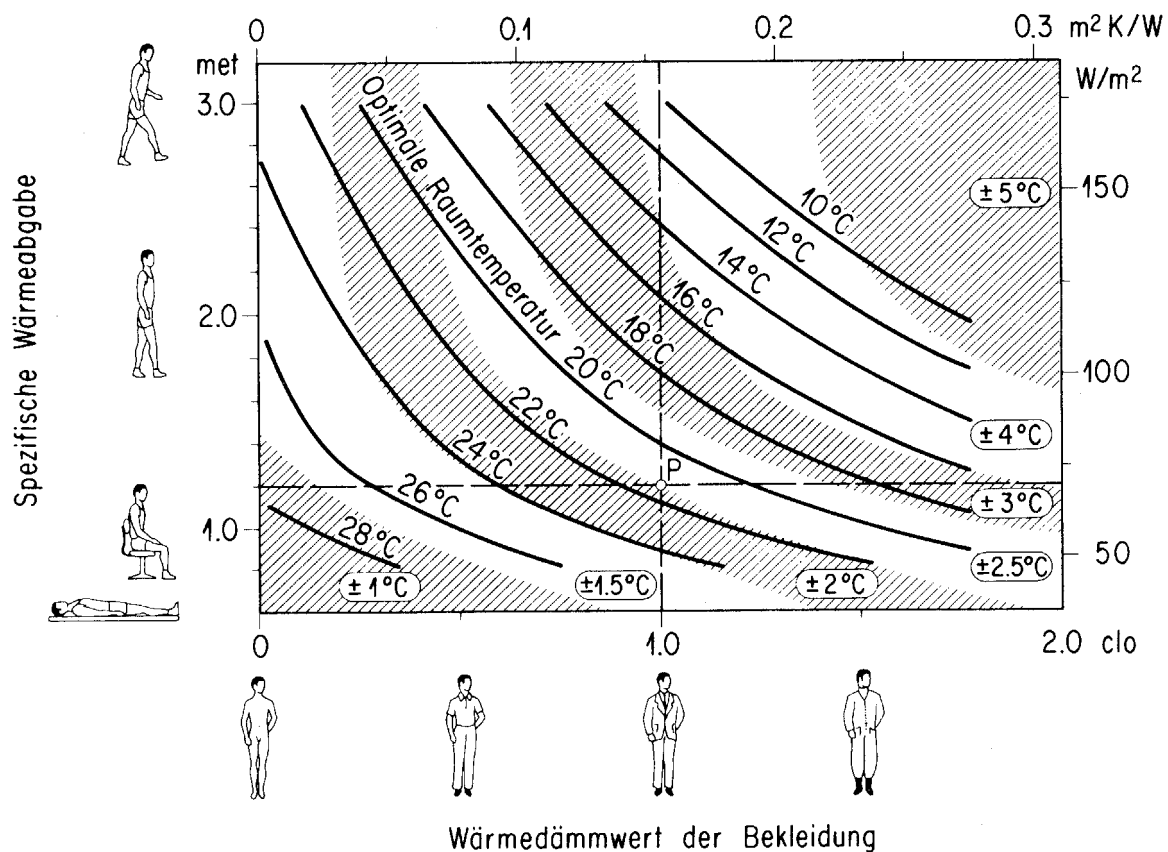


Abbildung 2.5: Komfortdiagramm für optimale Arbeitstemperaturen in Abhängigkeit der Aktivität und der Bekleidung. Die schraffierten Bereiche zeigen den Toleranzbereich um die optimale Innentemperatur, der $-0.5 < PMV < 0.5$ entspricht.

Der Punkt P zeigt die Werte für das Beispiel "Büromensch" mit leichter Tätigkeit (1.2 met) und Bürokleidung (1.0 clo). Die optimale Arbeitstemperatur ist 21.5°C mit einem Toleranzbereich von ± 2.0 Grad.

3 Komfort aufgrund Luftzug nach Fanger: PD

Die Wärmeneutralität nach Abschnitt 2 ist eine Bedingung, die erfüllt werden muss. Diese ist in einem Raum mit Heizung selten kritisch, da sie mit der mittleren Raumtemperatur eingestellt werden kann, und die Oberflächentemperatur der Fenster kaum unter 18-19°C zu liegen kommt.

