



Gebäudesimulation zur Analyse der thermischen Behaglichkeit (EN 7730)

DI (FH) Daniel Neyer
FH OÖ Campus Wels

April 2008

AUSZÜGE AUS DER

DIPLOMARBEIT VON

DANIEL NEYER

**„Charakterisierung von Gebäuden durch statische
Berechnungsverfahren und der Kombination von
Gebäude- & Strömungssimulationen zur
Klassifizierung der thermischen Behaglichkeit“**

Juni, 2007

FH OÖ, Campus Wels, Ökoenergietechnik

Betreuung der Diplomarbeit durch:

Prof.(FH) Dipl.-Ing. Dr. Herbert C. Leindecker

Kurzfassung

Die thermische Behaglichkeit ist in der Praxis ein immer wichtiger werdendes Thema. Bereits in den 60er-Jahren wurden von P.O. Fanger die Kriterien des thermischen Komforts definiert und eine entsprechende Berechnungs- und Bewertungsmethode entwickelt. Um den Inbegriff dieser Betrachtungen im Sinne der Nachhaltigkeit anzureichern, muss die Optimierung der Behaglichkeit in Gebäuden immer mit der energetischen Betrachtung Hand in Hand gehen. Die Berechnung der erforderlichen Parameter, die Bewertung der Aussagekraft und praktische Bedeutung beziehungsweise Alltagstauglichkeit dieses kombinierten Ansatzes ist eine sehr essentielle und reizvolle Fragestellung. Welche Berechnungsverfahren bietet diese gekoppelte Untersuchung oder wie kann ein solcher Weg gefunden und beschritten werden?

Die gängigen Verfahren zur Berechnung von Energieausweisen nach dem Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) oder nach dem Passivhaus Projektierungspaket (PHPP) beachten die energetische Qualität des Gebäudes, die für die Bewohner jedoch wichtige Frage der thermischen Behaglichkeit ist aber nicht Bestandteil dieser Verfahren. Mittels thermischer Simulation ist hingegen sowohl die qualitative Ausführung der Komponenten als auch die thermische Behaglichkeit in beliebiger Genauigkeit möglich. Es bleibt die Frage offen, ob eine Simulation tatsächlich diese Anforderungen erfüllt und mit welcher Genauigkeit gerechnet werden kann.

Das verwendete thermische Simulationspaket TRNSYS kann die gewünschten Ergebnisse, auf Grund des verwendeten Sternknotenmodells, nur bedingt liefern. In TRNSYS werden pro Zone beziehungsweise Raum nur einzelne Knoten berechnet, welche keine Aussage, beispielsweise über die Verteilung der Temperatur im Raum und schon gar keine Aussagen über Luftströmungen zulässt. Dagegen wird mit dem Strömungssimulationspaket FLUENT, über die Finite Volumen Methode, jeglicher Parameter über das gesamte Raumvolumen betrachtet. Folglich können auch alle erforderlichen Parameter der thermischen Behaglichkeit berechnet und analysiert werden.

Zunächst wird bei der Betrachtung der einzelnen Programme mit ihren unterschiedlichen Tools klar, dass die Schwächen des einen Pakets die Stärken des anderen sind. So kann in TRNSYS unter den vereinfachten Bedingungen nur eine Ausarbeitung der statistischen Behaglichkeit erfolgen. Diese Betrachtungen sind für Langzeitanalysen auf Grund des Sternknotenmodells und groben Auflösung des Gebäudes und daraus folgend der raschen Simulation bestens geeignet. In FLUENT dagegen werden alle Simulationen, auf Grund der für eine zuverlässige Auflösung erforderlichen hohen Anzahl an Zellen, sehr zeitaufwändig. Dennoch überwiegt hier der Vorteil, alle Behaglichkeitskriterien der statistischen und lokalen Untersuchungen bis ins Detail betrachten zu können.

Erst die Kopplung der beiden Simulationspakete führt zum Ziel, dass die Behaglichkeit anschaulich simuliert werden kann. Diese Kombination bringt den offensichtlichen Vorteil, alle für die Behaglichkeit erforderlichen Komponenten berechnen zu können. Dennoch birgt sie auch etliche Schwierigkeiten. Die Nachbildung der exakten Randbedingungen unterliegt in beiden Tools etlichen Vereinfachungen und ist deshalb die wohl größte Herausforderung. Dies führt zur Erkenntnis, dass eine Simulation, zwar mit beachtlichen Ergebnissen, dennoch eine theoretische Abhandlung eines Problems ist. Die praktische Umsetzung und damit die realen Werte von Simulationen sind von den definierten Randbedingungen abhängig und nur unter diesen betrachteten Umständen entsprechend genau. Welche Schritte tatsächlich zur realitätsnahen Abbildung führen können, ist Teil dieser Arbeit.

2.3 Behaglichkeit

„Der Wunsch nach einem Zuhause, in dem man sich wohlfühlt, ist ein fundamentales menschliches Bedürfnis, das tief in unserer Psyche wurzelt und nach Befriedigung verlangt“, schreibt der englisch-kanadische Architekt und Kulturgeschichtler Withold Rybczynski [Rybczynski 1991]. Alleine die Entwicklung der Architektur und des Bauwesens und der dazugehörigen technischen Gebäudeausstattung lässt eindeutig hervorgehen, dass der Mensch das Bestreben hat, sich seine Umgebung, sei es das Arbeits- oder Wohnumfeld, komfortabel und behaglich zu gestalten.

Verschiedene Begriffe haben sich um den Ausdruck des Komforts herum gebildet, „Gemütlichkeit“, „Wohnlichkeit“ und „Wohlfühlen“ sind nur einige Beispiele dessen. Die ursprüngliche Bedeutung von „confortare“ definierte sich durch „stärken“ und „trösten“, vermischt sich aber mit der Zeit mit den Begriffen der „Behaglichkeit“ und „Bequemlichkeit“. Diese skizzieren eine neue, in der Moderne liegende, Nuance des Komfortbegriffs. Diese Unschärfe führt nach Rybczynski zu dem Schluss, dass sich ein behagliches Klima in Zukunft nur mehr durch hochgradige Technisierung und Funktionalisierung schaffen lässt. Die Individualität des Einzelnen, geprägt durch sein persönliches Innenleben und daraus resultierend dessen Empfinden der Zufriedenheit mit sich und der Umwelt, rückt immer weiter in den Hintergrund. Die zunehmende Übernahme der Kontrollfunktion der Technik, und im Hintergrund dazu die wissenschaftliche Auseinandersetzung, führen zu einem ausgeprägten Wunschenken alles vorhersagbar und berechenbar zu gestalten.

Doch wie kann auf Bedürfnisse eines Individuums reagiert werden, wenn die Technik diktiert, was der Mensch zu fühlen hat? Eine moderne Regelung von allem Erdenklichen, von konstanten Innenraumtemperaturen über selbst regulierende Beleuchtungssysteme zu berechneten Luftvolumenströmen, ersetzt das persönliche, individuelle Eingreifen. Kann damit wirklich das subjektive Empfinden jedes Einzelnen befriedigt werden und gibt es etwa objektive Parameter um dies zu bewerkstelligen? Die große Frage also, wenn von Behaglichkeit gesprochen wird, ist immer wieder: „Ist Behaglichkeit physiologisch überhaupt messbar?“. Es gibt wohl kaum einen physikalisch so schwer, aufgrund seiner Vielzahl von subjektiven Faktoren, erfassbaren Parameter in der Gebäudetechnik, wie den der Behaglichkeit bzw. des Komforts.

Zunächst folgt die Betrachtung des thermischen Komforts oder Behaglichkeit. Diese wurde als ein Punkt ohne besonderes Gefühl, der zwischen dem Körperempfinden, der Blutfülle und des Schwitzens einerseits und dem Gefühl des Frierens andererseits, definiert. Dieser Vorgang der Wechselwirkung zwischen den physiologischen Vorgängen im Körper und dem physikalischen Austausch mit der Umwelt konnte bereits 1969 von Poul Ole Fanger [Fanger 1972] in einer Formel zusammengefügt werden. Diese Bilanzgleichung und das Behaglichkeitsempfinden konnte Fanger statistisch verknüpfen und somit einen mathematisch erfassbaren Parameter schaffen, mit welchem die Behaglichkeit beschrieben werden kann. Im Grunde wird die Erfüllung der thermischen Behaglichkeit als Energiedienstleistung für sich, die durch das Gebäude und dessen Haustechnik erbracht werden muss oder besser soll, gesehen. Am Erfüllungsgrad dieser Bedingungen wird sich jedes Konzept messen müssen [Feist 2004, S.1].

2.3.1 Der Wärmehaushalt des Menschen

Um später diese Gleichung und deren Zusammenhänge verstehen zu können, sollen zunächst die physiologischen Vorgänge und Zusammenhänge im menschlichen Körper geklärt werden. Alle wesentlichen Erkenntnisse sind aus dem Physiologiebuch von Deetjen und Speckmann [Deetjen/Speckmann 1994] entnommen.

Säugetiere, und damit auch der Mensch, gehören zu den "Warmblütern", den "Homoiothermen". Ihr Stoffwechsel ist darauf angewiesen, dass die Körpertemperatur nahezu konstant bleibt. Bei zu tiefen Temperaturen werden verschiedene Stoffwechselvorgänge zu langsam, um das Überleben zu

sichern. Zu hohe Temperaturen können zur Zerstörung lebenswichtiger Strukturen (Eiweiße, Vitamine) führen. Der menschliche Organismus funktioniert am besten bei Kerntemperaturen (siehe Abbildung 21) zwischen 37 und 37,5 Grad Celsius. Das Immunsystem hat sein Optimum bei 38,0-38,5°. Steigt die Temperatur über 41 Grad, kommt es zu ersten Schäden. Auf der anderen Seite kommt es zu deutlichen Unterkühlungssymptomen, wenn die Körperkerntemperatur unter 35 Grad absinkt. Fällt die Körpertemperatur unter 30 Grad, können bereits wesentliche Stoffwechselfunktionen zum Erliegen kommen. Das Überleben des Organismus ist in Gefahr.

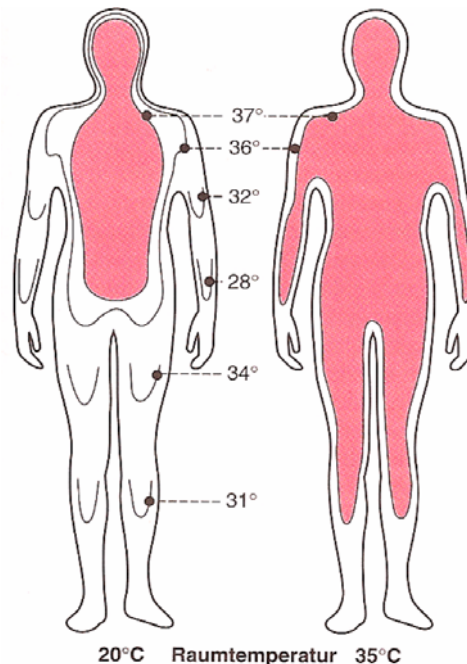


Abbildung 21: Kerntemperaturen des Menschen bei verschiedenen Raumtemperaturen [Deetjen/Speckmann 1994, S.475]

Der Wärmehaushalt hat die Aufgabe die Kerntemperatur unabhängig von körperlicher Aktivität und Außentemperatur möglichst genau im Zielbereich zu halten. Bei Absinken unter den Sollwert werden der Stoffwechsel angeregt und die Muskeln zum Zittern gebracht, damit mehr Energie umgesetzt wird. Außerdem wird die Durchblutung von Haut und Extremitäten herabgesetzt um den Wärmeverlust zu reduzieren. Eine andere Möglichkeit der Senkung der Körpertemperatur ist das Hecheln. Einige Tiere haben Bereiche entwickelt, die verglichen zur Masse eine sehr große Fläche haben (z.B.: die Ohren von Elefanten, oder der Rückenkamm bei einigen Dinosauriern). Wenn ein erhöhter Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfinden soll, werden diese Körperareale stärker durchblutet. Steigt die Temperatur über den Sollwert, wird hingegen die Durchblutung von Haut und Extremitäten gesteigert, damit über die Körperoberfläche ein erhöhter Wärmeaustausch möglich ist. Durch das Verdunsten von Wasser, das aus den Schweißdrüsen ausgeschieden wird (Schwitzen), verstärkt sich der Abkühlungseffekt. Mit sinkender Luftfeuchtigkeit steigt die Effektivität des Wärmetausches. Der Körper verträgt nun - bei steigendem Flüssigkeitsbedarf - höhere Außentemperaturen, ohne dass die Kerntemperatur ansteigt. Die unterschiedlichen Mechanismen sind in Abbildung 22 zu sehen.

Das Regelsystem für die Körpertemperatur sitzt beim Menschen und anderen Säugetieren im Hypothalamus. Es ist eine gewisse Analogie des physiologischen Regulationssystems homoiothermer Organismen und technischer Temperaturregulationssysteme zu erkennen. Die Erfassung der Haut- und der Kerntemperatur mittels Kalt- und Warmrezeptoren der Haut und des Körperkerns erfolgt mit Hilfe innerer und äußerer Fühler. Diese sind über Fasern des sensorischen Systems mit dem Rückenmark und dem Hypothalamus verbunden, in dem auch, nach gängiger Lehrmeinung, das Regelzentrum liegt.

