



Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Einflussfaktoren	4
2.1 Lufttemperatur und Strahlungstemperatur	6
2.2 Empfundene Temperatur	6
2.3 Luftgeschwindigkeit	9
2.4 Luftfeuchte	10
2.5 Bekleidung	10
2.6 Aktivitätsgrad	11
2.7 Außenklima	12
3. Empfehlungen zur thermischen Behaglichkeit – Winter	12
3.1 Lufttemperatur und Strahlungstemperaturasymmetrie	12
3.2 Zugrisiko	13
4. Empfehlungen zur thermischen Behaglichkeit – Sommer	14
4.1 Historische Entwicklung	14
4.2 Unterscheidung nach natürlich belüfteten und klimatisierten Gebäuden	14
4.3 Einsatzmöglichkeiten regenerativer Kühlung bei Gebäuden vom Typ ALPHA bei mindestens gleicher Zufriedenheit der Nutzer	15
4.4 Moderne Definitionen auf der Basis umfangreicher Befragungen	16
4.5 Der Stand in Deutschland bzw. die deutsche Normung	17
5. Analyse des Klimas am Standort Deutschland	18
5.1 Die 3 Klimaregionen in PRIMERO-Sommer	18
5.2 Bewertung an Hand der Behaglichkeitskriterien	18
6. Energiebilanz in einem Raum im Sommer	20
6.1 Wärmeeinträge von der Sonne	20
6.2 Wärmeabgabe des Menschen	21
6.3 Wärmeabgabe der Leuchten	21
6.4 Wärmeabgabe von elektrischen Geräten	21
7. Beispiele	24
8. Gesetze - Verordnungen und ihre Bewertung	25
8.1 DIN 1946-2	25
8.2 DIN 4108-2	25
8.3 Arbeitsstättenrichtlinie (ASR 6)	25
8.4 PMV und PPD nach DIN EN ISO 7730	25
8.5 Luftqualität und Verordnungen (Versammlungsstätten)	26
8.6 ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy	27
8.7 sia 2021: Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz	28
8.8 sia 382/1: Technische Anforderungen an lufttechnische Anlagen	30
8.9 Niederländischer Komfort Index	31
9. Literatur	34
A. Anhang – Wetterdaten in PRIMERO - Sommer	36

1. Einleitung

Unter Raumklima versteht man primär das den Wärmehaushalt des Menschen betreffende thermische und hygrische Klima und die Raumluftqualität. Zusätzlich sind auch optische (Lichtverhältnisse, Farbgebung) und akustische Aspekte einzubeziehen. Somit spricht man von:

- thermischer,
- olfaktorischer,
- visueller und
- akustischer

Behaglichkeit. Entscheidend für den sommerlichen Wärmeschutz ist die thermische Behaglichkeit.

In Kapitel 2 werden die einzelnen Einflussgrößen genauer beschrieben. Dabei muss beachtet werden, dass die dort und zusätzlich in Kapitel 3 genannten Behaglichkeitskriterien üblicherweise für die Situation „Winter“, also Außentemperatur unter 20°C und zu beheizende Räume, entwickelt worden sind.

Diese Kriterien sind nach aktuellen Erkenntnissen, aber auch der eigenen offensichtlichen Erfahrung nach nur bedingt auf den Sommer anwendbar. Thermische Behaglichkeit im klassischen Sinn (also auf die Situation Winter bezogen) meint genau genommen thermische Neutralität, das ist das Fehlen negativer Empfindungen (z.B. nicht zu warm und nicht zu kalt). Das ist - vor allem im Sommer - nicht notwendig identisch mit Behaglichkeit und schon gar nicht mit Wohlfühlen. Nach den klassischen Komfortkriterien müsste ein Aufenthalt am Strand bei 35°C im Schatten unakzeptabel heiß sein – wir geben aber sogar viel Geld dafür aus und fühlen uns sehr wohl dabei. Ähnlich äußern sich Personen, die in natürlich belüfteten Gebäuden arbeiten: „Ja; es ist etwas zu warm – aber wo ist das Problem? Es ist ein prima Sommer und wir fühlen uns sehr wohl damit.“ In diesem Sinne ist in den nachfolgenden Abschnitten die thermische Behaglichkeit als etwas Relatives zu sehen. An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass es einen allgemein gültigen Ansatz der thermischen Behaglichkeit nicht gibt. Treffender ist die Definition eines Behaglichkeitsbereiches (Akzeptanz des Nutzers), der aus den nachfolgenden Kriterien resultiert. Speziell für den Bereich des Sommers fehlen noch ausgereifte Entwicklungen und tief greifendere Untersuchungen, positive Ansätze sind in Kapitel 4 dargestellt.

Am Arbeitsplatz kommt der thermischen Behaglichkeit in Bezug auf Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit eine besondere Bedeutung zu. Es ist weiter anzumerken, dass thermische Behaglichkeit ebenfalls nicht notwendig mit der höchsten Leistungsfähigkeit identisch ist. Umfassende Untersuchungen finden sich hierzu in der Literatur. Exemplarisch sind die von D. P. Wyon [1] genannt. Nach den Ergebnissen von Wyon nimmt mit steigender Raumtemperatur sowohl die körperliche als auch die geistige Leistungsfähigkeit stark ab, bei 28°C bereits um 50% (körperliche Leistungsfähigkeit) beziehungsweise 20% (geistige Leistungsfähigkeit). In weiteren Untersuchungen stellt Wyon [2] fest, dass zwischen dem Temperaturanstieg und der Leistungsabnahme (geistige Tätigkeit) kein linearer Zusammenhang besteht. So nimmt, nach Wyons neuen Erkenntnissen in [2] die Leistungsfähigkeit um 50% zu, bei einer Temperaturerhöhung von 23 auf 26°C. Erst bei 29°C nimmt diese wieder den Wert von 23°C an. Witterseh [3] stellt den Zusammenhang von Temperatur und geistiger Erregung her. Er stellt fest, dass es für jede Aufgabe eine optimale geistige Erregung gibt. Bei zu hoher oder zu niedriger Erregung (was auch die Temperaturänderung sein kann) fällt die Leistungsfähigkeit ab.

Die Einflussfaktoren der thermischen Behaglichkeit werden in einer Vielzahl von internationalen Regelwerken betrachtet. Zusammenfassend sind folgende Faktoren von Bedeutung:

- Luft (Temperatur, Geschwindigkeit und Feuchte) und
- Strahlung (Oberflächentemperaturen, Wärmestrahlung, kurzwellige Strahlung).
- Bekleidung
- Aktivität

Und bei moderneren Kriterien auch:

- Außenklima und seine Vorgeschichte.

2. Einflussfaktoren

Die thermische Behaglichkeit ist in zwei Richtlinien wie folgt definiert:

- Thermische Behaglichkeit nach DIN 1946-2:1994-01 [4]
Thermische Behaglichkeit ist dann gegeben, wenn der Mensch Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftbewegung und Wärmestrahlung in seiner Umgebung als optimal empfindet und weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Raumluft wünscht.
- Thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730:2003 [5]
Dort wird die thermische Behaglichkeit als Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt, definiert.

Die thermische Behaglichkeit hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Ein gesundheitliches zuträgliches Raumklima liegt vor, wenn die Wärmebilanz des menschlichen Körpers ausgeglichen ist (Wärmeabgabe = Wärmeerzeugung). Die körpereigene Wärmeproduktion hängt von der Arbeitsschwere (Aktivitätsgrad) ab. Hingegen sind für die Wärmeabgabe folgende Faktoren maßgeblich:

- Lufttemperatur,
- Raumumschließungsflächentemperatur,
- Luftgeschwindigkeit,
- Luftfeuchte und
- Bekleidung.

Generell kann sich der Mensch kurzfristig an diese thermischen Reize anpassen (Adaption) und sich auch langfristig auf die thermischen Umgebungsbedingungen einstellen (Akklimation).

Aus der Vielzahl der dargestellten Faktoren wird klar, dass Behaglichkeit individuell unterschiedlich empfunden wird und es nicht „den“ behaglichen Raumklimazustand für sich geben kann. Man spricht daher von einem Behaglichkeitsfeld, in dem eine Vielzahl von Menschen mit dem Raumklima zufrieden ist.

Werden mehrere Einflussgrößen wie z.B. Lufttemperatur und Luftfeuchte mit ihren spezifischen Behaglichkeitsbereichen simultan betrachtet, ergeben sich Behaglichkeitsfelder, die sich vorteilhaft in Grafiken darstellen lassen. In Bezug auf Lufttemperatur und Luftfeuchte lässt sich ein Behaglichkeitsfeld angeben im so genannten „h,x-Diagramm“ (vgl. Abbildung 1).