Ein weiterer sehr kritischer Faktor ist das Luftzugempfinden. Wie neuere Untersuchungen gezeigt haben, sind nicht nur Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur wichtig, sondern auch Geschwindigkeitsfluktuationen, also Turbulenz (Fanger und Christensen 1986, Fanger 1988, 1989).

In typischen Raumströmungen, vor allem bei Mischlüftungssystemen, wie sie oft im Einsatz sind, sind sehr hohe Turbulenzgrade zu beobachten, siehe Abbildung 3.1 und 3.2. Bei neueren Quell-Lüftungssystemen tritt dieses Problem weniger stark in Erscheinung.

Der Turbulenzgrad Tu ist dabei definiert als Verhältnis zwischen Standardabweichung S_v und Mittelwert der Geschwindigkeit:

$$Tu (\%) = 100 S_v / \langle v \rangle \quad)$$

Die Standardabweichung ist gegeben durch:

$$S_v = \sqrt{v'^2}$$

Der Turbulenzgrad Tu kann auch durch die turbulente kinetische Energie ausgedrückt werden, welche bei Strömungsberechnungsprogrammen benutzt wird:

$$Tu (\%) = 100 * \sqrt{2k} / \langle v \rangle$$

Folgender formelmässige Zusammenhang resultierte aus Fangers Untersuchungen:

$$PD [\%] = (34 - T_{air}) (v - 0.05)^{0.62} (0.37 v Tu + 3.14)$$

mit T_{air} = Lufttemperatur, mittlerer Geschwindigkeit v und Turbulenzgrad Tu .

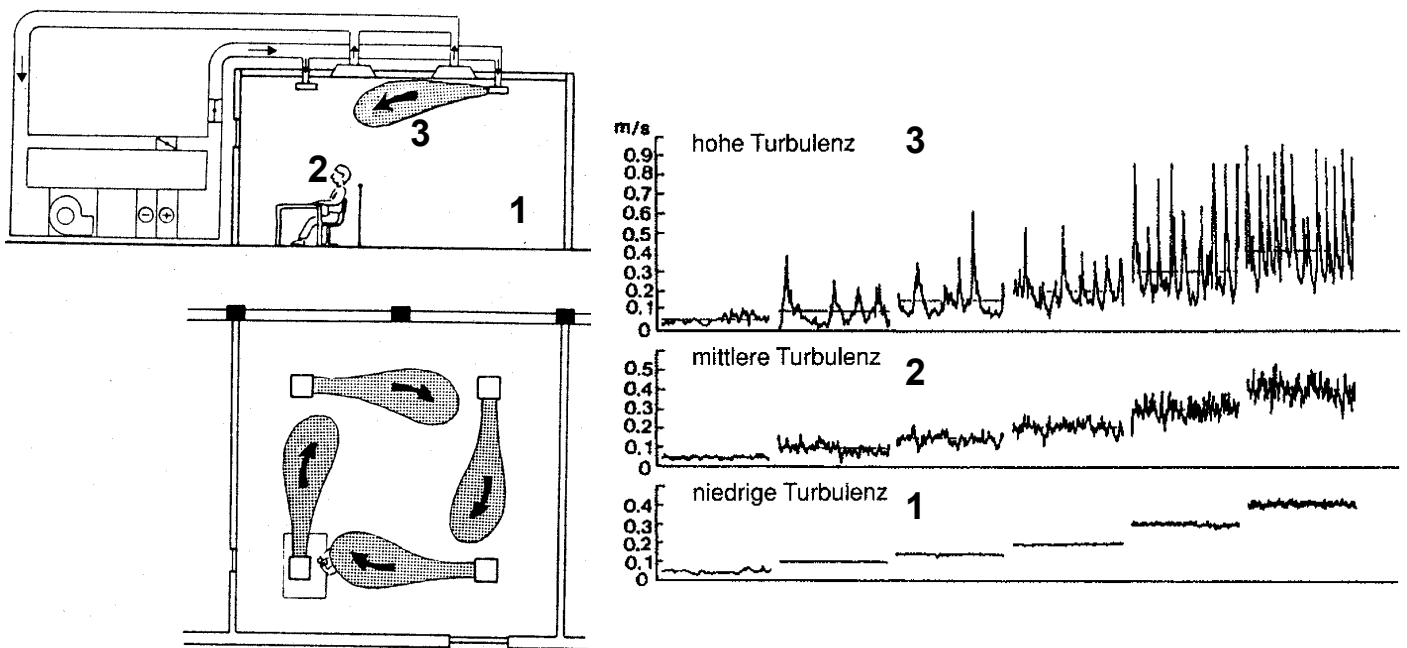


Bild 3.1: Testraum für untersuchte Personen.