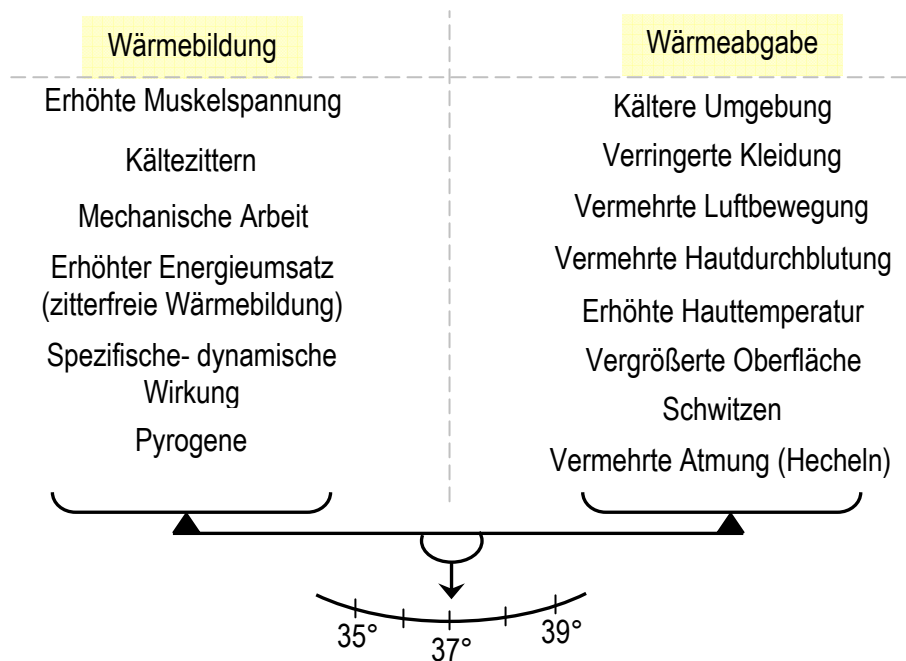


Abbildung 22: Faktoren, die die Wärmebildung bzw. die Wärmeabgabe erhöhen [Deetjen/Speckmann 1994, S.475]

Über die Thermorezeptoren, welche sich an verschiedenen Stellen des Körperkerns befinden, werden Signale an den Hypothalamus geleitet. In diesem werden diese Istwerte (bzw. der Thermorezeptoren der Haut) mit den Sollwerten des Referenzsignals verglichen. Wenn nun die Summe der Eingangssignale vom Sollwert abweicht, reagiert der Körper, je nach Vorzeichen, mit Mechanismen der Wärmebildung oder der Wärmeabgabe (Abbildung 22).

Ein Optimum wird erreicht, wenn alle Prozesse gleichzeitig ablaufen [Deetjen/Speckmann 1994, S.481].

- Bei einem Abfall der Kerntemperatur unter den Sollwert wird die Wärmeabgabe durch eine über das efferente, vegetative Nervensystem vermittelte Verminderung der Haut- und Schalendurchblutung eingeschränkt. Gleichzeitig wird über das efferente, motorische Nervensystem die Wärmebildung durch Kältezittern erhöht. Beim Menschen ist die Reaktion phylogenetisch als Gänsehaut erhalten.
- Bei einem Anstieg der Körpertemperatur über den Sollwert wird die motorische Aktivität gedämpft. Die Hautdurchblutung und gleichzeitig die Schweißsekretion werden erhöht und damit die Wärmeabgabe gesteigert.

Dieses System wird als autonome Regelung bezeichnet, welches reflektorisch abläuft und durch Willkür kaum zu beeinflussen ist. Ziel dieser autonomen Regelung ist die Erhaltung der Sollkerntemperatur. Wichtigstes Organ ist dabei die Haut, diese erfährt als erstes eine drohende Gleichgewichtsverschiebung durch Verminderung oder Erhöhung der Umgebungstemperatur. Somit ist eine frühzeitige Aktivierung der Mechanismen der Wärmebildung bzw. der Wärmeabgabe möglich, und die Kerntemperatur ändert sich nicht wesentlich. Zusätzlich zu diesem System können auch verhaltensmäßige Reaktionen zur Erhaltung des thermischen Komforts aktiv werden. Dies sind beispielsweise Verhaltensmuster, wie zusammenkauern oder zusammenrücken einer Gruppe bei zu kalter Umgebung oder umgekehrt bei wärmerer Umgebung. Die zusätzliche Wärmeproduktion wird auch durch körperliche Arbeit hervorgerufen. Die Wärmerezeptoren der Haut können diesen Antrieb nicht mehr bewerkstelligen und die Regulierung erfolgt hier übers Schwitzen, bei welchem die Hauttemperatur durch die Verdunstungsenergie sinkt.

Die Messung des autonomen Nervensystems und damit die Untersuchung der Wirkungsweise verschiedener physikalischer Kriterien auf dieses sensible System können auf verschiedene Arten

erfolgen. Die wichtigsten und aussagekräftigsten Werte sind Kreislaufbelastungstest, Messungen von Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität sowie nichtlineare Zeitreihenanalysen [Rohregger 2002, S.29ff]. Von besonderem Interesse für derartige Studien ist dabei zum Beispiel das Wärmeempfinden, wenn unterschiedliche Heizungen in Räumen eingesetzt werden. Dabei wurde festgestellt, dass Räume mit Strahlungsheizungen, wie einem Kachelofen, signifikant als wärmer empfunden werden als bei der Radiatorbeheizung durch Zentralheizung, und die Wärme des Kachelofens von den Versuchspersonen signifikant als angenehmer bewertet wurde als die Radiatorwärme [Lipp 2000, S.27]. Zusätzlich konnte bei einer Vielzahl an Untersuchungen die Kipphäufigkeit, die Erholungszeit nach ergometrischen Belastungstest und die nichtlineare Analyse als sehr aussagekräftige Parameter für die generelle Beurteilung der Behaglichkeit nachgewiesen werden [Feist 2004, S.37].

Anders als der Mensch reagieren wechselwarme Tiere, wie Reptilien, mit ihrem Stoffwechsel, der besser auf tiefe Temperaturen abgestimmt ist. Sie werden zwar, weil jeder chemische Prozess mit tieferer Temperatur verlangsamt wird, in der Kälte weniger aktiv (bis hin zu völliger Starre), aber sie sterben nicht, solange ihre Körperflüssigkeiten nicht gefrieren. (Bei den Amphibien gibt es wenige Ausnahmen, die ein totales Einfrieren überleben können.)

2.3.2 Predicted Mean Vote (PMV) & Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)

Nach ÖNORM EN ISO 7730 [ÖNORM EN ISO 7730:2006] wird thermische Behaglichkeit als das Gefühl definiert, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt. Unzufriedenheit kann durch Unbehagen des Körpers als Ganzes, auf Grund der Einwirkung von Wärme oder Kälte, ausgedrückt durch das vorausgesagte mittlere Votum (PMV) und den vorausgesagten Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) oder auch durch eine ungewollte Abkühlung eines bestimmten Körperteils, verursacht werden. Der Zusammenhang zwischen PMV/PPD stellt sich wie folgt dar.

Im Wesentlichen lassen sich fünf objektiv messbare, physikalische Größen zur Darstellung der Wärmebilanz des Menschen heranziehen.

- Clothing Factor
- Metabolic Rate
- Luftgeschwindigkeit
- Luft- & Oberflächentemperaturen
- Luftfeuchtigkeit

Aus diesen Faktoren hat Fanger bereits in den 60er Jahren, durch groß angelegte Feldstudien, das so genannte „Predicted Mean Vote“ entwickelt. Dies ist ein Wert, der das statistische mittlere Votum einer Menschengruppe bestimmt. Die zugrunde liegende Wärmebilanz stellt sich, wie auch im technischen Sinn üblich, aus Input, also Wärmeproduktion, und Output, also Wärmeabfuhr, dar. Der Zusammenhang zum bereits Erwähnten liegt darin, dass, wenn diese Bilanz null ergibt, der Körper keine Anstrengungen unternehmen muss um einen Ausgleich zu erreichen. Entfernt sich diese Differenz von null, muss nun der Organismus für den Ausgleich sorgen und dies wird als Diskomfort empfunden. Weicht die Berechnung in den negativen Bereich ab, bedeutet das, dass erstens diese Bedingungen als zu kalt empfunden werden und zweitens, dass der vorhergesagte Prozentsatz an Unzufriedenen steigt. Genauso verhält sich der PPD -Index, wenn der PMV -Index positiv wird, nur dass die Umgebung als zu warm empfunden wird. Abbildung 23 stellt diesen Zusammenhang nochmals dar.

Ein Optimum, sprich eine geringe Anzahl an Unzufriedenen, welche nach Fanger mit bestenfalls 5% definiert ist, wird erreicht, wenn die Berechnung des mittleren vorhergesagten Votums null ergibt. Neuere Untersuchungen gehen von einer wesentlich höheren Anzahl an Unzufriedenen aus. So brachten Untersuchungen des Fraunhofer- Instituts das Ergebnis, dass unter homogenen thermischen

Bedingungen dieser Protzensatz bei mindestens 15% liegt [Mayer 1998]. Weiters muss auch nach McIntyre [McIntyre 1982] unterschieden werden, ob eine thermische Umgebung als komfortabel oder akzeptabel empfunden wird. So können aufgrund kultureller Unterschiede und damit angepasster Kleidung Temperaturen zwischen 16° und 32 °C als akzeptabel empfunden werden. Auf die Unterschiede der Versuchsabläufe, sprich die Möglichkeiten der Stellungnahme der Probanden auf die veränderbaren Temperaturen, wird von Grivel und Candas [Grivel 1991] aufmerksam gemacht. So können durchwegs verschiedene Ergebnisse der Untersuchungen aufkommen, je nach Weg, der zurückgelegt werden muss, um ein behagliches Umfeld zu erreichen. Sie unterscheiden die Möglichkeit der Versuchspersonen selbst in die Temperaturregulierung einzugreifen, sich nur zu einer Temperatur zu äußern und Stellung zu nehmen, und der Möglichkeit Wünsche zu äußern, die der Versuchleiter dann umsetzt.

Trotz dieser unterschiedlichen Ansätze und Prozentsätze hat sich in der ÖNORM 7730 die Fanger'sche Sichtweise durchgesetzt und wird deshalb im Folgenden in Bezug auf diesen normativen Verweis detailliert betrachtet.

Bezeichnung	PMV	PPD
kalt	-3	99,1
kühl	-2	76,8
Etwas kühl	-1	26,1
neutral	0	5,0
etwas warm	1	26,1
warm	2	76,8
heiß	3	99,1

Abbildung 23: Zusammenhang PMV und PPD und das entsprechende Empfinden
eigene Darstellung nach ÖNORM 7730 [ÖNORM 7730:2006, S.:6]

Die Wärmebilanz des Menschen setzt sich aus den folgenden Verlusten und Gewinnen zusammen. Gleichung 65 repräsentiert dabei die gesamte Bilanz, nachfolgend werden alle Teile für sich kurz erläutert. [Fanger 1972, S.23ff]

$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L = K = R + C$		Gl (65)
H	Interne Körperwärme	kJ/hr
E_d	Wärmeverlust durch Wasserdiffusion	kJ/hr
E_{sw}	Wärmeverlust durch Verdampfung von Schweiß an der Hautoberfläche	kJ/hr
E_{re}	Latente Wärmeverluste durch Atmung	kJ/hr
L	Sensible Wärmeverluste durch Atmung	kJ/hr
K	Wärmeleitung durch die Kleidung	kJ/hr
R	Wärmeverluste durch Strahlung	kJ/hr
C	Wärmeverluste durch Konvektion	kJ/hr

Tabelle 47: Nomenklatur der Wärmebilanz des Menschen

- Interne Wärmeproduktion (H)

ist jene Energiemenge, die durch Oxidationsprozesse im menschlichen Körper pro Zeiteinheit freigesetzt wird. Diese wird zum Teil in externe Arbeit, hauptsächlich aber in interne Körperwärme, konvertiert. Dieses Verhältnis ist in Gleichung 66 pro Quadratmeter Körperoberfläche dargestellt.

$$\frac{H}{A_{Du}} = \frac{M}{A_{Du}} (1 - \eta) \quad \text{Gl (66)}$$

M	Energieumsatz	46 bis 234 W
A_{Du}	Mittlere Körperfläche des Menschen (DuBois area)	m ²

Tabelle 48: Nomenklatur der internen Wärmeproduktion

Die Metabolic Rate repräsentiert den Energieumsatz von Menschen bei verschiedenen körperlichen Tätigkeiten, angeführt sind in Tabelle 49 einige Beispiele, sowie die spezifische Leistung pro Quadratmeter. Nähere Informationen zur Berechnung dieser Energiemenge finden sich in der Norm ISO 8996 [ÖNORM EN ISO 8996:2005].