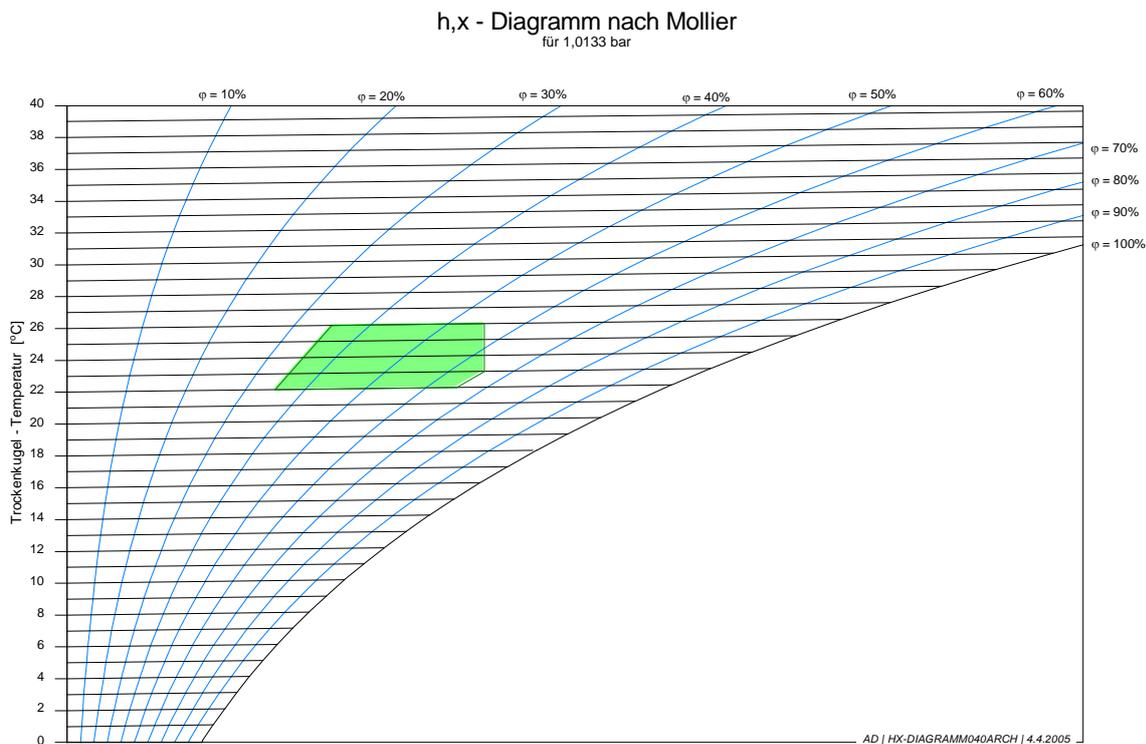


Abbildung 1: Modifiziertes h,x-Diagramm nach Mollier mit Behaglichkeitsfeld (grün)



Die Raumumschließungsflächentemperatur ist in dieser Darstellung nicht enthalten. Somit kann das h,x-Diagramm für vereinfachte Betrachtungen angewendet werden, wenn sich Luft- und Raumumschließungsflächentemperatur (siehe Kapitel 2.2) nur wenig unterscheiden.

2.1 Lufttemperatur und Strahlungstemperatur

Die Lufttemperatur kennzeichnet die Temperatur in Gebäuden bzw. Aufenthaltsräumen von Personen. Repräsentative Aussagen durch die Lufttemperatur lassen sich nur außerhalb von Grenzschichtbereichen (Mensch, Bauteile, etc.) treffen.

In einfachen Fällen, bei denen die Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Wärmestrahlung keinen erheblichen Einfluss auf das Raumklima ausüben, wird die Lufttemperatur zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit herangezogen.

Bei einer detaillierten Betrachtung muss jedoch berücksichtigt werden, dass neben der Lufttemperatur auch die Strahlungstemperatur entscheidend den Wärmehaushalt des Menschen beeinflusst. Sie setzt sich aus den Oberflächentemperaturen aller Umschließungsflächen, gewichtet mit den lokalen Einstrahlzahlen (geometrisches Sichtverhältnis zwischen Bauteil und Person) zusammen. Nach der Gewichtung aller Oberflächentemperaturen erhält man eine mittlere Strahlungstemperatur (Ganzraumstrahlungstemperatur).

Bzgl. der Lufttemperatur ist zusätzlich auch der vertikale Temperaturgradient im Raum für die thermische Behaglichkeit von Bedeutung. Nach DIN 1946-2:1994-01 darf dieser höchstens 2 Kelvin pro Meter Raumhöhe betragen. Dabei sollte eine Lufttemperatur von 21°C in 0,1m über den Fußboden nicht unterschritten werden. Esdorn [6] gibt hierzu die Empfehlung, dass der Temperaturunterschied zwischen den Kopf und den Füßen maximal 3 Kelvin betragen darf.

2.2 Empfundene Temperatur

Eine zentrale Bewertungsgröße der thermischen Behaglichkeit ist die empfundene Raumtemperatur (operative Temperatur). Diese Größe beinhaltet den Einfluss der örtlichen Umschließungsflächentemperatur und der örtlichen Lufttemperatur. Für eine genaue Berechnung sei auf die DIN EN ISO 7730:2003 [5] verwiesen. Vereinfacht lässt sich die empfundene Temperatur als Mittelwert zwischen der örtlichen Strahlungstemperatur und der Lufttemperatur beschreiben. Daraus folgt, dass sich eine unbefriedigende Raumtemperatur durch eine entsprechende Änderung der Oberflächentemperatur kompensieren lässt (vgl. DIN EN ISO 7730:2003 [5]). Zur Erzielung von Komfort ist dies jedoch nur innerhalb von bestimmten Grenzen möglich (vgl. Abbildung 2).

Die DIN 1946-2:1994-01 [4] gibt Empfehlungen für die empfundene Temperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur (vgl. Abbildung 3). Im Heizfall ist bei Verwendung von Quellluftsystemen im bodennahen Bereich eine Temperatur von 20 bis 22°C zugelassen. Im Sommerfall sind Temperaturen von 25 bzw. 26°C zugelassen, die bei hohen sommerlichen Außentemperaturen und kurzfristig auftretenden hohen inneren Wärmelasten sind höhere Werte der empfundenen Temperatur annehmen dürfen. Das Maximum der empfundenen Temperatur ist mit 27°C bei 32°C Außentemperatur definiert. Für noch höhere Außentemperaturen macht DIN 1946-2 keine Aussage.

Behaglichkeitsfeld Umschließungsflächentemperatur - Raumtemperatur

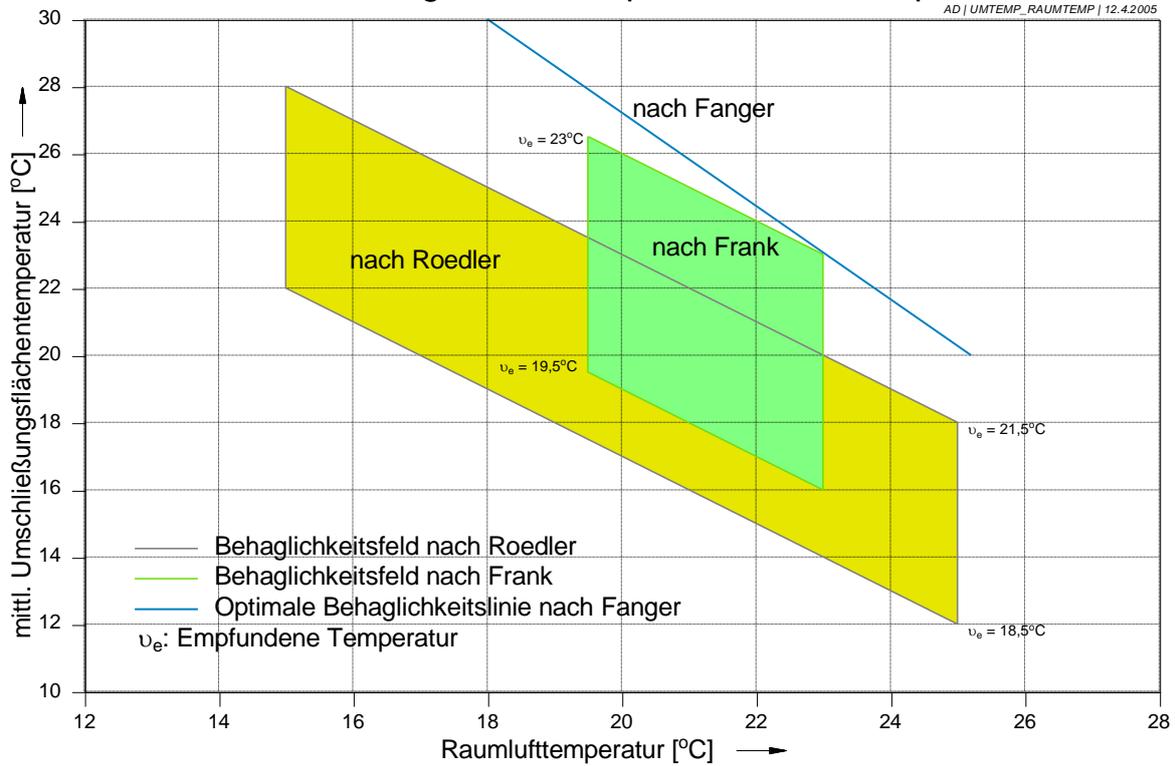


Abbildung 2: Behaglichkeitsfeld nach Fanger, Roedler und Frank [7]