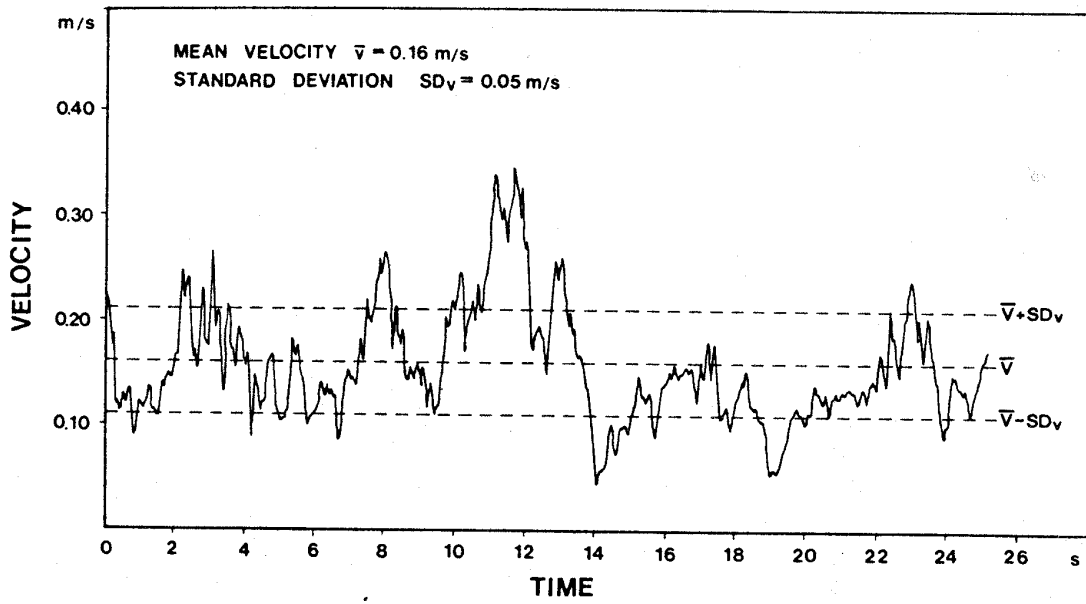


Bild 3.2: Fluktuationen der Geschwindigkeit für Bedingungen im Testraum.