Energieumsatz (M)	Energieumsatz	
	W/m ²	met
Angelehnt	46	0,8
Sitzend, entspannt	58	1
Stehend, leichte Tätigkeit	93	1,6
Gehend auf der Ebene, 4 km/h	165	2,8

Tabelle 49: Energieumsatz des Menschen bei unterschiedlichen körperlichen Aktivitäten [ÖNORM 7730:2006, S.21]

- Wärmeverlust mittels Wasserdiffusion durch die Haut (E_d)
ist ein Teil des nicht spürbaren Schwitzens, ein Prozess der unabhängig von der Thermoregulierung des Körper bzw. Nervensystems ist. Die Wärmemenge ist proportional zur Differenz zwischen dem gesättigten Wasserdruck p_s bei Hauttemperatur und dem Partialdruck des Wasserdampfs in der Umgebung p_a .

$$E_d = \lambda m A_{Du} (p_s - p_a) \quad \text{Gl (67)}$$

λ	Verdampfungswärme bei 35°C		kJ/kg
m	Durchlässigkeitsfaktor der Haut	$6,1 \cdot 10^{-4}$ kg/(h m ²)	mmHg
p_s	Gesättigter Wasserdruck der Haut		Pa
p_a	Wasserdampfdruck der Umgebung		Pa

Tabelle 50: Nomenklatur der Wärmeverluste mittels Wasserdiffusion durch die Haut

- Wärmeverlust durch Verdampfen von Schweiß an der Hautoberfläche (E_{sw})
Speziell diese Verluste sind nicht mehr durch einfache physikalische Phänomene zu beschreiben. Der Einfluss der Solltemperatur, die durch den Hypothalamus vorgegeben wird, ist eng gekoppelt mit der physiologisch vorgegebenen Hauttemperatur und der resultierenden Schweißproduktion. Die Zusammenhänge wurden in früheren Untersuchungen von Fanger [Fanger 1972] durch Regressionsanalysen bereits ermittelt. Dieser Zusammenhang ist in den Gleichungen 68/69 ersichtlich.

$$t_s = 35,7 - 0,032 \frac{H}{A_{Du}} \quad \text{Gl (68)}$$

$$E_{sw} = 0,42 A_{Du} \left(\frac{H}{A_{Du}} - 50 \right) \quad \text{Gl (69)}$$

t_s	durchschnittliche Hauttemperatur	°C
-------	----------------------------------	----

Tabelle 51: Nomenklatur der Wärmeverluste durch Verdampfen von Schweiß an der Hautoberfläche

- Latente Wärmeverluste durch Atmung (E_{re})
Wärme und Wasserdampf werden durch Konvektion und Verdampfung an den Schleimhäuten der Atemwege und an die eingeatmete Luft transferiert. Nach Erreichen der Lungenbläschen besitzt diese Luft Körpertemperatur und ist mit Wasserdampf gesättigt. Beim Ausatmen der Luft wird zwar

wiederum Wärme an die Luftröhre abgegeben, dennoch findet in Summe ein latenter Wärmeverlust statt.

$E_{re} = \dot{V}(W_{ex} - W_a)\lambda$		Gl (70)
\dot{V}	Lungenbezogenes Luftvolumen	m ³ /hr
W_{ex}	absolute Feuchte beim Ausatmen	kg/m ³
W_a	absolute Feuchte beim Einatmen	kg/m ³

Tabelle 52: Nomenklatur der latenten Wärmeverluste durch Atmung

- Sensible Wärmeverluste durch Atmung (L)

Die Wärmemenge, die aufgrund von Temperaturunterschieden der eingatmeten zur ausgeatmeten Luft auftritt, kann wie folgt in Gleichung 71 berechnet werden.

$L = \dot{V}c_p(t_{ex} - t_a)$		Gl (71)
c_p	spezifische Wärmekapazität der Luft	kJ/(kgK)
t_{ex}	Temperatur der ausgeatmeten Luft	°C
t_a	Temperatur der Umgebung	°C

Tabelle 53: Nomenklatur der sensiblen Wärmeverluste durch Atmung

- Wärmestrom durch die Kleidung (K)

Wärmetransport zwischen der Haut und der Außenoberfläche der Bekleidung ist ein sehr komplexer Vorgang. Dieser inkludiert interne Konvektion, Strahlungswärmeaustausch in den Luftzwischenräumen und Wärmeleitung durch die Kleidung selbst. Durch Vereinfachungen wurde zunächst die Einheit des „Clothing Factors“ eingeführt und weiters die Vereinfachung auf Gleichung 72 erarbeitet.

$K = A_{Du} \frac{t_s - t_{cl}}{0,18I_{cl}}$		Gl (72)
t_s	Oberflächentemperatur der Haut	°C
t_{cl}	Temperatur der Kleidung	°C
I_{cl}	Isolationswert der Kleidung	clo

Tabelle 54: Nomenklatur des Wärmestroms durch die Kleidung

Der eben genannte Clothing Factor ist der Isolationsfaktor der Bekleidung. Die Berechnung kann entweder durch Summieren der partiellen Isolationswerte oder durch pauschale typische Bekleidungskombinationen erfolgen. Als Beispiele sind einige Werte und Kleidungskombinationen in Tabelle 55 angeführt, weitere Informationen bezüglich dieses Faktors finden sich in der Norm ISO 9920 [ISO 9920:2005].

Kleidung	I _{cl}	
	clo	m ² k/W
Hemd leicht, lange Ärmel	0,2	0,031
Arbeitskittel	0,3	0,047
Unterhose, Hemd, Latzhose, Socken, Schuhe	0,8	0,125
Slip, Hemd, Hose, Socken, Schuhe	1,1	0,170

Tabelle 55: Clothing Faktoren typischer Kleidungsgegenstände [ÖNORM 7730:2006, S.22,23]

- Wärmeverluste durch Strahlung (R)

Strahlungswärmeaustausch findet zwischen dem menschlichen Körper und dessen Umgebung wie auch zwischen zwei physikalischen Objekten statt. Der Verlust, der dadurch entstehen kann, wird durch das Stefan- Boltzmannsche Gesetz beschrieben.

$R = A_{eff} \varepsilon \sigma [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4]$		Gl (73)
A_{eff}	effektive Körperoberfläche	m ²
t_{mrt}	mittlere Strahlungstemperatur	°C

Tabelle 56: Nomenklatur der Wärmeverluste durch Strahlung

Ganz entscheidend dabei ist natürlich die Fläche des bekleideten Körpers, die effektiv am Strahlungsaustausch teilnimmt (A_{eff}). Somit ergeben sich an dieser Stelle zwei verschiedene Abschätzungswerte für den Bekleidungsflächenfaktor.

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290I_{cl} & \text{wenn } I_{cl} \leq 0,078m^2K/W \\ 1,05 + 0,645I_{cl} & \text{wenn } I_{cl} > 0,078m^2K/W \end{cases}$$

f_{cl}	Bekleidungsflächenfaktor	-
----------	--------------------------	---

Tabelle 57: Nomenklatur des Wärmeverluste durch Strahlung

- Wärmeverluste durch Konvektion (C)

Dieser Wärmestrom definiert sich nach Gleichung 74 wie im Folgenden. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass der konvektive Übergang von der Freiströmgeschwindigkeit abhängig ist. Es muss zwischen freier Konvektion und gezwungener Konvektion unterschieden werden.

$$C = A_{Du} f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad \text{Gl (74)}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,05(t_{cl} - t_a)^{0,25} & \text{wenn } 2,05(t_{cl} - t_a)^{0,25} > 10,4\sqrt{v} \\ 10,4\sqrt{v} & \text{wenn } 2,05(t_{cl} - t_a)^{0,25} < 10,4\sqrt{v} \end{cases}$$

h_c	konvektive Wärmeübergangskoeffizienten	kJ/(hr m ² K)
t_a	Lufttemperatur	10 bis 30 °C
v_{ar}	relative Luftgeschwindigkeit	0 bis 1 m/s

Tabelle 58: Nomenklatur der Wärmeverluste durch Konvektion

Somit kann die Betrachtung der Gesamtwärmebilanz des Menschen, umgerechnet auf die notwendige Arbeit um diese Bilanz aufrechtzuerhalten und damit die Neutralität des Empfindens, der Behaglichkeit an sich, umgeformt werden und es ergibt sich in Gleichung 75 das „Predicted Mean Vote“.

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \cdot$$

$$\left[(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \{5733 - 6,99(M - W) - p_a\} - 0,42 \{ (M - W) - 58,15 \} - 1,7 \cdot 10^{-5} (5867 - p_a) \right] \\ \left[-0,0014M (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \} - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right]$$

Gl (75)

W	Wirksame mechanische Leistung	kJ/hr
\bar{t}_r	Mittlere Strahlungstemperatur	10 bis 40 °C
p_a	Wasserdampfpartikeldruck	0 bis 2700 Pa

Tabelle 59: Nomenklatur des vorhergesagten mittleren Votums

Die Berechnung des „Predicted Percentage of Dissatisfied“ wird über den gefundenen statistischen Ansatz wie folgt berechnet und ist in Abbildung 24 ersichtlich.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2)} \quad \text{Gl (76)}$$

Zusätzlich finden sich in dieser Darstellung die nach der ÖNORM 7730 festgelegten Behaglichkeitsklassen A, B und C. Diese definieren die maximalen Grenzen für die Einhaltung einer bestimmten thermischen Umgebung.

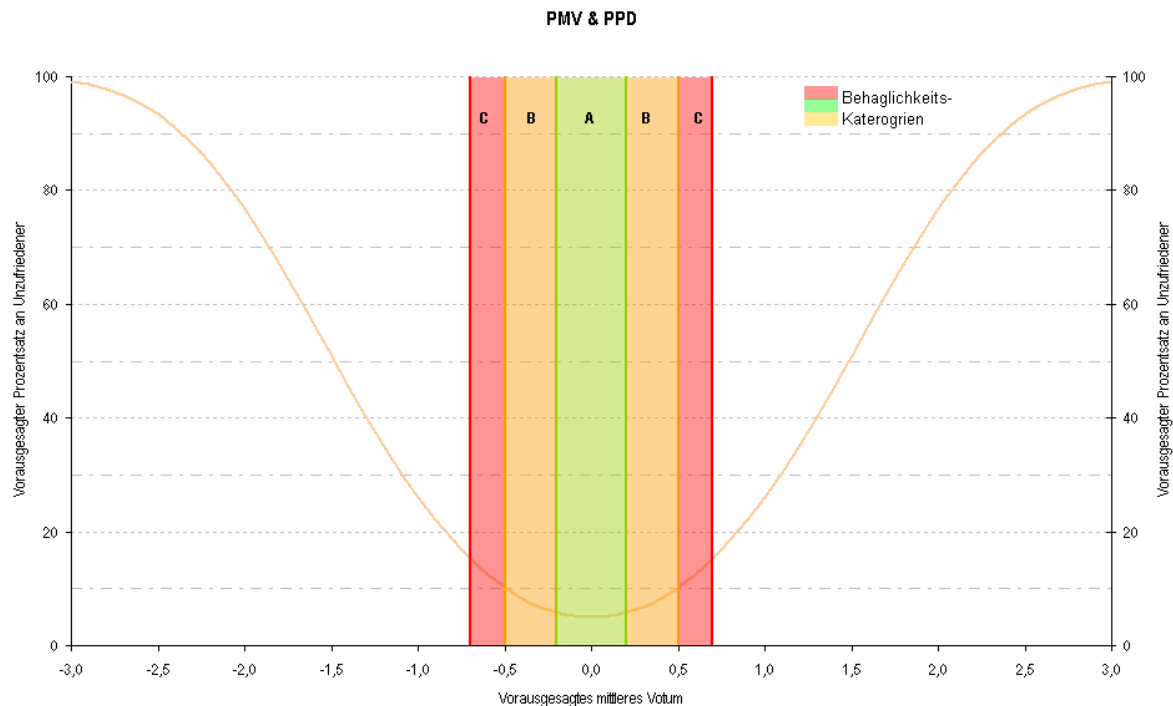


Abbildung 24: PMV & PPD mit den Behaglichkeitskategorien, eigene Darstellung nach ÖNORM 7730 [ÖNORM 7730:2006, S.:9]

2.3.3 Kriterien der lokalen Behaglichkeit

Neben den Kriterien der statistischen Behaglichkeit können auch weitere Kriterien festgelegt werden, um den thermischen Komfort zu bestimmen. Auch hier ist es möglich, einen Prozentsatz an Unzufriedenen zu bestimmen.