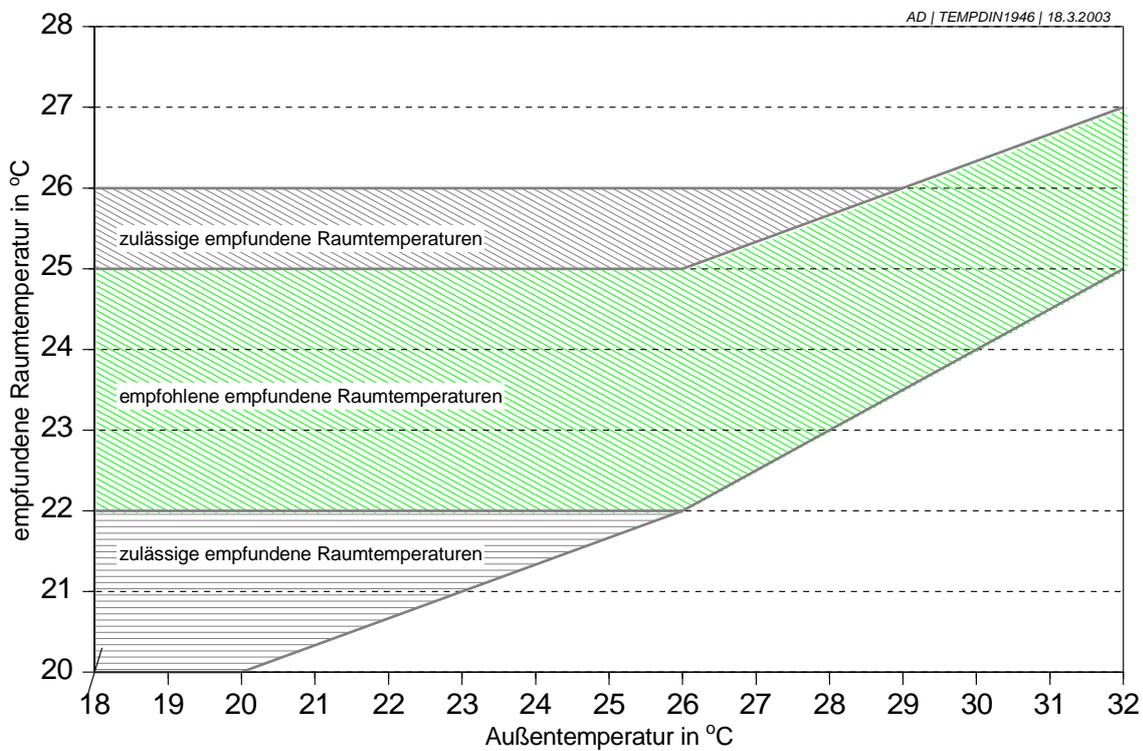


Abbildung 3: Behaglichkeitsfeld zulässiger empfundener Temperaturen nach DIN 1946-2:1994-01 [4]



Aus Abbildung 4 bis Abbildung 6 [8] geht der Zusammenhang zwischen Lufttemperatur, Strahlungstemperatur und Empfundener Temperatur hervor. In diesen Abbildungen wird ein vertikaler Schnitt durch einen einfachen rechteckigen Raum gezeigt. Auf der linken Raumseite befindet sich eine kühlere Verglasung, die übrigen Bauteile grenzen an Innenflächen des Gebäudes.

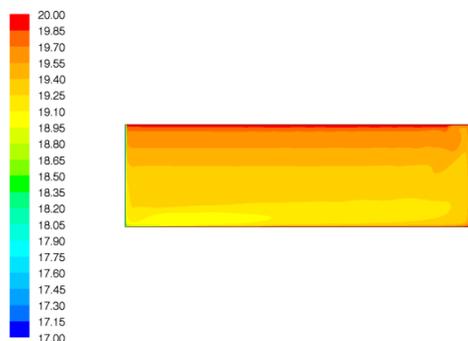


Abbildung 4: Lufttemperatur im Raum, links: kühlere Scheibe

Contours of Static Temperature (c) (Time=6.0000e+01) Apr 04, 2005
FLUENT 6.2 (2d, segregated, rngke, unsteady)

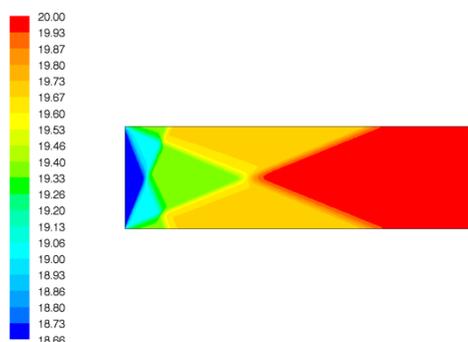


Abbildung 5: Strahlungstemperatur im Raum, links: Einfluss der kühleren Scheibe aus den blau bzw. grünen Bereichen erkenntlich

Contours of Radiation Temperature (c) (Time=6.0000e+01) Apr 04, 2005
FLUENT 6.2 (2d, segregated, rngke, unsteady)

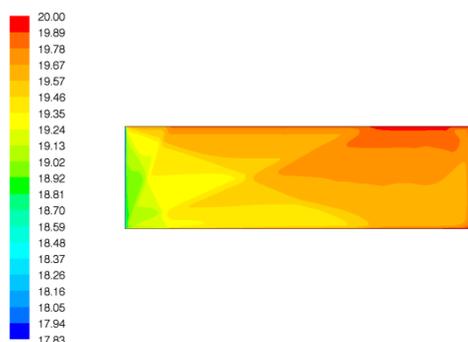


Abbildung 6: Empfundene Temperatur im Raum, resultiert aus der Strahlungs- und Lufttemperatur des Raumes. Die Empfundene Temperatur ist im Bereich der Scheibe niedriger als im übrigen Bereich des Raumes.

Contours of operative-temperature (Time=6.0000e+01) Apr 04, 2005
FLUENT 6.2 (2d, segregated, rngke, unsteady)

2.3 Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit in Räumen hat direkten Einfluss auf die thermische Behaglichkeit. Zwischen der Lufttemperatur und dem Turbulenzgrad besteht eine direkte Abhängigkeit. Der Turbulenzgrad drückt die Luftgeschwindigkeitsschwankung und die Intensität der Luftströmung aus.

Generell gilt der Zusammenhang, dass bei niedrigeren Turbulenzgraden höhere Luftgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen zulässig sind. Beispielsweise bei einem Turbulenzgrad von 40% und Lufttemperatur von 26°C, ergibt sich eine noch behagliche Luftgeschwindigkeit von ca. 0,20 m/s.

Wie einleitend bereits erwähnt beschreiben die Kriterien meist den Winterfall. Man empfindet gerade bei hohen Temperaturen (Sommerfall) höhere Luftgeschwindigkeiten als äußerst behaglich: die Menschen stellen sich sogar extra einen Ventilator in den Raum, um es angenehm zu haben. Dieses verbreitete sommerliche Benehmen lässt sich in Kapitel 3.2 erklären.

2.4 Luftfeuchte

Empfehlungen für die relative Luftfeuchte liegen in einem Bereich von minimal 30% bis zu einem Maximalwert von 65%. Hierbei sollte ein absoluter Feuchtegehalt von 11,5 g Wasserdampf/kg trockener Luft (das entspricht etwa einer absoluten Luftfeuchte von 15 g/m³) nicht überschritten werden (vgl. DIN 1946-2:1994-01 [4]). Nimmt die Luftfeuchte größere Werte an, so wird die Schwülegrenze überschritten. Man empfindet das Raumklima dann als unbehaglich feucht (analog zu subtropischem / tropischem Klima).

Nach DIN EN ISO 7730:2003-10 [5] spielt die relative Feuchte eine untergeordnete Rolle bezüglich der thermischen Behaglichkeit, wenn die Temperaturen und die zugehörigen Feuchten in der Nähe des Behaglichkeitsfeldes liegen.

In Abbildung 7 sind die betreffenden Normen und Erkenntnisse aus Untersuchungen, bezüglich des Zusammenhangs von relativer Feuchte und Raumlufttemperatur, grafisch zusammengefasst.

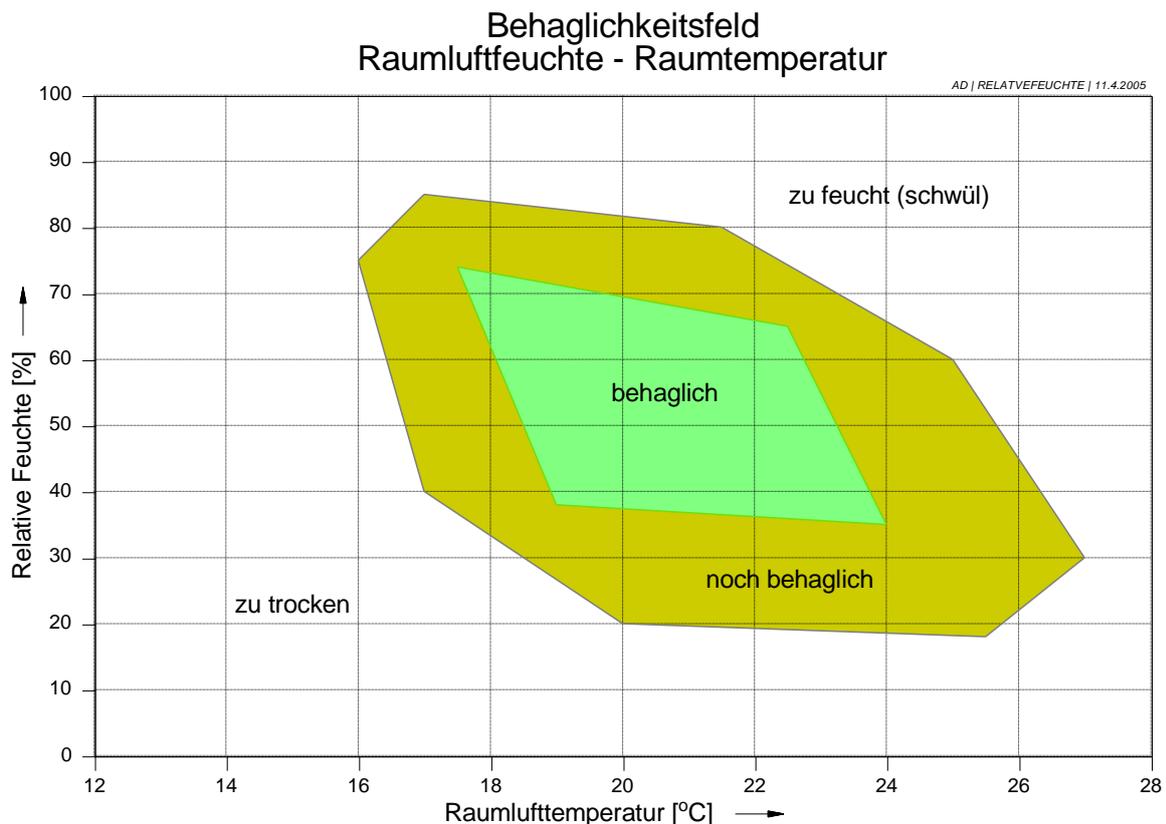


Abbildung 7: Behaglichkeitsfeld Raumlufffeuchte – Raumlufttemperatur nach Frank [7]