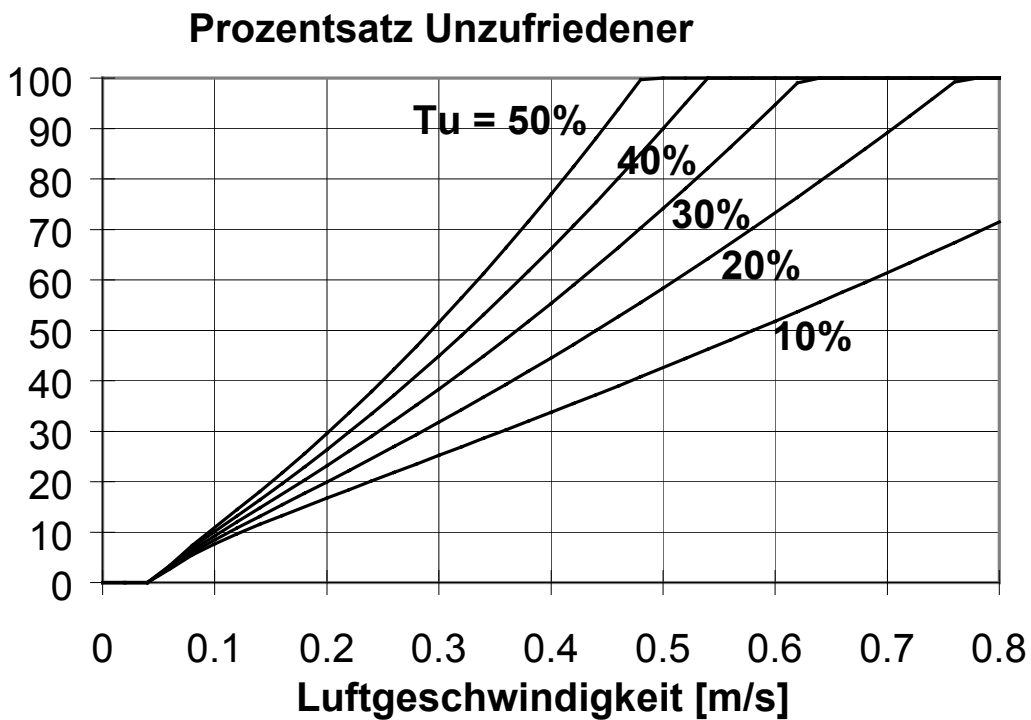


Abbildung 3.3: Prozentsatz Unzufriedener aufgrund Zug bei $T = 20^\circ\text{C}$.

Der empfindlichste Körperteil auf Luftzug ist der Kopf, welcher denn auch zur allgemeinen Bewertung benutzt wird. Abbildung 3.4 zeigt die Empfindlichkeit verschiedener Körperpartien (nach Fanger und Christensen 1986).

Bei Quell-Luftauslässen (in Bodennähe) kann eine gegenüber der Strömung am Kopf etwas reduzierte Empfindlichkeit angenommen werden.

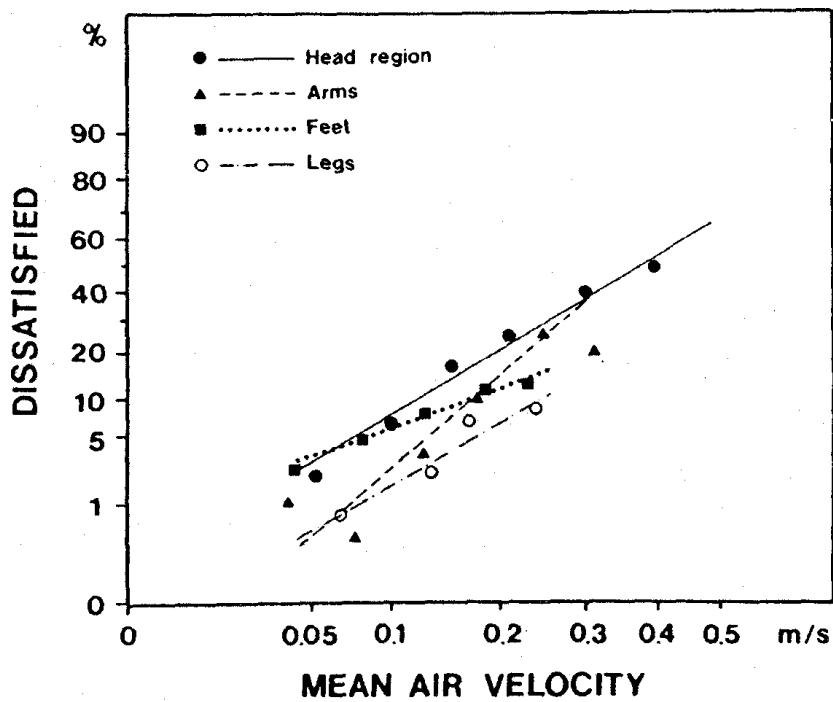


Abbildung 3.4: Prozentsatz Unzufriedener aufgrund Zug an verschiedenen Körperpartien.

4 Weitere Aspekte des thermischen Komfortes

Die behandelten Gleichungen beinhalten sehr wichtige Einflüsse auf das Komfortempfinden, decken jedoch noch nicht alle Aspekte des thermischen Komfortes ab.