2.3.3.1 Zugluft

Die Zugluft ist die Beeinträchtigung durch Zugluft, dem Verhältnis von durchschnittlicher Luftgeschwindigkeit zur Standardabweichung der Luftgeschwindigkeit, also der Turbulenzintensität. Gleichung 77 beschreibt diesen Zusammenhang.

$$DR = (34 - t_a)(v_a - 0,05)^{0,62} (0,37 \cdot v_a \cdot Tu + 3,14) \quad \text{Gl (77)}$$

Mit der Nomenklatur und Einsatzgrenzen wie folgt in Tabelle 60

$t_{a,l}$	Lokale Lufttemperatur	20 bis 26°C
$\bar{v}_{a,l}$	Lokale mittlere Luftgeschwindigkeit	<0,5 m/s
Tu	Lokaler Turbulenzgrad	10 bis 60 %

Tabelle 60: Nomenklatur und Einsatzgrenzen von Draft Rate [ÖNORM 7730:2006, S.:10]

Insbesondere der Kopf gilt als Indikator der Zugluft, ist dies doch ein meist unbedeckter Teil des Körpers. Die physikalische Ursache der Zugluft und auch dessen Bewertungsmöglichkeiten liegen nun nach Mayer [Mayer 1990] im konvektiven Wärmeübergang. Dieser wird durch die Anströmrichtung, die Temperatur und den Turbulenzgrad oder die Turbulenzintensität bestimmt.

2.3.3.2 Vertikale Lufttemperaturunterschiede

Auch ein vertikaler Lufttemperaturunterschied zwischen Kopf und Fußgelenken kann zu Diskomfort führen. In Gleichung 78 ist dieser Zusammenhang als Funktion sowie in Abbildung 25 graphisch, wiederum mit den Behaglichkeitsklassen, dargestellt.

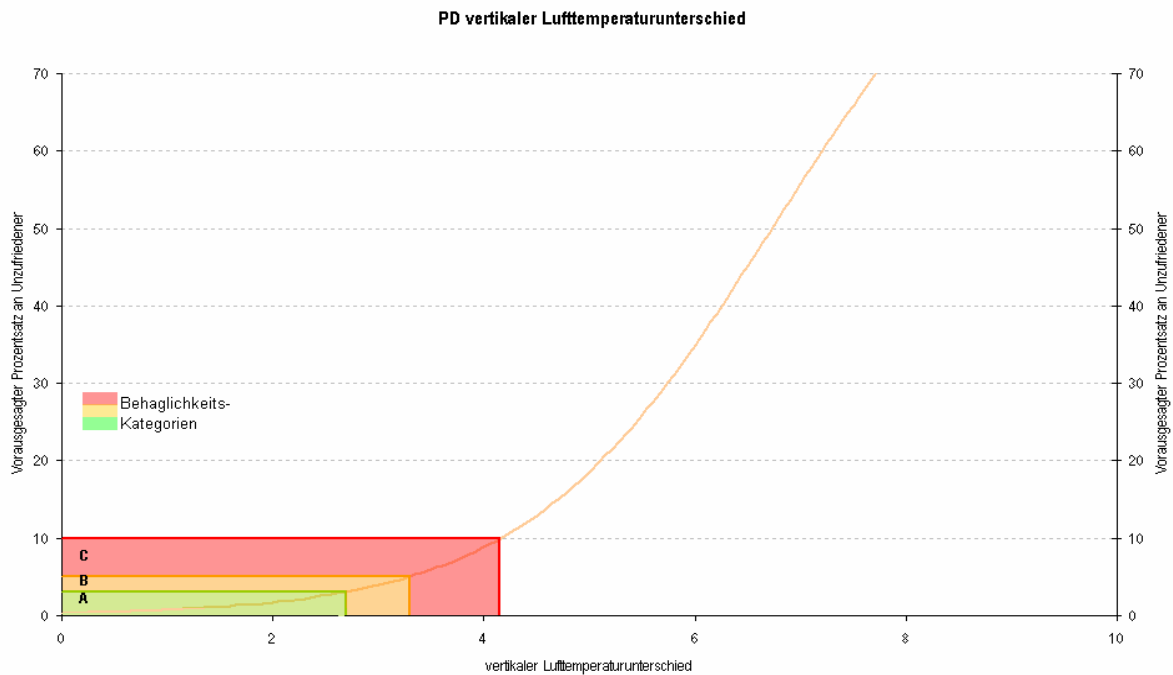


Abbildung 25: Prozentsatz an Unzufriedenen aufgrund vertikaler Lufttemperaturunterschiede, eigene Darstellung nach ÖNORM 7730 [ÖNORM 7730:2006, S.:11]

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(5,76 - 0,856 \Delta t_{a,v})}} \quad \text{Gl (78)}$$

Mit der Nomenklatur und Einsatzgrenzen wie folgt in Tabelle 61.

PD	Prozentsatz an Unzufriedenen	%
$\Delta t_{a,v}$	Lufttemperaturunterschied zwischen Kopf und Fuß	<8 K

Tabelle 61: Nomenklatur und Einsatzgrenzen des vertikalen Lufttemperaturunterschieds [ÖNORM 7730:2006, S.:11]

2.3.3.3 Warme und kalte Fußbodentemperatur

Aufgrund verschiedener Fußbodentemperaturen, sprich zu kalte oder zu warme Böden, kann der Prozentsatz an Unzufriedenen nach Gleichung 79 errechnet werden. Hierbei fließen die unterschiedlichen Materialien für Bodenbeläge oder unterschiedliche Haltungspositionen, wie sitzen oder liegen, nicht ein. Lediglich als Ausschlusskriterium für diesen Ansatz gilt ein längerer Aufenthalt bei elektrisch beheizten Böden, dessen Wärmezufuhr, anders als bei wasserführenden Heizungen unabhängig der Oberflächentemperatur ist.

$$PD = 100 - 94 \cdot e^{(-1,387 + 0,118 \cdot t_f - 0,0025 \cdot t_f^2)} \quad \text{Gl (79)}$$

Mit der Nomenklatur und Einsatzgrenzen wie folgt in Tabelle 62.

PD	Prozentsatz an Unzufriedenen	%
t_f	Fußbodentemperatur	°C

Tabelle 62: Nomenklatur und Einsatzgrenzen von warmen und kalten Fußböden [ÖNORM 7730:2006, S.:12]

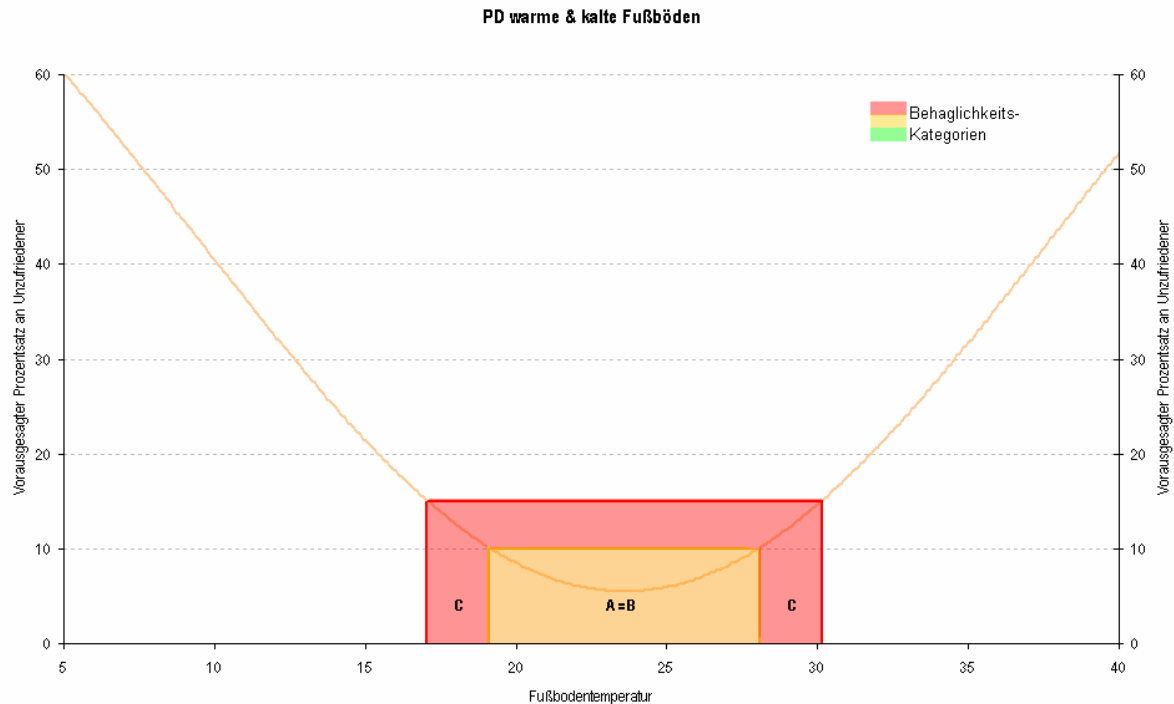


Abbildung 26: Prozentsatz an Unzufriedenen aufgrund warmer und kalter Fußböden, eigene Darstellung nach ÖNORM 7730 [ÖNORM 7730:2006, S.:11]

2.3.3.4 Asymmetrische Strahlungstemperaturen

Asymmetrische Strahlungstemperaturen können ebenfalls zu Unbehagen in einem Raum führen. Dies kann vor allem durch warme/kalte Wände oder warme/kalte Decken herbeigeführt werden. Je nach Oberflächenverhältnis (z.B. vorne/hinten) würde sich der Prozentsatz an Unzufriedenen ändern, die angeführten Gleichungen 80-83 geben deshalb einen konservativen Ansatz für den worst case ab.

Warme Decke

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(2,84 - 0,174 \cdot \Delta t_{pr})} - 5,5 \quad \text{Gl (80)}$$

Kalte Wand

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 \cdot \Delta t_{pr})} \quad \text{Gl (81)}$$

Kalte Decke

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(9,93 - 0,50 \cdot \Delta t_{pr})} \quad \text{Gl (82)}$$

Warme Wand

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(3,72 - 0,052 \cdot \Delta t_{pr})} - 3,5 \quad \text{Gl (83)}$$

Mit der Nomenklatur und Einsatzgrenzen wie folgt in Tabelle 63.

PD	Prozentsatz an Unzufriedenen	%
Δt_{pr}	Asymmetrische Strahlungstemperatur	K
	Warme Decke	<23 K
	Kalte Wand	<15 K
	Kalte Decke	<15 K
	Warme Decke	<35 K

Tabelle 63: Nomenklatur und Einsatzgrenzen von warmen und kalten Fußböden [ÖNORM 7730:2006, S.:13]

Die Ermittlung der maximalen Strahlungsasymmetrie erfolgt in einem Würfel, vereinfacht durch die gegenüberliegenden Flächen oder genauer durch den Temperaturunterschied zweier Halbräume nach Gleichung 84 und 85 [Hausladen 2004].

$$T_R = \sum_{K=1}^N \varphi_k T_k \tag{84}$$

$$\varphi_k = \frac{1}{8} - \frac{1}{4\pi} \arctan \left[\frac{h\sqrt{a^2 + b^2 + h^2}}{a \cdot b} \right] \tag{85}$$

T_R	Strahlungstemperatur	°C
φ_k	Einstrahlzahl zwischen Betrachtungspunkt und Fläche K	rad
T_K	Oberflächentemperatur der Fläche K	°C
a, b	Seitenlänge der Fläche K	m
h	Abstand zur Fläche K	m

Tabelle 64: Nomenklatur zur Ermittlung der exakten Strahlungstemperatur [Hausladen 2004, S.:13]

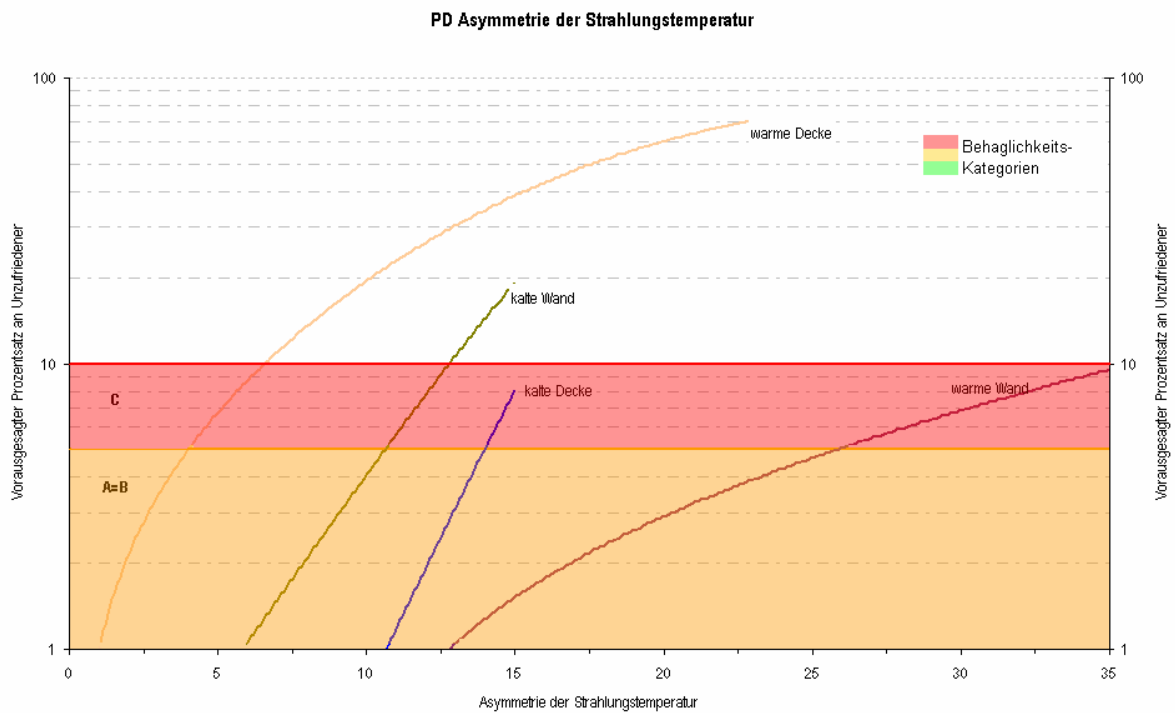


Abbildung 27: Prozentsatz an Unzufriedenen aufgrund asymmetrischer Strahlungstemperatur, eigene Darstellung nach ÖNORM 7730 [ÖNORM 7730:2006, S.:13]

2.3.4 Zusammenfassung

Das zentrale Thema dieser Arbeit ist die thermische Behaglichkeit. Nicht zuletzt wegen der historischen und gesellschaftlichen Entwicklung ist dies ein immer wichtiger werdendes Motiv im Gebäudesektor. Die sehr großen Einflüsse der menschlichen Individualität gestaltet diese Materie zu einer vermeintlich unauflöslich zu handhabenden Aufgabe. Alleine die Entwicklung der Architektur und des Bauwesens und der dazugehörigen technischen Gebäudeausstattung lässt eindeutig hervorgehen, dass der Mensch das Bestreben hat, sich seine Umgebung, sei es das Arbeits- oder Wohnumfeld, komfortabel und behaglich zu gestalten. Die grundsätzliche Definition der thermischen Behaglichkeit wird als ein Punkt ohne besonderes Gefühl, der zwischen dem Körperempfinden, der Blutfülle und des Schwitzens einerseits und dem Gefühl des Frierens andererseits, beschrieben.