2.5 Bekleidung

Die Bekleidung beeinflusst den Wärmehaushalt des Menschen. Sie stellt die Grenzschicht zwischen Körper und Raumklima dar und hat somit direkten Einfluss auf die thermische Behaglichkeit. Physikalisch wird die Bekleidung durch ihren Wärmedurchlasswiderstand zwischen Haut und Umgebung gekennzeichnet. Der bezogene relative Wärmeleitwiderstand einer unbedeuteten Person beträgt 0 clo (clothing, 1 clo = 0,155 m²K/W). Eine typische Innenraumbekleidung beträgt im Sommer 0,5 clo und im Winter 1,0 clo. Somit ist die Bekleidung bzw. der Wärmedurchlasswiderstand ein Maß für den Wärmeaustausch des Körpers mit der Umgebung. Den Zusammenhang von Bekleidung und optimaler Raumtemperatur zeigt Abbildung 8. In dieser Abbildung sind Bekleidung (clo) und Raumtemperatur zusätzlich vom Aktivitätsgrad abhängig. Weitere Informationen bezüglich des Aktivitätsgrades können Kapitel 2.6 entnommen werden.

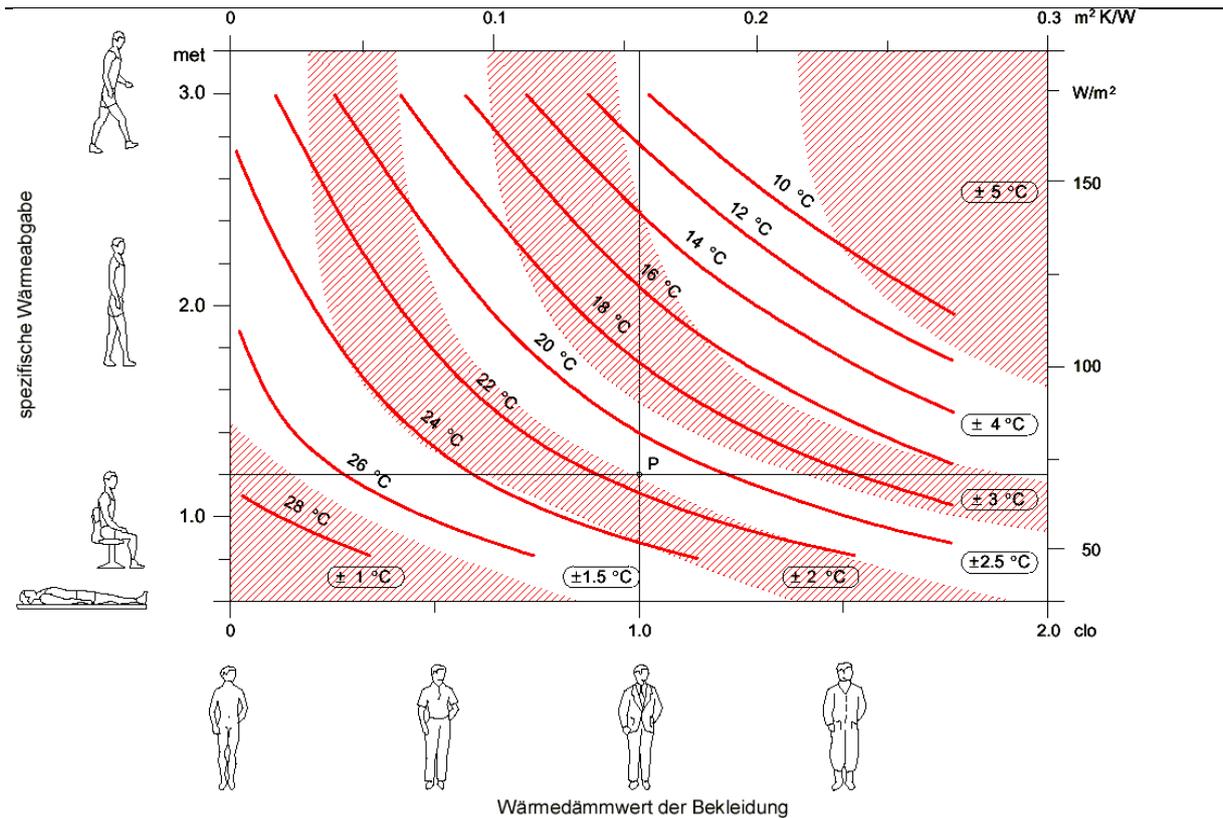


Abbildung 8: Optimale Raumtemperatur in Abhängigkeit von Aktivität und Bekleidung. Die rot schraffierten Bereiche geben die zulässige Abweichung von der optimalen Raumtemperatur an (die Werte basieren auf DIN EN ISO 7730).

2.6 Aktivitätsgrad

Der Aktivitätsgrad ist ein Maß für den Energieumsatz des Menschen. Ein in völliger Ruhe befindlicher Mensch hat einen Grundumsatz von $M \approx 0,8$ met (met = metabolic rate = metabolische Einheit, 1 met = 58 W/m² Körperoberfläche).

Der jeweilige Energieumsatz eines Menschen bei einer bestimmten Tätigkeit wird in Tabelle 1 gezeigt.

Tabelle 1: Energieumsätze nach DIN EN ISO 7730:2003

Körperliche Tätigkeit	Energieumsatz		
	W/m²	met	W*
Angelehnt	46	0,8	83
Sitzend, entspannt	58	1,0	104
Sitzende Tätigkeit	70	1,2	126
Stehende, leichte Tätigkeit (Einkaufen, Labor, leichte Industriearbeit)	93	1,6	167
Stehende, mittelschwere Tätigkeit (Verkaufstätigkeit, Hausarbeit, Maschinenbedienung)	116	2,0	209
Gehen auf der Ebene:			
2 km/h	110	1,9	198
3 km/h	140	2,4	252
4 km/h	165	2,8	297
5 km/h	200	3,4	360

* Es wird eine wärmeabgebende Oberfläche des Menschen von 1,8 m² zugrunde gelegt.

Die Wärmeabgabe des Menschen ist in trockener und feuchter Wärmeabgabe zu untergliedern. Die vom Menschen aufgenommene Energie kann im Körper zwar in chemischer Form gespeichert werden (Fettzellen), nicht aber die mit den Lebensfunktionen und der Tätigkeit verbundene innere Wärmeproduktion – sie muss an die Umgebung abfließen. Das Temperaturregelsystem gibt seine Wärme durch Konvektion, Leitung und Strahlung ab. Dies bezeichnet man als trockene Wärmeabgabe, sie führt demnach zu einer Erhöhung der Temperatur im umgebenden Raum. Die feuchte Wärmeabgabe ist durch die Atmung und Verdunstung gekennzeichnet, sie führt zu einer Erhöhung der Luftfeuchte im umgebenden Raum. Neben dem Aktivitätsgrad hängt die Wärmeabgabe noch von der jeweiligen Raumlufthtemperatur ab. Die VDI 2078 gliedert den Aktivitätsgrad und die zugehörige Wärmeabgabe nach der Raumlufthtemperatur. Tabelle 2 gibt hierzu einen Überblick.

Tabelle 2: Wärmeabgabe des Menschen entsprechend der Raumlufthtemperatur und des Aktivitätsgrades nach VDI 2078

Tätigkeit	Wärmeabgabe	Raumlufthtemperatur [°C]						
		18	20	22	23	24	25	26
<i>Körperlich nicht tätig bis leichte Arbeit im Stehen (Aktivitätsgrad I und II nach DIN 1946-2)</i>	<i>Gesamt [W]</i>	125	120	120	120	115	115	115
	<i>Trocken [W]</i>	100	95	90	85	75	75	70
	<i>Feucht [W]</i>	25	25	30	35	40	40	45
	<i>Wasserdampfabgabe [g/h]</i>	35	35	40	50	60	60	65
<i>Mäßig schwere nach körperliche Tätigkeit (Aktivitätsgrad III nach DIN 1946-2)</i>	<i>Gesamt [W]</i>	190	190	190	190	190	190	190
	<i>Trocken [W]</i>	125	115	105	100	95	90	85
	<i>Feucht [W]</i>	65	75	85	90	95	100	105
	<i>Wasserdampfabgabe [g/h]</i>	95	110	125	135	140	145	150
<i>Schwere körperliche Tätigkeit (Aktivitätsgrad IV nach DIN 1946-2)</i>	<i>Gesamt [W]</i>	270	270	270	270	270	270	270
	<i>Trocken [W]</i>	155	140	120	115	110	105	95
	<i>Feucht [W]</i>	115	130	150	155	160	165	175
	<i>Wasserdampfabgabe [g/h]</i>	165	185	215	225	230	240	250

2.7 Außenklima

Bezüglich der thermischen Behaglichkeit in Gebäuden hat das Außenklima ebenfalls Einfluss. Der Mensch passt sich in der Regel mit seiner Kleidung an das Außenklima an. Die Wahl fällt im Sommer eher auf leichte Kleidung (T-Shirt, Hemd), dagegen werden im Winter wärmere Kleidungsstücke bevorzugt. Dementsprechend verändert sich der Behaglichkeitsbereich.