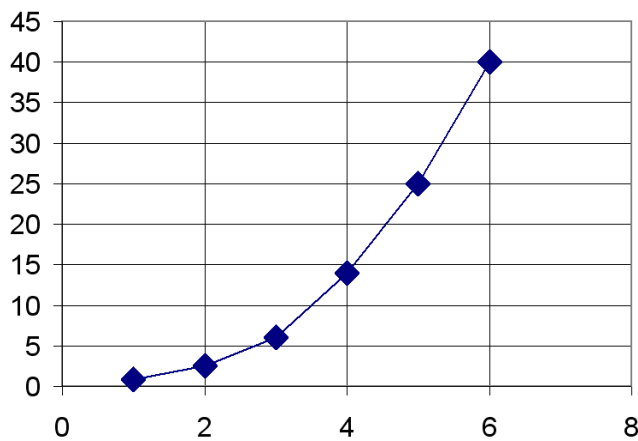
Die folgenden Zusammenhänge (siehe Abbildungen) sind ebenfalls bekannt, sind aber nicht formelmässig erfasst oder auf weitere Grundlagen zurückgeführt.

Im Prinzip müssen alle Komfortanforderungen simultan erfüllt werden.

Am schwierigsten einzuhalten für guten Komfort sind Temperaturgradient im Personenbereich für langen Aufenthalt (Abbildung 4.2), Strahlungsasymmetrie aufgrund warmer Decke (Abbildung 4.3) und Bodentemperatur (Abbildung 4.4).

4.1 Temperaturgradient der Luft

PD aufgrund vertikalem
Temperaturgradient



PD aufgrund vertikalem
Temperaturgradient

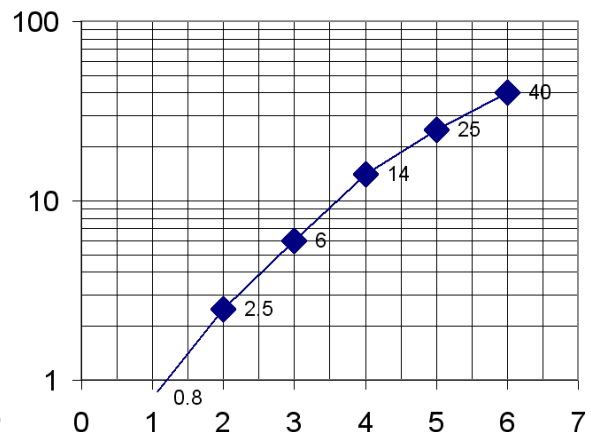


Abbildung 4.1: Prozentsatz Unzufriedener aufgrund eines Temperaturgradienten der Luft.

PD aufgrund Temperaturgradient
zwischen 0.1m und 1.1m Höhe

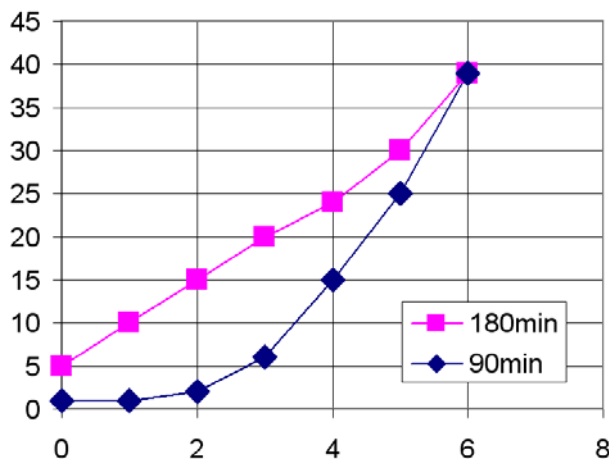


Abbildung 4.2: Prozentsatz Unzufriedener aufgrund eines Temperaturgradienten der Luft.