Der menschliche Organismus hat das Bestreben, immer eine konstante Kerntemperatur und damit einen funktionierenden Mechanismus zur Verfügung zu stellen. P.O. Fanger hat bereits Ende der 60er-Jahre aus dieser Tatsache heraus eine Wärmebilanz des Menschen entwickelt. Welche er folglich in eine statistisch beherrschbare Kennzahl zur Beschreibung des thermischen Befindens umlegen konnte. Dieser Index ist das vorhergesagte mittlere Votum, aus welcher der mittlere vorhergesagte Prozentsatz an unzufriedenen Personen errechnet werden kann. Wenn diese Bilanz null ergibt, muss der Körper keine Anstrengungen unternehmen, um einen Temperatenausgleich zu erreichen. Entfernt sich diese Differenz von null, muss nun der Organismus für den Ausgleich sorgen und dies wird als Diskomfort empfunden.

In die Berechnung des PMV fließen die physiologischen Parameter, der Bekleidungsfaktor und der Energieumsatz durch etwaige Tätigkeiten sowie die physikalischen Parameter Luft- und Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit ein. Des Weiteren können nach ÖNORM 7730 auch Kriterien der lokalen Behaglichkeit mathematisch abgebildet und in Folge ein Prozentsatz an Unzufriedenen errechnet werden. Dies ist die Draft Rate, welche die Zuglufterscheinung beschreibt, die vertikalen Lufttemperaturunterschiede vom Knöchel zum Kopf bei sitzenden Tätigkeiten, warme und kalte Fußbodentemperaturen sowie die asymmetrischen Strahlungstemperaturen.

6 Zusammenfassung

Die thermische Behaglichkeit ist ein immer wichtiger werdendes Thema im Gebäudesektor. Bereits Ende der 60er-Jahre konnte durch P.O. Fanger eine mathematische Beschreibung dieser Problemstellung entwickelt werden. Eine Optimierung des Komforts in Gebäuden kann nur in Kombination mit der energetischen Betrachtung zu einem sinnvollen, nachhaltigen Ergebnis führen. Die derzeitigen Bestrebungen, im Rahmen der EU-Gebäuderichtlinie, zur einheitlich normierten Energieausweisberechnung belegen die Bedeutung und die Potenziale der energetischen Bewertung von Gebäuden. Die Verfahren zur Klassifizierung des Verbrauchs sollen unter dem Gesichtspunkt der Behaglichkeit durchleuchtet und eine angemessene Methode zur Beschreibung dieser entwickelt werden. Die klare Zieldefinition lautet somit, eine möglichst exakte Behaglichkeitsanalyse mit den existierenden Softwaretools durchzuführen und zu bewerten.

Die statischen Berechnungsverfahren dienen der Berechnung des jährlichen und monatlichen Heiz- bzw. Kühlwärmebedarfs. Die Energiebilanzen aller Programme setzen sich aus den Termen Transmissions- und Lüftungsverluste, solare und interne Gewinne, sowie dem Nutzungsgrad dieser Gewinne zusammen. Die Erstellung dieser erfolgt in unterschiedlicher Weise zum einen als Monatsbilanz und zum anderen als Heizperiodenverfahren. Als gemeinsame Grundlage dient die EN 832. Allerdings differenzieren sich die einzelnen Programme in deren Detailausführungen. Zu vergleichen sind die Verfahren nach dem Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB), die Programme ECOTECH und das Passivhaus Projektierungspaket (PHPP).

Als dynamisches Verfahren steht TRNSYS zur Verfügung. Dieses ist ein weitgehend modular aufgebautes, dynamisches Gebäude- und Anlagensimulationspaket. Es zeichnet sich durch dessen Mehrzonengebäudemodell mit mehreren integrierten Untermodellen zur Erfassung der bauphysikalischen Gebäudehülle und relevanter Ausstattung aus. Die gekoppelte Betrachtung des Gebäudes und der Anlagentechnik lässt große Optimierungspotentiale ersichtlich werden. Die wichtigsten mathematischen Modelle sind die Transferfunktion und das Sternknotenmodell. Als Strömungssimulationspaket wird FLUENT herangezogen. Dieses Tool beruht auf numerischen Lösungsverfahren. Das Lösen dieser Gleichungen wird Computational Fluid Dynamics (CFD) genannt, was auf der Finiten Volumen Methode basiert. Die Domain wird folglich in Kontrollvolumen aufgeteilt, für welche dann die Massen-, Impuls-, Energie-, Spezies- Erhaltung gelöst wird.

Das zentrale Thema dieser Arbeit ist die thermische Behaglichkeit. Nicht zuletzt wegen der historischen und gesellschaftlichen Entwicklung ist dies ein immer wichtiger werdendes Motiv im Gebäudesektor. Die sehr großen Einflüsse der menschlichen Individualität gestalten diese Materie zu einer schwierig zu handhabenden Aufgabe. Die grundsätzliche Definition der thermischen Behaglichkeit wird als ein Punkt ohne besonderes Gefühl, der zwischen dem Körperempfinden, der Blutfülle und des Schwitzens einerseits und dem Gefühl des Frierens andererseits, beschrieben. P.O. Fanger hat aus dieser Tatsache heraus eine Wärmebilanz des Menschen entwickelt, welche er folglich in eine statistisch beherrschbare Kennzahl zur Beschreibung des thermischen Befindens umlegen konnte. Dieser Index ist das vorhergesagte mittlere Votum (PMV), aus welcher der mittlere vorhergesagte Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) errechnet werden kann. Wenn diese Bilanz null ergibt, muss der Körper keine Anstrengungen unternehmen um einen Temperatenausgleich zu erreichen. Entfernt sich diese Differenz von null, muss nun der Organismus für den Ausgleich sorgen und dies wird als Diskomfort empfunden. Des Weiteren können nach ÖNORM 7730 auch Kriterien der lokalen Behaglichkeit mathematisch abgebildet und in Folge ein Prozentsatz an Unzufriedenen errechnet werden. Dies sind die Draft Rate, welche die Zuglufterscheinung beschreibt, die vertikalen

Lufttemperaturunterschiede vom Knöchel zum Kopf bei sitzenden Tätigkeiten, warme und kalte Fußbodentemperaturen sowie die asymmetrischen Strahlungstemperaturen.

Die entscheidende Grundlage für den praktischen Teil der Arbeit liefert das sorgfältig geplante Passivhaus des Architekten Herbert C. Leindecker. Dieses Passivhaus wurde 2002 geplant und 2003/2004 gebaut. Die Konzeption erfolgte nach dem Prinzip der integralen Planung. Wobei einerseits die Erreichung der bestmöglichen Energieeffizienz, durch das Zusammenspiel von allen Gewerken von der Planung bis hin zur Umsetzung, und andererseits die wohl wichtigste Fragestellung eines behaglichen und für den Bauherrn optimal ausgelegten Raumklimas, sowie eine bestmöglich arrangierte Raumgruppierung, im Vordergrund standen.

Anhand der vorgegebenen Ausgangssituation sind grundlegende Annahmen, wie die Definition der unterschiedlichen Baustandards, Baustoffbestimmungen, Flächenermittlung und die Aufbereitung der Klimadaten durchgeführt worden. Für den Vergleich der statischen Berechnungsverfahren und der dynamischen Simulation werden der Passivhaus- und der Niedrigstenergiehausstandard herangezogen. Die Schritt für Schritt Analyse wird darauf aufbauend mit einer Reihe von Simulationen mit unterschiedlichen Randbedingungen und Modellaufbauten durchgeführt. Dabei wird auf zwei wesentliche Endergebnisse besonderer Wert gelegt, das sind der Heizwärmebedarf und der PMV bzw. PPD Index. Auf Grund dieser Analyse sollen Schlüsse gezogen werden können, welche Verfeinerungen einer dynamischen Gebäudesimulation mit TRNSYS im Hinblick auf die zwei beschriebenen und für die Beschreibung der Qualität eines Gebäudes wesentliche Ergebnisse Sinn machen und welche überflüssigen Arbeitsaufwand darstellen.

Zu Beginn einer jeder CFD Simulation steht das Vernetzen der Geometrie. Erster Schritt ist dabei die Erzeugung einer Geometrie, wobei dies einerseits durch Importieren aus CAD-Programmen erfolgen kann oder durch die Möglichkeit die Geometrie selbst zu erzeugen. Die C_p -Werte und deren Eingabe kann in beliebiger Genauigkeit erfolgen. In diesem Fall mit der einfachen Gebäudegeometrie und geringen Bauhöhen kann ein einzelner Wert pro Fassadenausrichtung als ausreichend betrachtet werden. Die Kalkulation erfolgt in acht Azimutwinkeln, die tatsächlichen C_p -Werte werden in TRNFLOW, mittels der in den Wetterdaten vorhandenen Windrichtungen, interpoliert. Einen sehr massiven Einfluss auf das Raumklima hat das Heizungssystem, deshalb ist auch diese Anordnung als extra Modell durchleuchtet worden. Die Wärmeeinbringung kann auf verschiedene Arten erfolgen, entscheidend dabei ist die Aufteilung in Strahlungswärme und konvektive Wärme. Um ein sehr feinmaschiges Netz in der letztendlichen Version des Raumes zu vermeiden, wird der verwendete spezielle Lüftungsauslass in einer separaten Simulation untersucht, um dann das Strömungsprofil an die Raumsimulation zu übergeben. Dies bietet den Vorteil, dass das Auslassprofil exakter, mit einer höheren Anzahl an Zellen simuliert werden kann. Bei semitransparenten Wänden (z.B. Fenster) ist die Nachbildung der strahlungsphysikalischen Parameter wie Transmission, Reflexion, Absorption und Brechung von entscheidender Bedeutung. Wichtig dabei ist es, den exakten Einstrahlwinkel, sowie direkte und diffuse Anteile der Strahlung zu berücksichtigen. Der betrachtete Raum ist die Wohnküche im Erdgeschoss im Süden des Hauses. Dieser Raum bietet sich auf Grund der notwendigen Vielfalt der physikalischen und geometrischen Modelle am Besten zur praktischen Umsetzung aller beschriebenen Theorien und Einzelmodelle an.

Zunächst wird bei der Betrachtung der einzelnen Programme mit ihren unterschiedlichen Tools klar, dass die Schwächen des einen Pakets die Stärken des anderen sind. So kann in TRNSYS unter den vereinfachten Bedingungen nur eine Ausarbeitung der statistischen Behaglichkeit erfolgen. Diese Betrachtungen sind für Langzeitanalysen auf Grund des Sternknotenmodells und groben Auflösung des Gebäudes und daraus folgend der raschen Simulation bestens geeignet. In FLUENT werden dagegen alle Betrachtungen auf Grund der für eine zuverlässige Auflösung erforderlichen hohen Anzahl an Zellen, alle Simulationen sehr zeitaufwändig. Dennoch überwiegt hier der Vorteil, alle

Behaglichkeitskriterien, der statistischen und lokalen Untersuchungen, bis ins Detail betrachten zu können.