Aktuelle Untersuchungen (Brager & de Dear [9]) zeigen, dass sich darüber hinaus der Mensch auf seine Umgebung (hier: Innenraumklima; beeinflusst vom Außenklima) einstellt. So passt sich der Nutzer eines Gebäudes an höhere Innentemperaturen relativ rasch (2-3 Tage) an, wenn er diese, entsprechend der Jahreszeit, auch erwartet.

3. Empfehlungen zur thermischen Behaglichkeit – Winter

Die nachfolgenden Kriterien sind nicht ohne weiteres auf die Behaglichkeit von Räumen im Sommer übertragbar (vgl. hierzu Kapitel 4). Im Folgenden werden Kriterien der Behaglichkeit für das Innenraumklima in den Wintermonaten diskutiert.

3.1 Lufttemperatur und Strahlungstemperatursymmetrie

Repräsentative Werte der Lufttemperatur ergeben sich außerhalb der Grenzschichten (vgl. Kapitel 2.1). Im Allgemeinen, bei leichter, vorwiegend sitzender Tätigkeit, werden Temperaturen von 20 bis 24°C als behaglich empfunden. Dies trifft vor allem auf den Winterfall zu.

Eine einseitige Erwärmung oder Abkühlung des Menschen durch unterschiedliche Temperaturen der Umschließungsflächen kann zu Unbehagen führen. Zur Beurteilung der Strahlungstemperaturasymmetrie wird der Raum in zwei Halbräume unterteilt. Daraus lässt sich die Strahlungstemperatur des jeweiligen Halbraumes ableiten. Die Temperaturdifferenzen der beiden Halbräume dürfen bestimmte Werte nicht überschreiten. Die Tabelle 3 gibt die Anforderungen an die Strahlungstemperaturasymmetrie der DIN 1946-2:1994-01 und Glück [10] wieder. Nach Glück liegen die Werte für warme Deckenflächen und kühle Wände über den Werten und für gekühlte Decken und warme Wandflächen unter den Werten der DIN 1946-2.

Tabelle 3: Grenzwerte der Differenz der Strahlungstemperatur beider Halbräume

Art	DIN 1946-2	Glück
Warme Deckenflächen	≤ 3,5 K	≤ 8,1 K
Kalte Wandflächen (auch Fenster)	≤ 8,0 K	≤ 8,4 K
Gekühlte Deckenflächen	≤ 17,0 K	≤ 14,3 K
Warme Wandflächen (auch Fenster)	≤ 19,0 K	≤ 11,1 K

Die DIN EN ISO 7730:2003 empfiehlt hierzu maximale Differenzen von 5K (warme Decken) und 10K (kalte Wandflächen und Fenster).

3.2 Zugrisiko

Unter Zugrisiko versteht man im Allgemeinen die unerwünschte Abkühlung des Körpers durch Luftbewegung. Als Zugrisiko DR (draught risk) wird der prozentuale Anteil der Personen bezeichnet, die sich unbehaglich fühlen.

In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind die Grenzwerte der Luftgeschwindigkeit für verschiedene Turbulenzgrade bei einem Zugrisiko von 10% bzw. 25% dargestellt.

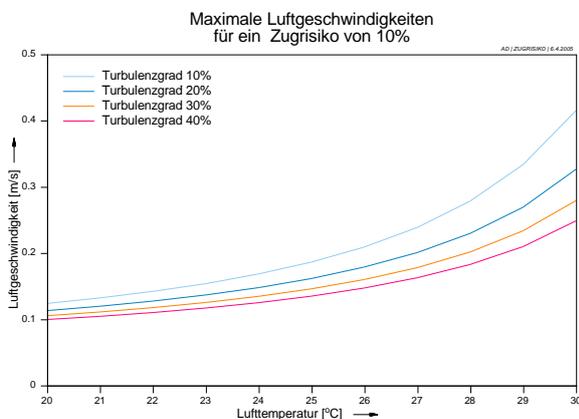


Abbildung 9: Maximale Luftgeschwindigkeiten bei einem Zugrisiko von 10%

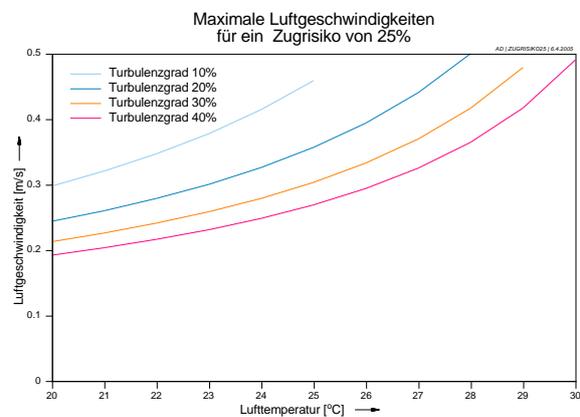


Abbildung 10: Maximale Luftgeschwindigkeiten bei einem Zugrisiko von 25%

4. Empfehlungen zur thermischen Behaglichkeit – Sommer

4.1 Historische Entwicklung

Die bestehenden Kriterien und Standards der thermischen Behaglichkeit versuchen den idealen Zustand zu beschreiben (vgl. Kapitel 2). Der ideale Zustand der thermischen Behaglichkeit leitet sich aus Wärmebilanzmodellen ab. In diesen Bilanzmodellen, die mit vielen experimentellen Untersuchungen abgeleitet und validiert wurden, wird versucht die Behaglichkeit (= Zufriedenheit des Menschen mit dem Raumklima) auf einen Punkt hin zu bestimmen. Ähnlich wie beim Lösen eines Gleichungssystems.

Den bestehenden Methoden und Theorien zum Komfort steht die Methode der adaptiven Modelle gegenüber. Aufgekommen sind diese Modelle seit etwa den siebziger Jahren mit der Ölkrise und ihr Einsatz verstärkt sich mit der globalen Klimaänderung. Wesentlicher Inhalt ist, dass der Mensch vom Reaktor zum Akteur in seiner Umwelt wird und beispielsweise durch das Öffnen der Fenster oder Betätigen des Sonnenschutzes sein individuelles, den eigenen Erwartungen entsprechendes Raumklima schafft. Durch die adaptiven Modelle besitzt die Größe „Mensch“ mehr Handlungsmöglichkeiten bzw. Freiheitsgrade. Der Mensch im Gebäude kann somit aktiv auf das Raumklima eingreifen und es bestimmend beeinflussen. Durch Messung der Raumsituation und Nutzerbefragungen wird ein Toleranzbereich der Behaglichkeit ermittelt und in Komfortmodellen beschrieben.

4.2 Unterscheidung nach natürlich belüfteten und klimatisierten Gebäuden

Neben den bekannten Einflussfaktoren (Bekleidung, Aktivität etc.) ist die Art der Belüftung beziehungsweise Klimatisierung des Gebäudes ein weiteres Kriterium der thermischen Behaglichkeit. Untersuchungen von de Dear & Brager [11] zeigen, dass Nutzer von natürlich belüfteten Bürogebäuden, die die Möglichkeit haben auf ihre Umgebung Einfluss zu nehmen (Fenster öffnen etc.), eine andere Akzeptanz bzw. Toleranz zeigen, als Nutzer in vollklimatisierten Gebäuden (mit zentraler Bereitstellung des Raumklimas ohne individuelle Einflussmöglichkeit). Deshalb muss bei der Bewertung der thermischen Behaglichkeit nach Gebäudetyp unterschieden werden:

- „Typ ALPHA“ - Gebäude mit hohem Nutzereinfluss (im Wesentlichen natürlich belüftete Gebäude)
- „Typ BETA“ - Gebäude mit niedrigem Nutzereinfluss (im Wesentlichen klimatisierte Gebäude)

Die Erkenntnisse sind in den Entwurf einer neuen Richtlinie in **den** Niederlanden (vgl. Boerstra et al. [12]) eingeflossen. Sie enthält im Wesentlichen folgende Kriterien:

- Unterscheidung des Gebäudes Typ ALPHA und Typ BETA
- Formulierung von Komfortbereichen über Grenzwerte der maximalen und minimalen empfundenen Innentemperatur für Gebäude Typ ALPHA bzw. Typ BETA. Die maximale Temperatur in einem Gebäude des Typs ALPHA ist bei wärmeren Außentemperaturen etwas höher eingestuft als bei Gebäuden des Typs BETA.
- Das Gebäudeverhalten wird über einen Zeitraum betrachtet und bewertet. Als Bewertungskriterium wird ein Prozentsatz mit der empfundenen Raumtemperatur zufriedener Personen während der Arbeitszeit herangezogen. Der Prozentsatz wird in drei Klassen unterteilt:
 - Klasse A-Gebäude (90% Zufriedene)
 - Klasse B-Gebäude (80% Zufriedene)
 - Klasse C-Gebäude (70% Zufriedene)

Im Allgemeinen unterscheidet sich der Gebäudetyp ALPHA vom Gebäudetyp BETA dadurch, dass der Nutzer bei ALPHA auf seine Umgebung bzw. die Regelung Einfluss nehmen kann. Die Bestimmung des Gebäudetyps ist in Abbildung 11 erläutert.