4.2 Strahlungsasymmetrie

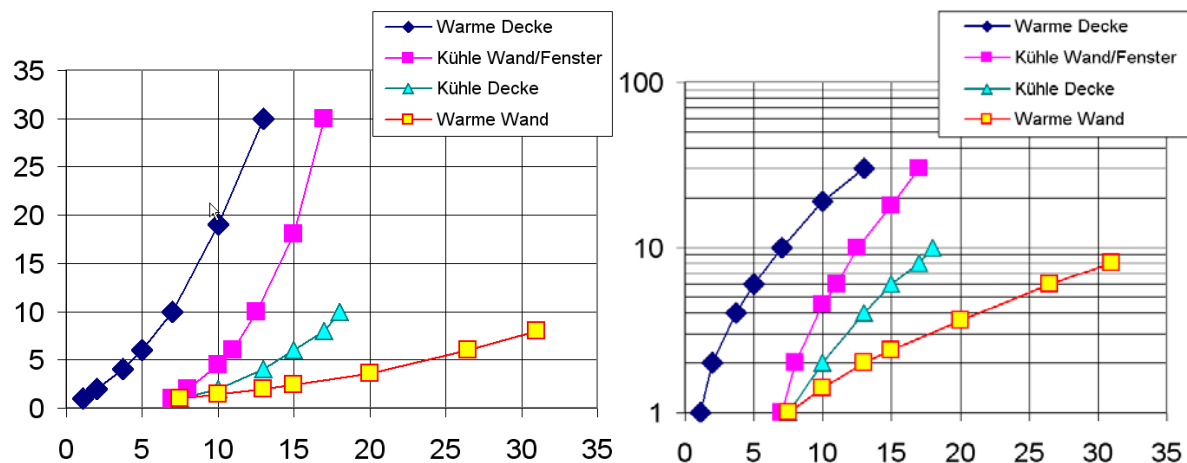


Abbildung 4.3: Prozentsatz Unzufriedener aufgrund einer Asymmetrie der Strahlungspartner.

4.3 Bodentemperatur allein, beim Tragen von Hausschuhen

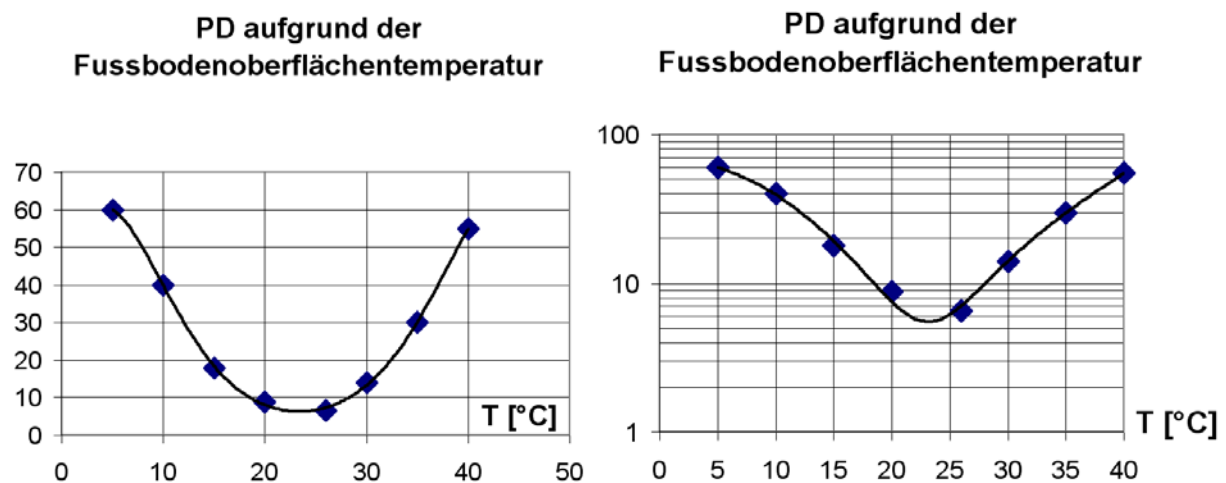


Abbildung 4.4: Prozentsatz Unzufriedener aufgrund der Bodentemperatur, beim Tragen von Hausschuhen.

Literatur

- [1] ASHRAE Fundamentals. Physiological principles and thermal comfort. pg. 8.1-8.29, 1993.
- [2] Fanger P.O. Thermal comfort. Danish Technical Press. 1970.
- [3] „Ventilation for Buildings – Design Criteria for Indoor Environment“. CEN Technical Report CR 1752, 1998.
- [4] „Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau“. SIA-Norm 180, Ausgabe 1999.
- [5] „Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen“. SIA-Norm 382/1, Entwurf 2004.
- [6] Fanger, P.O, Christensen, N.K. Perception of draft in ventilated spaces. Ergonomics, 29/2, pg. 215-235, 1986.
- [7] Fanger P.O, Melikow A.K., Hanzawa H., Ring J. Turbulence and draft. ASHRAE J., pg. 18-23, 1989.