Eine mögliche Kombination ermöglicht folgende Vorgangsweise, welche keine direkte Kopplung bedeutet, aber dennoch einen Ansatz bietet um diese beiden Simulationspakete zu verbinden. Der Ansatz besteht aus vier wesentlichen Schritten. Der erste ist die Simulation der externen Strömung, zur Berechnung der C_p -Werte. Diese werden an TRNSYS übergeben und für die Simulation des thermischen Verhaltens des Gebäudes verwendet. Neben den Energiebilanzen und Heiz- bzw. Kühlwärmebedarf werden für die weitere Kopplung eine oder mehrere Extremsituationen herausfiltert und als Randbedingungen für den nächsten Schritt in FLUENT eingelesen. Hier wird die Interne Strömung mit allen Detailbetrachtungen der lokalen Behaglichkeit durchgeführt. Der nächste Übergabewert ist die mittlere Luftgeschwindigkeit im Raum an TRNSYS, mit welcher anschließend Simulationen für die langzeitigen PMV und PPD Betrachtungen erfolgen.

Die vergleichende Darstellung der statischen und dynamischen Verfahren bietet generell eine zufrieden stellende Übereinstimmung. Das Programm PHPP und die Umsetzung der Gebäuderichtlinie liegen mit circa 10 Prozent Abweichung gegenüber der TRNSYS-Simulation knapp neben dieser. Wichtig hierbei ist die Standardisierung der Wetterdatensätze. Ist diese erfolgt, liegen die genannten Programme sogar bis auf 2 Prozent bei der Simulation. Zudem kann gesagt werden, dass selbst bei unterschiedlichen Bilanzierungsverfahren und zusätzlichen, unterschiedlich gewichteten Einzelkomponenten dieselben oder zumindest hinreichend genaue Jahresergebnisse erzielt werden können. Aus der Schritt für Schritt Analyse kann geschlossen werden, dass Simulationen mit vereinfachten Modellen für die Berechnung des Heizwärmebedarfs ausreichend sind. Diese lassen allerdings für keine der anderen Betrachtungen eine hinreichend genaue Aussage zu. So sind komplexe Modelle für die Betrachtungen der Behaglichkeit und der Korrelation zur Realität unabdingbar. Die Einbindung der technischen Gebäudeausstattung sollte nur bei dementsprechend genauen Modellen berücksichtigt werden. Die nur mittelmäßigen, aber nicht zu komplexen Simulationen führen in allen Betrachtungen, thermisch, energetisch oder komforttechnisch, zu falschen Ergebnissen.

Die Untersuchung der statischen Verfahren lässt zwei Schlüsse zu. Erstens ist eine statische Berechnung des Energieverbrauchs lediglich eine Annäherung an reale Bedingungen, die letztlich nur zur genormten Klassifizierung von Gebäuden dient. Die Berechtigung dieser Verfahren liegt einzig in dieser Verwendung, eine detaillierte Aussage ist auf keinen Fall möglich. Zweitens ist die, für die Bewohner wichtigste Fragestellung, des thermischen Komforts, in keiner Weise berechen- und planbar. Wenn eine ausführliche und exakte Planung aller relevanten Parameter erfolgen soll, muss ein anderes Berechnungsverfahren gewählt werden. Damit kann der nächste, in Richtung penible Konzeption gehende, logische Schritt nur die dynamische Simulation von Gebäuden sein. Bei den Ergebnissen dieser Simulation spielt das Sternknotenmodell und die Transferfunktion eine wesentliche Rolle. Durch die Beschreibung der Zonen mit nur einem einzigen Luftknoten sowie die Betrachtung aller Umschließungsflächen in rein physikalischen Zusammenhängen und wiederum mit jeweils einem einzelnen Knoten, sind die erhaltenen Resultate nur bedingt für die Komfortanalyse tauglich. Die Aussagekraft liegt in der gesamthaften Betrachtung der Gebäude. Dem Detaillierungsgrad der erforderlichen Behaglichkeitsparameter kann nicht nachgekommen werden.

Als Vision oder auch wichtigster Schluss aus diesen Überlegungen geht die Verdrängung der statischen Verfahren durch die dynamische Simulation hervor. Eine gezielte Simulation eines jeden Gebäudes, könnte mehrere zielführende Ergebnisse liefern. Die Abstimmung und Auslegung der technischen Anlagen mit dem spezifischen Gebäude kann optimiert und nach energetischen Kriterien bestmöglich beurteilt werden. Die ansonsten doppelte Berechnung des genormten

Ausweises und die Betrachtung der Auslegungskriterien könnten in einem Schritt erfolgen. Der Energieausweis ist ein zusätzliches Nebenprodukt zur normierten Vergleichbarkeit.

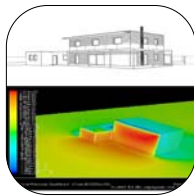
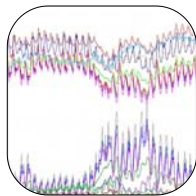
Aus der CFD-Modellierung und allen Variationen des Gesamtmodells wird ein breites Spektrum an realistischen aber teils auch physikalisch fragwürdigen Ergebnissen ersichtlich. Lediglich eine Empfehlung in Richtung großflächigere Heizkörper, also der Verwendung von Flächenheizungen, kann abgegeben werden. Wichtig ist dennoch, dass eine Abschätzung der Folgewirkungen, der in der Realität variablen Parameter der Luftmengen und der Heizleistungen, getroffen werden kann. Die letztlich noch offene Frage betrifft den Vergleich dieser Ergebnisse mit den Grundlagen und der diesbezüglichen Literatur. Die anspruchsvollste Aufgabe der CFD-Analyse stellt die Vernetzung sowie die reale Abbildung der Randbedingungen dar. Durch die gesamte Modellierung der Wohnküche zeigt sich, dass zumindest ansatzweise die richtige Ausbildung bzw. Abbildung der Physik erfolgt ist. Die deutlichen Unterschiede zur Vergleichsvariante aus dem Behaglichkeitsatlas werden durch ungleiche Randbedingungen maßgeblich bestimmt und hervorgerufen. Die Untersuchung bezüglich der physikalischen Phänomene kann somit positiv abgeschlossen werden.

Zu hinterfragen ist die statistische Behaglichkeitsbewertung im Hinblick auf deren Anwendung in einem Einfamilienhaus. Die sehr große Individualität der Bewohner kann mitunter von den Ergebnissen der Untersuchungen nach Fanger erheblich abweichen. Die Anpassung dieses vorhergesagten mittleren Votums an diese Anforderungen wäre sehr wünschenswert, die Aussagekraft würde enorm zunehmen. Eine weitere Detaillierung in diese Richtung wäre durchaus eine sehr interessante und ebenso wichtige Aufgabe für zukünftige Arbeiten. Bei all diesen Betrachtungen und Bewertungen werden durchwegs die Einsatzgrenzen der Gleichungen und damit nur mehr eine bedingte Aussagekraft dieser erreicht. Die zugrunde liegende Norm (ÖNORM 7730:2006) gibt praktisch keine Hinweise, wie solche Fälle zu behandeln sind. Die erreichten Wertungen der lokalen Behaglichkeit können somit nur als Anhaltswerte gesehen werden. Für eine passende Beurteilung müssten die Grundlagen zu diesen Gleichungen überarbeitet bzw. neue Messungen durchgeführt und neu dargestellt werden.

Die Kopplung von TRNSYS und FLUENT ist mittels der einzelnen Schritte durch etliche Einsatzmöglichkeiten und Grenzen gekennzeichnet. Dennoch sind diese Algorithmen beherrschbar und in der Praxis anwendbar. Beachtet werden muss allerdings immer, dass jeder Schritt Vereinfachungen bzw. mathematisch und physikalisch gesehene Kompromisse mit sich bringt. Das Endergebnis muss somit in vielerlei Hinsicht untersucht und auf Plausibilität überprüft werden. Dieser Abgleich mit den realen Bedingungen ist nicht einfach zu gestalten und erfordert umso genauere Vorgangsweisen. Eine weitere Überprüfung des Realitätsbezugs könnte durch Messungen vor Ort durchgeführt werden, was allerdings diese Vorgangsweise bei der Planung in Frage stellt. Genauso wichtig ist die Betrachtung der Sinnhaftigkeit von Mittelwertbildungen bzw. die Maxima-Minima-Untersuchungen. Es müssen Wege gefunden werden um dem gesamten Ablauf noch mehr Stichhaltigkeit zu geben.

Für die Praxis relevant sind vor allem die einfache Handhabung und schnelle Ausführung etwaiger Berechnungen. Diesen Forderungen kann keine der hier vorgestellten Methoden nachkommen. Dennoch lassen sich vereinfachte Ansätze zur Einhaltung von thermisch wirksamen Einflüssen auf die Behaglichkeit ausarbeiten und eine detaillierte Betrachtung muss nur mehr in speziellen Fragestellungen erfolgen. Die eindeutig wichtigste und auch aus anderen Darlegungen bekannte Regel ist, eine möglichst hochwertige thermische Außenhülle zu entwickeln. Der Einfluss der Oberflächentemperaturen an Wänden und vor allem an Fenstern kann somit minimiert werden. Wenn weiters die Ausführungen von Lüftungsanlage nach neuesten Erkenntnissen und unter Berücksichtigung der minimalen Anforderungen an den Luftwechsel erfolgen, wird sich auch die Strömungsausbildung in einem annehmbaren Rahmen halten. Die gesamthaft zu erwartende Behaglichkeitssituation kann dann im Allgemeinen als sehr positiv eingestuft werden.

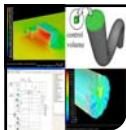
Gebäudesimulation zur Analyse der thermischen Behaglichkeit nach EN ISO 7730



Neyer Daniel

TIM Expertentag: „Gebäudetechnik – Energieeffizienz ~~ODER~~ UND Behaglichkeit“
09. April 2008

FH OÖ Studiengänge • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels



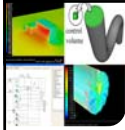
Inhalt



- Grundlagen der Behaglichkeit
- EN ISO 7730:2006
- Simulationen zur Klassifizierung der Behaglichkeit
- Resümee
- Beispiele

FH OÖ Studiengänge • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

Folie 2



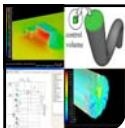
Grundlagen



Behaglichkeit klassisch ...

- Sehr subjektive, rechnerisch nicht erfassbare Größe
 - Geschlecht, Alter, Konstitution, Gesundheit, Nahrungsaufnahme, Alter, Jahreszeit, Art der Tätigkeit, psychische Komponenten, ...

 - Bekannte physikalische Parameter
 - Raumlufttemperaturen 20-26° C je nach Tätigkeit
 - Oberflächentemperaturen max. 4 K Unterschied
 - Luftfeuchtigkeit 30% bis 70% (besser 40-60)
 - Luftgeschwindigkeit <0,2 m/s bei 20° (besser 0,1)
- Durch analytische, statische Berechnungen bestimmt



Grundlagen



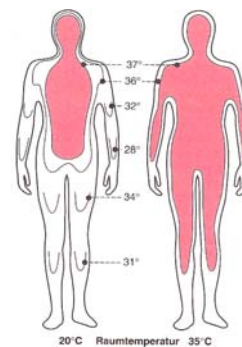
Behaglichkeit technisch...

Wärmebilanz des Menschen

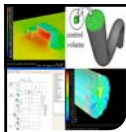
$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L = K = R + C$$

mit:

- H Interne Körperwärme
- E_d Wärmeverlust durch Wasserdiffusion
- E_{sw} Wärmeverlust durch Verdampfung von Schweiß an der Hautoberfläche
- E_{re} Latente Wärmeverluste durch Atmung
- L Sensible Wärmeverluste durch Atmung
- K Wärmeleitung durch die Kleidung
- R Wärmeverluste durch Strahlung
- C Wärmeverluste durch Konvektion



→ Statistischer Zusammenhang nach P.O. Fanger bereits 1960!

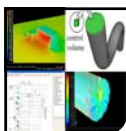


Grundlagen



Behaglichkeit zeitgemäß ...

- Zusammenhänge erfassen
 - Gebäudesimulation
 - Strömungssimulation
- Berücksichtigung von physiologischen Parameter
 - Metabolic Rate (Aktivitätsgrad)
 - Clothing Factor (Bekleidungsfaktor)
- Grundsätze der EN ISO 7730
 - Statistische Behaglichkeit
 - Lokale Behaglichkeitskriterien



Grundlagen



PMV (Predicted Mean Vote):

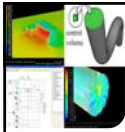
Vorhersage der Meinung einer großen Personengruppe über dessen thermisches Befinden als Funktion von Aktivität, Kleidung, Luft-Oberflächentemperatur, mittlerer Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte
Wert von -3 (kalt) bis +3 (heiß)

PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied):

Errechnet sich aus dem PMV, Wert in %

Auch bei optimalen Bedingungen sind 5% der Personen unzufrieden!