Für eine detaillierte Beschreibung des niederländischen Komfort-Indexes wird auf das Kapitel 8.9 verwiesen.

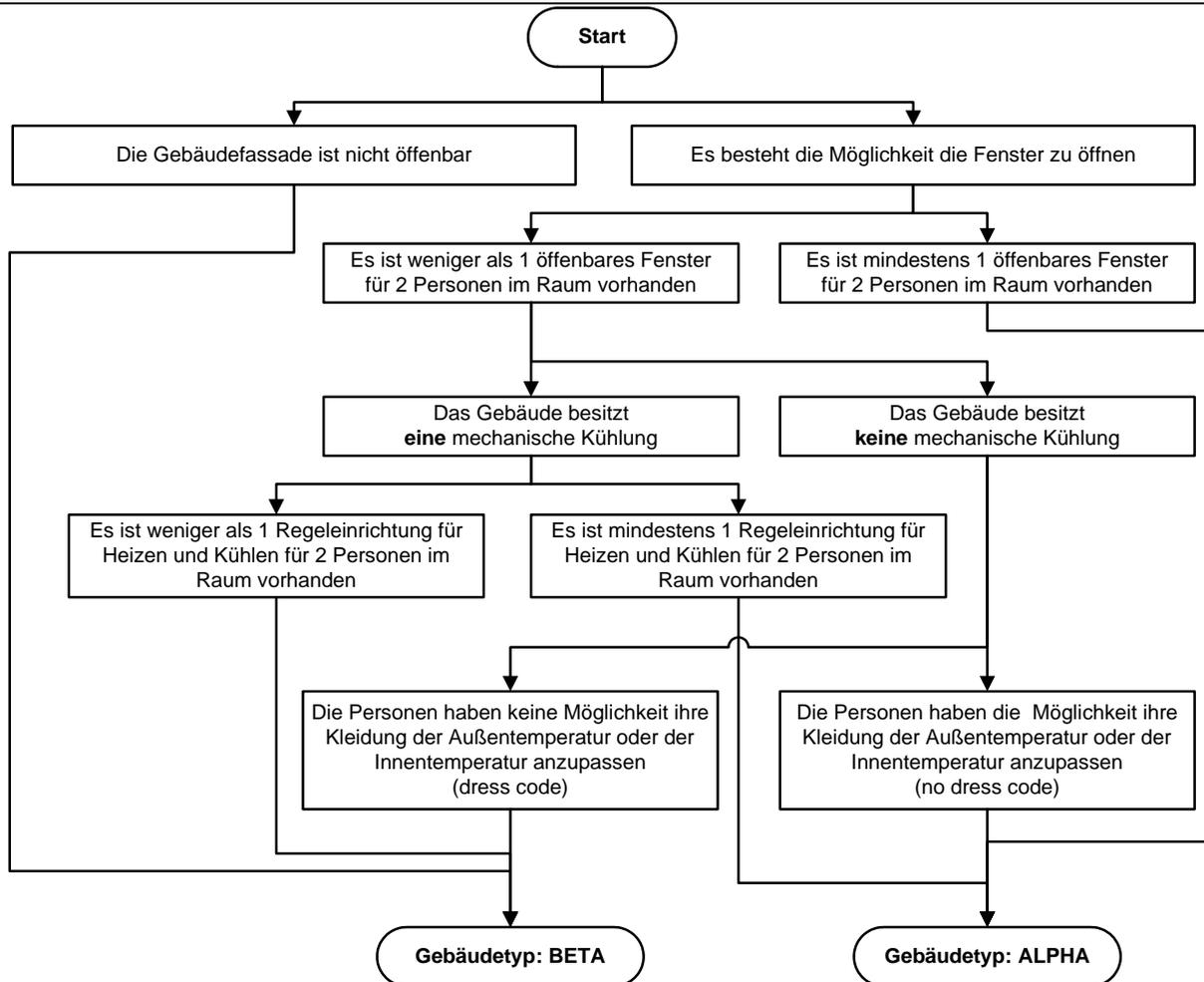


Abbildung 11: Flowchart für die Bestimmung des Gebäudetyps (modifiziert nach [12])

4.3 Einsatzmöglichkeiten regenerativer Kühlung bei Gebäuden vom Typ ALPHA bei mindestens gleicher Zufriedenheit der Nutzer

Zum Erreichen der gewünschten Raumtemperaturen im Sommer ist teilweise der Einsatz einer Kühlung erforderlich. In klimatisierten Gebäuden (Typ BETA – keine Einflussmöglichkeit durch den Nutzer) sind hierfür niedrigere Temperaturen erforderlich als in natürlich belüfteten Gebäuden (Typ ALPHA – Einflussmöglichkeit durch den Nutzer). Die notwendige Kälteleistung und die Anforderung an die Flinkheit ihrer Bereitstellung sind in klimatisierten Gebäuden meist so hoch, dass sie nur von konventioneller Klimatechnik unter Einsatz fossiler Brennstoffe bereitgestellt werden kann. Regenerative Kältequellen, die auch im Sommer durchaus zur Verfügung stünden, sind in ihrer Leistungsfähigkeit und Flinkheit dagegen meist begrenzt. Bei natürlich belüfteten Gebäuden (mit geringeren Anforderungen an Kälteleistung und Flinkheit) ist zum Erreichen einer identischen Zufriedenheit des Nutzers ihr Potenzial oft ausreichend. Damit bietet sich die Chance, bei solchen Gebäuden regenerative Kühlmethoden (=Verzicht auf konventionelle Kältemaschinen) einzusetzen.

Generell sollte man bei regenerativen Kühlmethoden in passive und aktive Maßnahmen unterscheiden:

Passive Maßnahmen zur regenerativen Kühlung:

- Reduktion der transparenten Teile der Gebäudehülle auf die für die Tageslichtversorgung der Nutzflächen notwendige Größe
- Schwere Bauweise

Fortsetzung passive Maßnahmen:

- Fensterlüftung bzw. natürliche Lüftung mit der Möglichkeit zur nächtlichen Lüftung
- Einsatz von Sonnenschutzverglasung
- beweglicher Überhitzungsschutz
- Baulicher Sonnenschutz

Aktive Maßnahmen zur regenerativen Kühlung:

- Fensterlüftung in Verbindung mit mechanischer Nachtlüftung durch Außenluft
- Mechanische Lüftung mit Vorkonditionierung der Außenluft durch einen Erdreichwärmetauscher
- Bauteilkühlung mit natürlichen Kältesenken (Grundwasser, Erdsonden, Energiepfähle etc.)
- solare Kühlung

4.4 Moderne Definitionen auf der Basis umfangreicher Befragungen

Die thermische Behaglichkeit im Sommer hängt nicht nur von einem auf den Punkt genau geregelten Laborklima ab, bei dem der Nutzer keine individuellen Wünsche (Einfluss auf seine Umwelt) äußern kann, sondern auch von der Möglichkeit einer persönlichen Anpassung der Umgebung (Fenster öffnen, Verstellen der Raumtemperatur etc.).

In einem umfangreichen interdisziplinären Forschungsprojekt [13] wurde die thermische Behaglichkeit unter Einbeziehung der Erfahrungen und Meinungen der Nutzer wissenschaftlich untersucht und bewertet. Im Nachfolgenden werden eine Zusammenfassung des Projektes und die daraus abgeleiteten Ergebnisse angegeben.

Grundlage der Untersuchungen waren 14 mindestens zwei Jahre alte Bürogebäude mit jeweils mind. 200 Angestellten. In diesen Gebäuden wurden fast 1.500 Arbeitsplätze in ca. 600 Räumen detailliert raumklimatisch und ergonomisch untersucht, wobei ca. 850 der betrachteten Arbeitsplätze durch raumluftechnische Anlagen belüftet, und die anderen 650 über Fenster belüftet werden.

Außerdem wurden umfangreichen Messreihen durchgeführt sowie personenbezogene Daten aus Befragungen von ca. 5.000 Beschäftigten ausgewertet, ergänzt durch medizinische Untersuchungen von über 900 Personen.

Insgesamt wurden rund 600 Parameter rund um Gebäude, Klimaanlage, Büroräume und Arbeitsplätze analysiert.

Die Ergebnisse der Nutzerbefragungen fielen wie folgt aus:

Die Möglichkeit der persönlichen Einflussnahme auf das Raumklima (Temperaturregelung raumweise!, Fenster offenbar!) ist, unabhängig von der Art der Belüftung bzw. Klimatisierung, von entscheidender Bedeutung für das Ausmaß der Befindlichkeitsstörungen am Arbeitsplatz. So äußerten 85 Prozent der ca. 4.600 befragten Personen den Wunsch nach direktem Einfluss auf das Raumklima, also einer Einzelraumregelung. Insbesondere zentral gesteuerte (Klima-)anlagen erhöhen die Anonymität und das Unwohlsein und führen, evtl. noch verstärkt durch fehlende Arbeitsanforderungen (Selbstständigkeit, Verantwortung, geistige Leistungen), zu hohen Beschwerderaten.

Die integrale Betrachtung physiologischer und psychologischer Einflüsse auf die Befindlichkeit des Menschen ist daher wichtig für angenehmes Leben und Arbeiten in Gebäuden: Dabei sind also nicht nur Qualität und Quantität von Raumklimafaktoren sondern auch die Interaktion von Tätigkeit, Interieur, gebäudetechnischer Ausstattung von Bedeutung.

Insbesondere das psychosoziale Umfeld in Büros (z.B. Geschlecht, Lebenssituation, Gesundheit, Bildungsstand, Arbeitsunzufriedenheit, Stressbelastung, etc) und Tätigkeitsmerkmale (Monotonie, Anforderungen, Softwarequalität etc.) tragen weit mehr zu Befindlichkeitsstörungen am Arbeitsplatz bei als bisher angenommen. Die als Hauptverursacher des so genannten Sick Building Syndromes (SBS) vermuteten Klimaanlage spielen dagegen eine geringere Rolle, müssen aber weiterhin in einem kausalen Zusammenhang zum SBS gesehen werden.

4.5 Der Stand in Deutschland bzw. die deutsche Normung

Deutschland Normen, Vorschriften und Empfehlungen, die sich auf die Anforderungen des Raumklimas beziehen.

Im Wesentlichen sind dies folgende Regelwerke:

- ASR 6: Arbeitsstätten-Richtlinie Raumtemperaturen [14]
- DIN 1946-2: Raumluftqualität; Gesundheitliche Anforderungen [4]
- DIN 4108-2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz [15]

Die Arbeitstättenrichtlinie (ASR 6) stellt Anforderungen an ein gesundheitliches, nicht den Arbeitnehmer schädigendes, annehmbares Raumklima. Bezüglich der Rauminnentemperatur soll die 26°C-Grenze nicht überschritten werden. Dies bezieht sich ausdrücklich auf Arbeitsplätze neben stark wärmeabgebenden Betriebseinrichtungen (Maschinen, Schmelzkessel, Beleuchtung etc.), um eine Schädigung der Gesundheit der Beschäftigten durch dauerhaft überhitzte Raumluft zu vermeiden. Somit sind die 26°C der ASR 6 eher eine Anforderung an spezielle Arbeitsplätze, als ein generelles Temperaturlimit für das sommerliche Verhalten eines Betriebsgebäudes bzw. Verwaltungsgebäudes. In einer gesonderten Stellungnahme (vgl. [16]) wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich daraus kein rechtlicher Anspruch auf „hitzefrei“ oder klimatisierte Räume ableiten lässt.

Die DIN 1946-2 gilt für Arbeits- und Versammlungsräume in Gebäuden, die über eine Raumlufttechnische Anlage (RLT-Anlage) und über die erforderlichen thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen verfügen.

Demnach gelten nur für RLT-Anlagen mit der lufttechnischen Behandlungsstufe „Kühlen“ bzw. „Entfeuchten“ die Anforderungen an eine maximal einzuhaltende operative Raumtemperatur. Die obere Grenze der Rauminnentemperatur nach DIN 1946-2 beträgt bei 32°C Außentemperatur 27°C (vgl. Abbildung 3).

Auch die DIN 4108-2 [15] enthält Kriterien zur Bewertung der Innentemperaturen im Sommer. Zunächst wird Deutschland in 3 Klimaregionen unterteilt (vgl. dort die Landkarte, Bild 3). Diese Aufteilung wird mit der Adaption des Menschen an das Außenklima begründet und aus tageslichttechnischer Sicht (minimale Fenstergröße) gestützt. Wenn dies nicht so wäre, würden in der wärmeren Klimaregion kleiner Fenstergrößen erforderlich. Die DIN 4108-2 gibt je nach Klimaregion verschiedene Grenzwerte der Innentemperatur an, sie sind in Tabelle 4 dargestellt. Im Gegensatz zu den anderen in Deutschland verwendeten Komfortkriterien, die mit fixen Grenzwerten arbeiten, ist (in Anlehnung an seit den 70er Jahren international diskutierte Modellen [23]) eine moderate Überschreitung dieser Grenzwerte an maximal 10% der Aufenthaltszeit (das sind bei Wohngebäuden 24h/d; bei Bürogebäuden 10 h/a) zulässig.

Tabelle 4: Zugrunde gelegte Grenzwerte der Innentemperaturen für die Sommer-Klimaregionen nach DIN 4108-2

Sommer-Klimaregion	Merkmal der Region	Grenzwert der Innentemperatur [°C]	Höchstwert der mittleren monatlichen Außentemperatur θ [°C]
A	sommerkühl	25	$\theta \leq 16,5$
B	gemäßigt	26	$16,5 < \theta < 18$
C	sommerheiß	27	$\theta \geq 18$

Klimaregionen in PRIMERO-Sommer
Histogramm - Außentemperatur

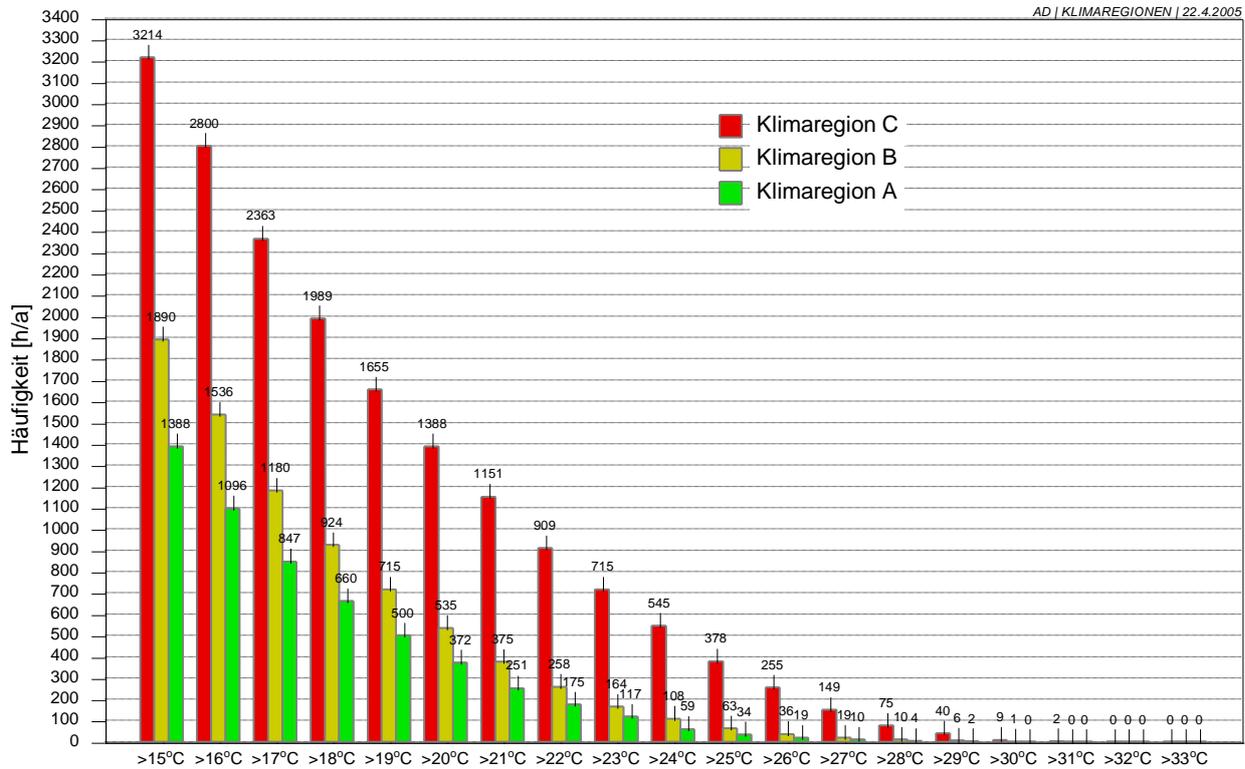


Abbildung 12: Histogramm der Außentemperatur für die 3 Klimaregionen (nach DIN 4108-2) in PRIMERO-Sommer

Tabelle 6: Häufigkeit der Temperaturüberschreitung in h/a für die drei Klimaregionen

	Klima-region	> 22°C	> 23°C	> 24°C	> 25°C	> 26°C	> 27°C	> 28°C	> 29°C	> 30°C	> 31°C
Häufigkeit der Temperatur-überschreitung [h/a]	A	175	117	59	34	19	10	4	2	0	0
	B	258	164	108	63	36	19	10	6	1	0
	C	909	715	545	378	255	149	75	40	9	2

6. Energiebilanz in einem Raum im Sommer

Im Wesentlichen wird der Kühlleistungsbedarf eines Raumes durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Außenklima
- Anforderungen an das Raumklima
- interne und externe Wärmelasten
- Bauweise

Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits der Einfluss des Außenklimas diskutiert. Neben den Wärmeeinträgen durch die Sonne wird im Nachfolgenden hauptsächlich auf die internen Wärmelasten eingegangen.

6.1 Wärmeeinträge von der Sonne

Die direkte Sonneneinstrahlung und die diffuse Strahlung beregen das größte Wärmelastpotenzial. Ausschlaggebend für die Intensität dieser Wärmelast sind folgende Faktoren:

- Fenstergrößen
- Verglasung und Rahmenanteil
- Orientierung
- Beschattung

Neben der Südseite ist auch die solare Strahlung auf Ost- und Westverglasungen im Hochsommer sehr intensiv (vgl. Abbildung 13). Ostorientierungen bzw. Ostfenster sollten stets genauer untersucht werden. Bereits am frühen Morgen sind diese sehr stark besonnt; schon vor Arbeitsbeginn. Im Allgemeinen sollte für diese Orientierung eine geeignete Verschattung gewählt werden; sonst erhöht die Solarstrahlung die Rauminnentemperatur. Die maximale Globalstrahlung der Süd- und Westorientierung fällt in der Regel mit der höchsten Außentemperatur zusammen. Auch für diese Orientierungen sind geeignete Verschattungssysteme (starr/ baulich, beweglich) zu wählen.