Bezeichnung	PMV	PPD
kalt	-3	99,1
kühl	-2	76,8
Etwas kühl	-1	26,1
neutral	0	5,0
etwas warm	1	26,1
warm	2	76,8
heiß	3	99,1

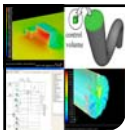


Grundlagen



Resümee

- Behagliches Raumklima ist Grundvoraussetzung für produktives Arbeiten!
- Gebäudetechnik hat Einfluss auf alle Behaglichkeitskriterien
 - Oberflächen- und Lufttemperaturen, Strahlungsasymmetrie
 - Licht und Beleuchtung
 - Belüftung, Luftgeschwindigkeit
- Amortisation von Kosten durch verbesserte Arbeitsbedingungen möglich!
 - Anzahl der Stunden Krankenstand / Mitarbeiter

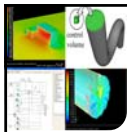


EN ISO 7730:2006



Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD- Indexes und der Kriterien der lokalen Behaglichkeit

- Erstfassung bereits 1995
- Aktuell ÖNORM EN ISO 7730:2006



EN ISO 7730:2006

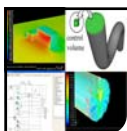


Unterscheidung in

- **Statistische Behaglichkeit (nach Fanger)**
 - PMV / PPD

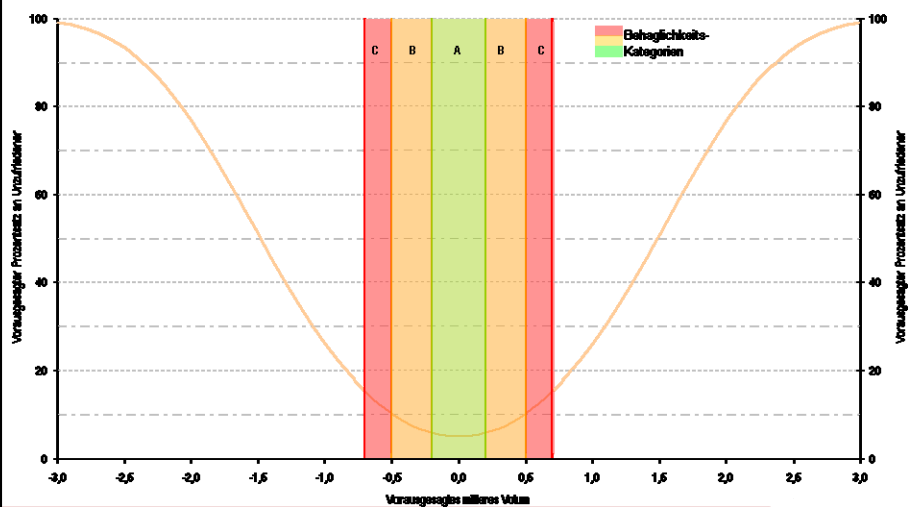
 - **Lokale Behaglichkeit (Berechnung von People Dissatisfied)**
 - Draft (Draught) Rate
 - Asymmetrie der Strahlung
 - Warme/kalte Fußböden
 - Vertikaler Lufttemperaturunterschied

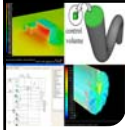
 - **Mindestanforderungen durch Behaglichkeitsklassen**
- Mit analytischen Methoden berechenbar ?



EN ISO 7730:2006

PMV & PPD





EN ISO 7730:2006



Berechnung von PMV

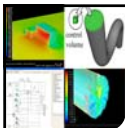
$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \cdot$$

$$\left[(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \{5733 - 6,99(M - W) - p_a\} - 0,42 \{ (M - W) - 58,15 \} - 1,7 \cdot 10^{-5} (5867 - p_a) \right]$$
$$- 0,0014M(34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \} - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)$$

Berechnung von PPD

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2)}$$

→ Mit analytischen Methoden berechenbar ?



EN ISO 7730:2006



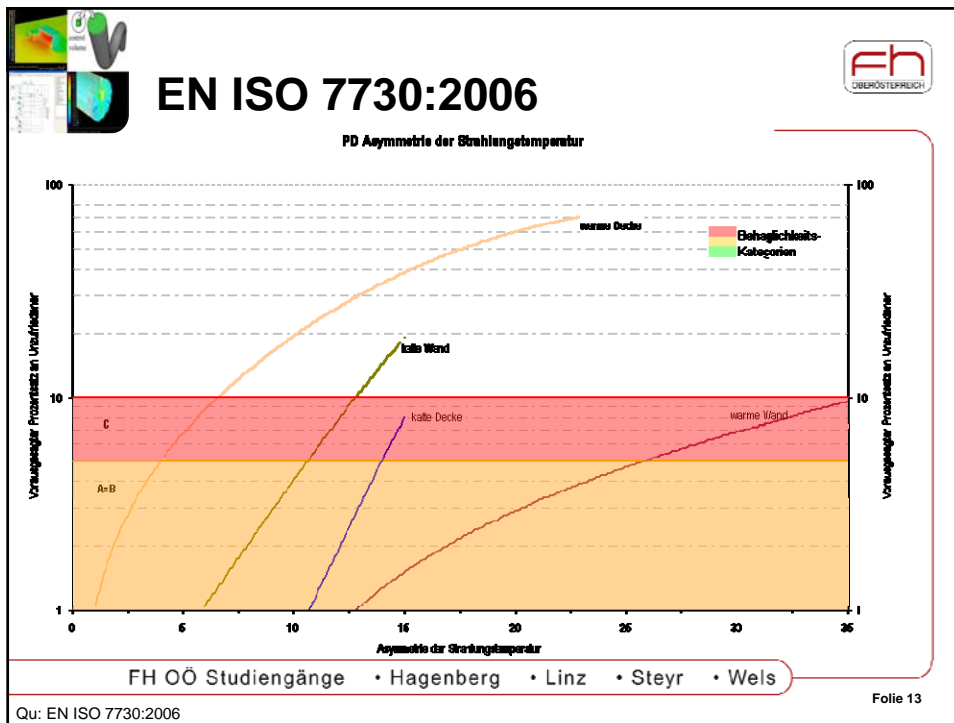
Draft (Draught) Rate

Unbehaglichkeit aufgrund von Zuglufterscheinung

$$DR = (34 - t_a)(v_a - 0,05)^{0,62} (0,37 \cdot v_a \cdot Tu + 3,14)$$

$t_{a,l}$	Lokale Lufttemperatur	20 bis 26°C
$\bar{v}_{a,l}$	Lokale mittlere Luftgeschwindigkeit	<0,5 m/s
Tu	Lokaler Turbulenzgrad	10 bis 60 %

→ Mit analytischen Methoden berechenbar ?



EN ISO 7730:2006

Berechnung von Strahlungsasymmetrie

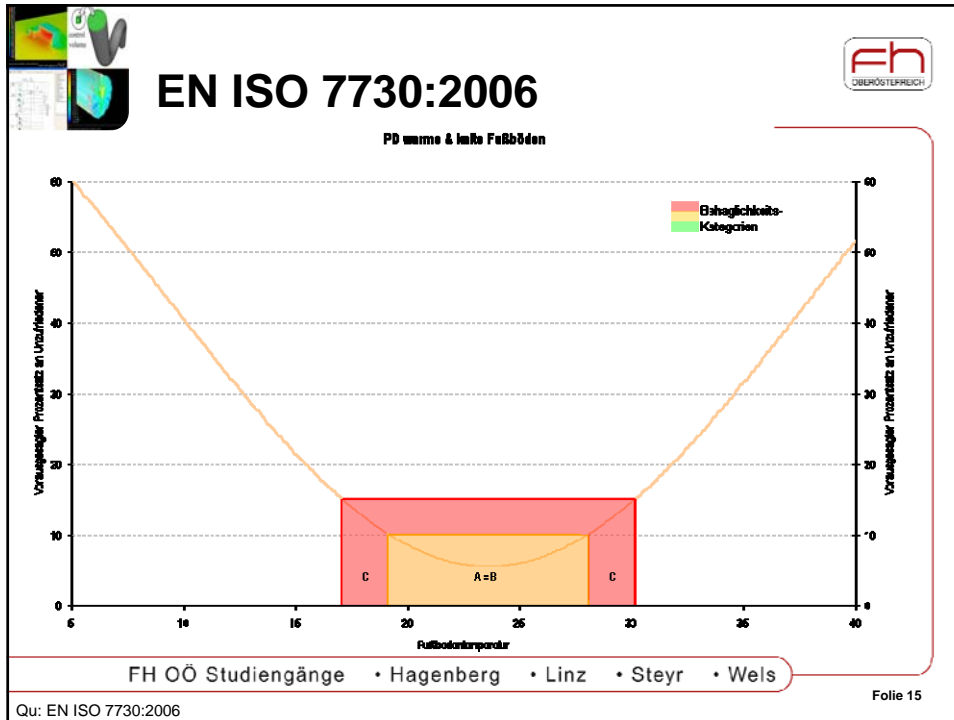
- Warme Decke $PD = \frac{100}{1 + \exp(2,84 - 0,174 \cdot \Delta t_{pr})} - 5,5$
- Kalte Wand $PD = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 \cdot \Delta t_{pr})}$
- Kalte Decke $PD = \frac{100}{1 + \exp(9,93 - 0,50 \cdot \Delta t_{pr})}$
- Warme Wand $PD = \frac{100}{1 + \exp(3,72 - 0,052 \cdot \Delta t_{pr})} - 3,5$

→ Mit analytischen Methoden berechenbar ?

FH OÖ Studiengänge • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

Qu: EN ISO 7730:2006

Folie 14



EN ISO 7730:2006

Berechnung Warme/kalte Fußböden

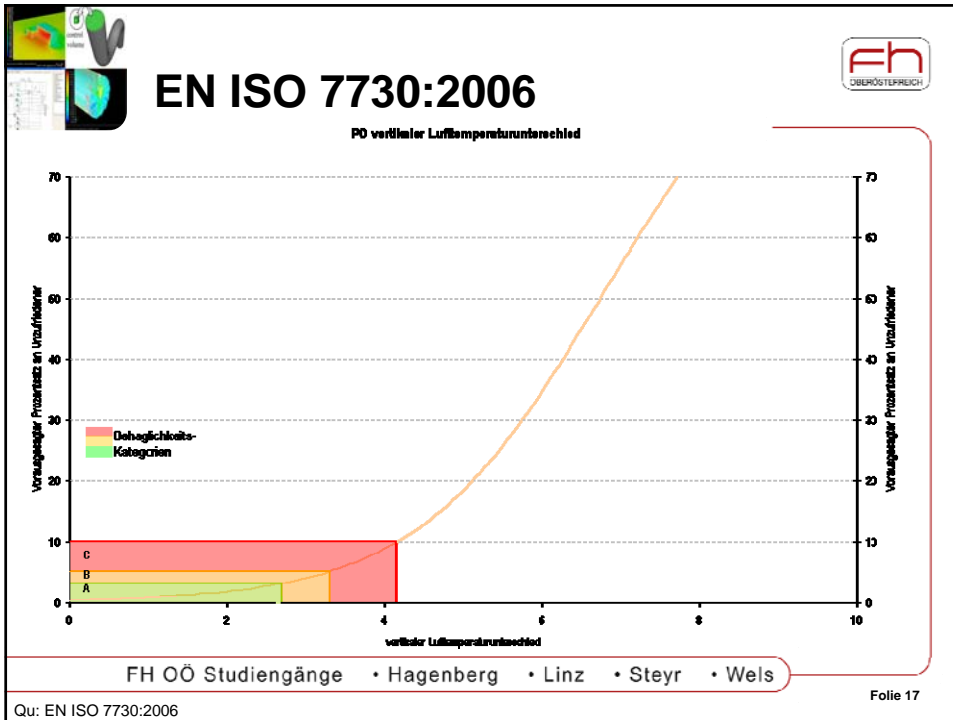
$$PD = 100 - 94 \cdot e^{(-1,387 + 0,118 \cdot t_f - 0,0025 t_f^2)}$$

→ Mit analytischen Methoden berechenbar ?

FH OÖ Studiengänge • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

Qu: EN ISO 7730:2006

Folie 16



EN ISO 7730:2006

**Berechnung
Vertikaler Lufttemperaturunterschied**

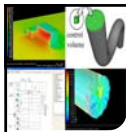
$$PD = \frac{100}{1 + e^{(5,76 - 0,856 \Delta t_{v,v})}}$$

→ Mit analytischen Methoden berechenbar ?

FH OÖ Studiengänge • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

Folie 18

Qu: EN ISO 7730:2006



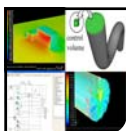
EN ISO 7730:2006

Resümee

- Physikalischen Größen nur bedingt mit analytischen Methoden berechenbar
- Nur Simulationen bringen plausible und umfassende Ergebnisse

Berechnungstools

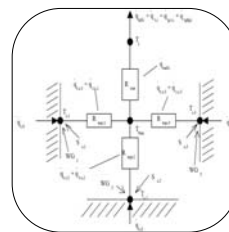
- Thermische Gebäudesimulation (TRNSYS)
 - Oberflächen- und Lufttemperatur
 - Luftfeuchtigkeit
- Strömungssimulationen (CFD – FLUENT)
 - Ausbildung der Strömung
 - Strahlungsmodelle
 - Turbulenzmodelle



Gebäudesimulation vs. CFD

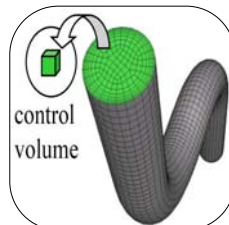
● Sternknoten (TRNSYS)

- ein Knoten pro Zone
- Transferfunktionen
- Langzeit Simulationen

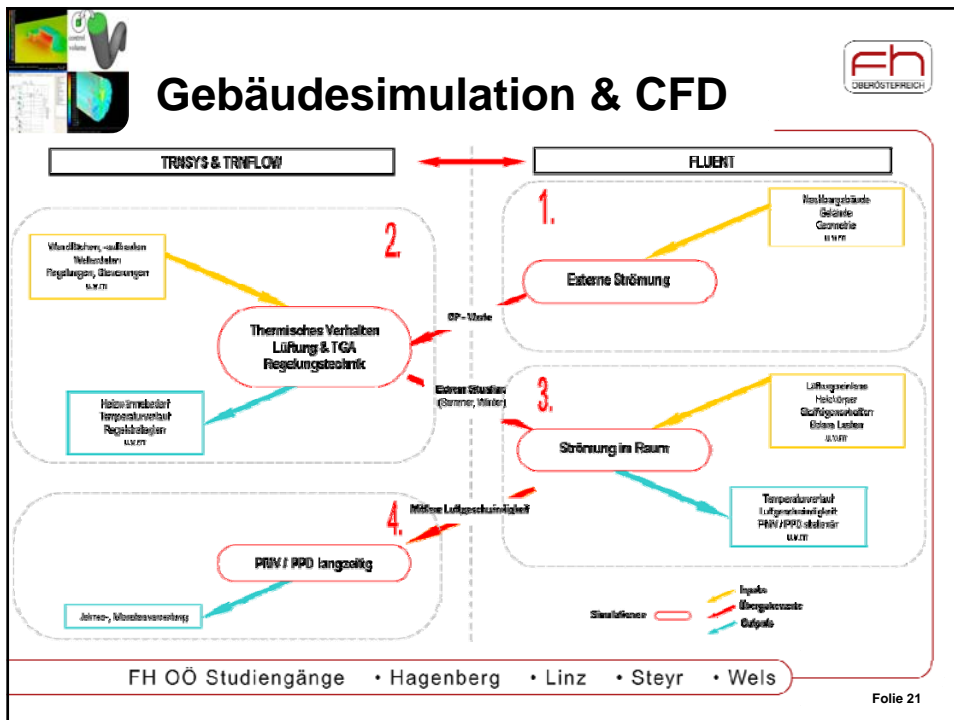


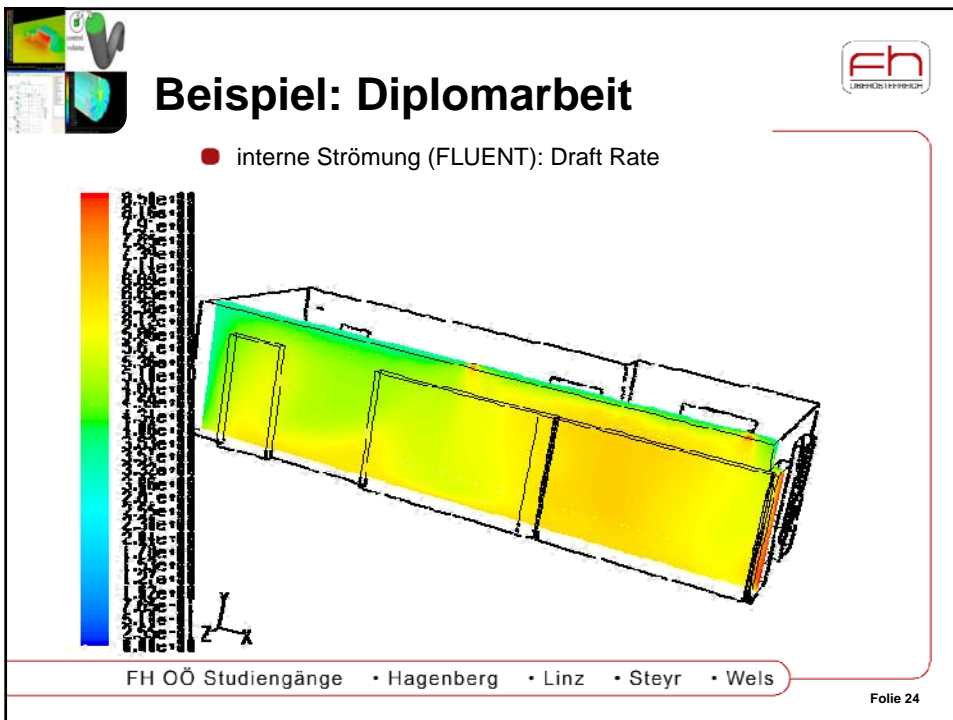
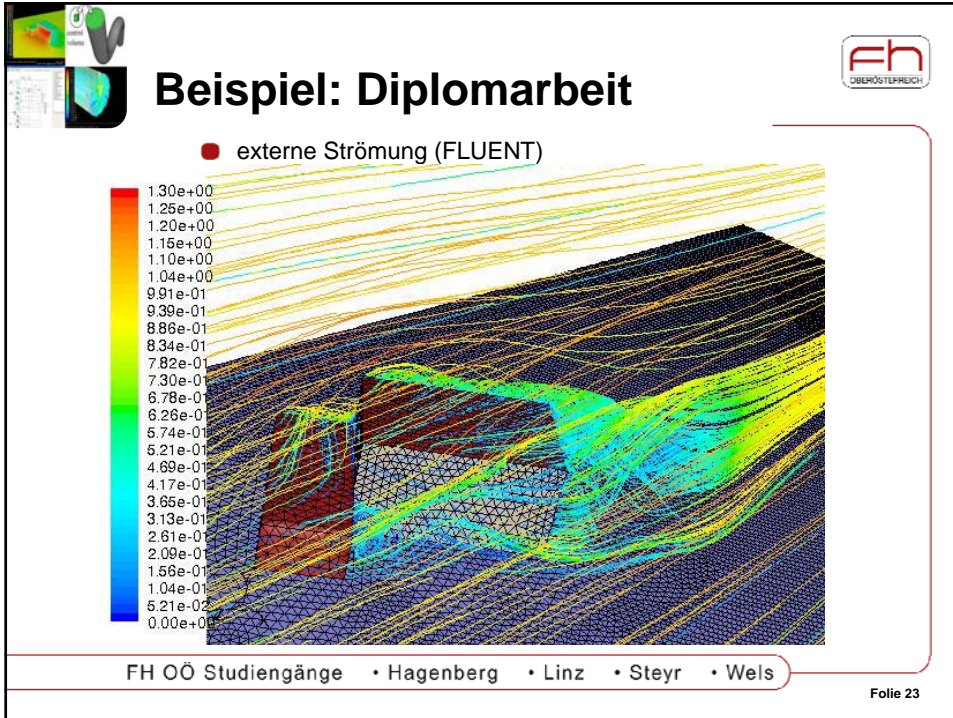
● Finite Volumen Methode (FLUENT)

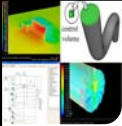
- Komplette Vernetzung
- Exakte Auswertung
- CPU & Zeit intensiv




→ **Kombination möglich & notwendig!**

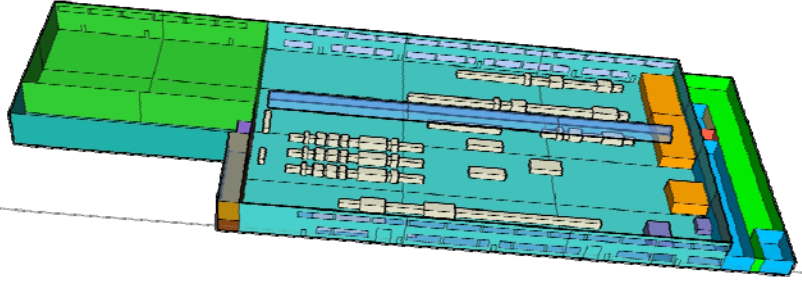






Beispiel: Produktionshalle





Neubau (2002), Standardbau ohne besondere bau- und lüftungstechnische Kennzeichen

Problem Überhitzung im Sommer (Produktionsausfall,...)

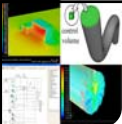
Optimierung von Kühlung notwendig!

Einsparpotential: 400 kW Kältelast, 700 MWh Energie, 55 k€


→ ?? BEHAGLICHKEIT ??

FH OÖ Studiengänge • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

Folie 25



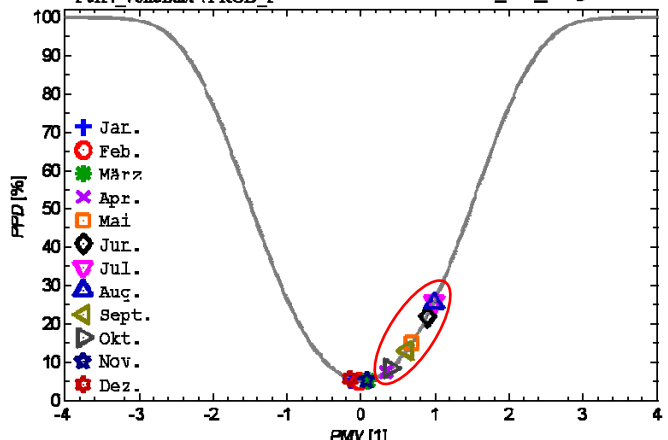
Beispiel: Produktionshalle



Vorher:

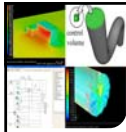
22-Feb-2008 09:17:45
 PPD_PMV_Diagrams2.m

Peff4_volleLast \ PROD_I



FH OÖ Studiengänge • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

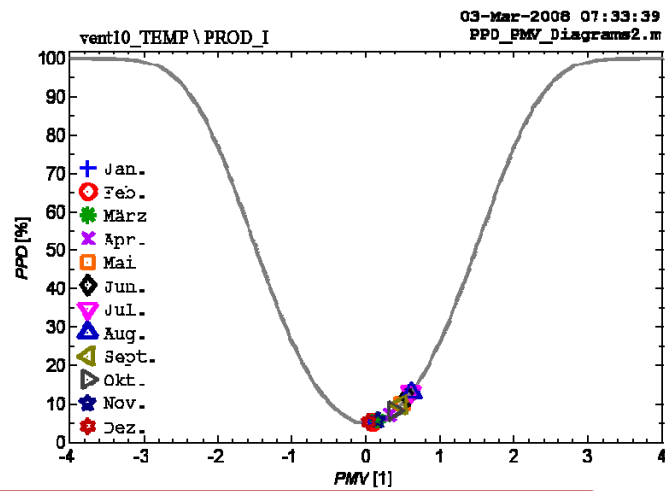
Folie 26



Beispiel: Produktionshalle

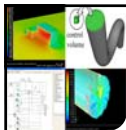


Nachher:



FH OÖ Studiengänge • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

Folie 27



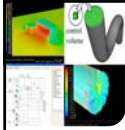
Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

DI(FH) Daniel Neyer
FH OÖ Forschungs- und Entwicklungs- GmbH
Stelzhamerstr. 23
4600 Wels

0043 (0)7242 72811 -4165
0043 (0)664 2826 529
daniel.neyer@fh-wels.at

FH OÖ Studiengänge • Hagenberg • Linz • Steyr • Wels

Folie 28



Literaturhinweise

LITERATUR

Fanger, P.O.: Thermal comfort, analysis and applications in environmental engineering, Reprint. - Malabar, Fla.: Krieger, 1982

Feist, W.: Anforderungen zur thermischen Behaglichkeit in Passivhäusern, Protokollband Nr.25, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, 2004

Meyer, C.; Oppermann, J.; Wimmer, A.: Behaglichkeitsatlas, Bewertung der Anordnung von Heizflächen und Lüftungselementen hinsichtlich Raumklima und thermischer Behaglichkeit, Ingenieurbüro für Bauklimatik Hausladen + Meyer, Juli 2004

Richter, W.: Handbuch für thermische Behaglichkeit – Heizperiode. Hrsg. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Wirtschaftsverlag NW, Dortmund/Berlin/Dresden, 2003

Rohregger, G. et al: Nachhaltige Behaglichkeit, Untersuchungen zum Behaglichkeits- und Gesundheitswert von Passivhäusern, Wien: BMVIT, 2002

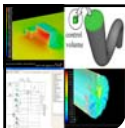
Waltjen, T.: Wärmeansprüche des Menschen. Physikalische, psychologische, physiologische und soziale Bedingungen für thermische Behaglichkeit, Forschungs-bericht IBO, Wien, 2003

wichtige NORMEN

ÖNORM EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung, Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit, 01/2006

ÖNORM EN ISO 8996: Ergonomie der thermischen Umgebung- Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes, 01/2005

ÖNORM EN ISO 9920: Ergonomie der thermischen Umgebung- Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination, 02/2005



ÖKOENERGIETECHNIK

LaboraAusstattung für:

- Bauphysik
- Wärmetechnik
- Photovoltaik
- Brennstoffzellen
- Biomasse

Details unter:

<http://www.fh-ooe.at/campus-wels/kooperationen/laborausstattung.html>