Solare Strahlung

20. Juli: Referenzort Würzburg

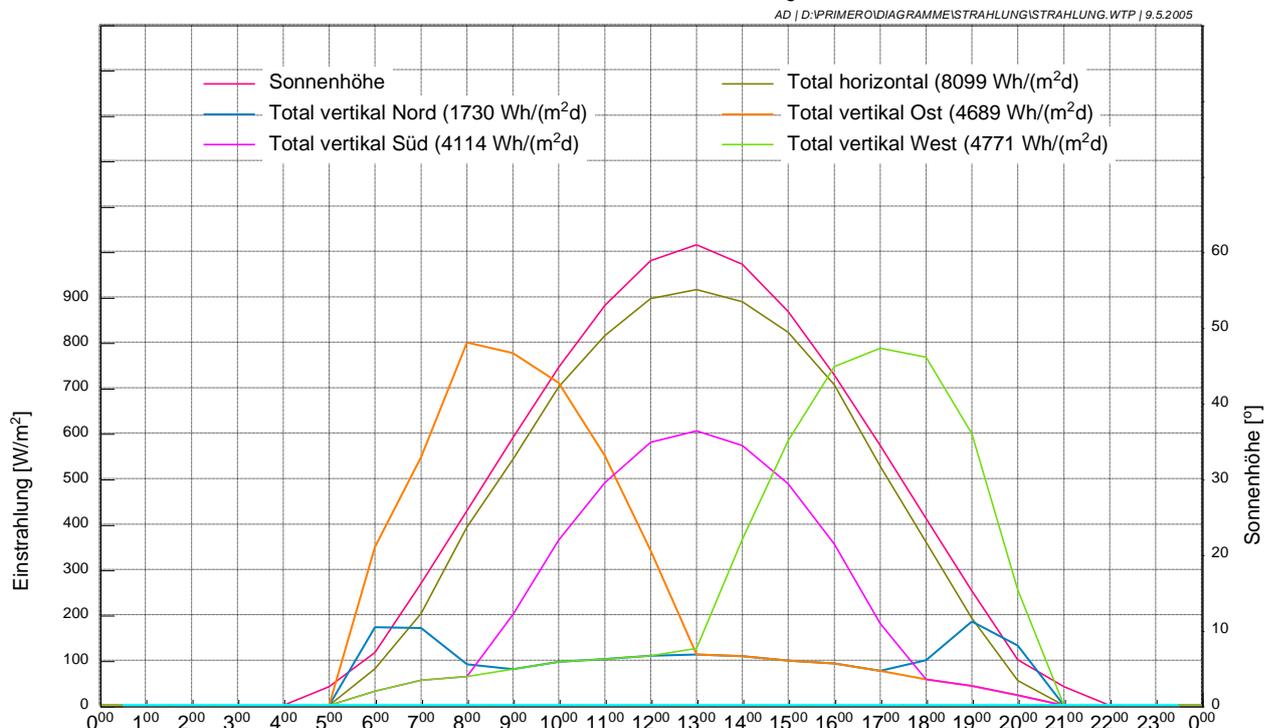


Abbildung 13: Solare Einstrahlung auf verschiedene Orientierungen im Hochsommer (Sonnenhöchststand)

6.2 Wärmeabgabe des Menschen

Die Wärmeabgabe des Menschen beeinflusst ebenfalls das Raumklima. Im Allgemeinen, bei leichter Tätigkeit, kann man eine Wärmeabgabe von 70 Watt (trocken) pro Person annehmen. Weitere Informationen und Abhängigkeiten bezüglich des Aktivitätsgrads können dem Kapitel 2.6 und Tabelle 2 entnommen werden.

In der Praxis werden häufig spezifische Angaben bezüglich der Wärmelasten durch Personen benutzt. Anhand eines Einzelbüros wird dies nach der Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfes von Gebäuden (MEG, [20]) kurz verdeutlicht:

Tabelle 7: Spezifische Wärmelasten für Personen für ein Einzelbüro nach MEG [20]

	<i>tief</i>	<i>mittel</i>	<i>hoch</i>
<i>Belegungsdichte [m²/Person]</i>	18	14	10
<i>Interne Wärmeabgabe [W/m²]</i>	4	5	7

6.3 Wärmeabgabe der Leuchten

Je nach Effizienz der Beleuchtungsanlage und Nutzungsart des Raumes/ Gebäudes ergibt sich der Betrag der Wärmeabgabe durch die Beleuchtung.

In PRIMERO-Sommer sind die Standardnutzungen nach MEG [20] verwendet. Für die Effizienz der Beleuchtungsanlage sind drei Gruppen definiert; Tabelle 8 stellt diese gegenüber:

- tief (gute Effizienz der Beleuchtungsanlage)
- mittel (durchschnittliche Effizienz der Beleuchtungsanlage)
- hoch (mäßige Effizienz der Beleuchtungsanlage)

Tabelle 8: Spezifische Wärmelasten Beleuchtung für ein Einzelbüro nach [20]

	<i>tief</i>	<i>mittel</i>	<i>hoch</i>
<i>Interne Wärmeabgabe [W/m²]</i>	8,5	11,5	14,5

Die Vollbenutzungsstunden pro Jahr in PRIMERO-Sommer ergeben sich zum einen durch die maximale Belegungs- /Nutzungszeit am Tag und zum anderen aus dem zur Verfügung stehenden Tageslichtanteil. Wegen der großen Tageslänge besteht die Möglichkeit, durch optimale Tageslichtplanung im Sommer nahezu ohne Kunstlicht und damit ohne die zugehörigen Wärmeeinträge auszukommen. Umgekehrt führt bei düsteren Räumen (oder einem stark abdunkelnden Überhitzungsschutz) das dann notwendige Kunstlicht zu einem Wärmeeintrag, der im Vergleich zu den Einträgen von Personen und Geräten dominierend ist und damit die Raumtemperatur bestimmt. Das Vermeiden zu hoher Wärmeeinträge ist also primär auch eine gute Tageslichtplanung!

Ein weiteres Merkmal der Wärmelasten ist die Art der Wärmeabgabe. Es wird zwischen konvektiven und strahlungsgebundenen Wärmegewinnen unterschieden. Die konvektiven Wärmelasten treten lokal auf und führen zu einem stärkeren, direkten Temperaturanstieg im Raum. Die strahlungsgebundenen Wärmelasten verteilen sich besser auf die Speichermasse des Raumes und erwärmen den Raum kurzfristig weniger. Normalerweise wird von einem Verhältnis von konvektiver zu strahlungsgebundener Wärmelast von 55% zu 45% ausgegangen [21].

6.4 Wärmeabgabe von elektrischen Geräten

Die elektrische Leistungsaufnahme der meisten EDV- und Bürogeräten hat sich in den letzten Jahren deutlich reduziert. Dennoch hat die dem Raum zugeführte Wärmelast durch den verstärkten EDV-Einsatz eher zugenommen.

Der Energieverbrauch von elektrischen Geräten ist mit der Wärmelast (konvektiv u. strahlungsgebunden) gleich zusetzen. Zahlreiche Arbeiten, wie auch in [22], haben festgestellt, dass der tatsächliche Energieverbrauch ca. 25-50% unter der Leistungsangabe (Typenschild) des Herstellers liegt.



Analog zur Beleuchtung werden in PRIMERO-Sommer die angesetzten Werte nach dem Technisierungsgrad gestaffelt (Tabelle 9). Tabelle 10 zeigt die Absolutwerte für verschiedene Bürogeräte auf.

Tabelle 9: Spezifische Wärmelasten Arbeitshilfen für ein Einzelbüro nach [20]

	<i>tief</i>	<i>mittel</i>	<i>hoch</i>
<i>Interne Wärmeabgabe [W/m²]</i>	3	7	15

Tabelle 10: Typische Werte für Wärmelasten von Bürogeräten nach [21]

<i>Gerät</i>	<i>aktiv</i>	<i>standby</i>	<i>aus</i>
<i>PC</i>	60 W	10 W	5 W
<i>Bildschirm (CRT)</i>	90 W	5 W	-
<i>PC mit Bildschirm</i>	150 W	15 W	5 W
<i>Laserdrucker</i>	190 W	2 W	1 W
<i>Tintenstrahldrucker</i>	20 W	2 W	-
<i>Laser-Fax</i>	80 W	2 W	-
<i>Übrige-Fax</i>	20 W	2 W	-
<i>Kopierer</i>	1100 W	27 W	1 W



7. Beispiele

8. Gesetze - Verordnungen und ihre Bewertung

Im Nachfolgenden wird ein kurzer Überblick über die nationalen und internationalen Richtlinien und Regelwerke gegeben.

8.1 DIN 1946-2

Die DIN 1946-2 gilt für Arbeits- und Versammlungsräume in Gebäuden, die über eine Raumluftheizungsanlage (RLT-Anlage) verfügen. Anwendbarkeit und Inhalt wurde bereits in Kapitel 4.5 diskutiert.

8.2 DIN 4108-2

Die DIN 4108-2 [15] enthält Kriterien zur Bewertung der Innentemperaturen im Sommer. Weiterführende Informationen zur DIN 4108-2 enthält das Kapitel 4.5.

8.3 Arbeitsstättenrichtlinie (ASR 6)

Die Arbeitsstättenrichtlinie (ASR 6) stellt Anforderungen an ein gesundheitliches, nicht den Arbeitnehmer schädigendes, angenehmes Raumklima. Diese Richtlinie wurde mit dem bekannten Bielefelder Klimaurteil oft zitiert. Einzelheiten können aus Kapitel 4.5 entnommen werden.

8.4 PMV und PPD nach DIN EN ISO 7730

Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben gibt es zwei unterschiedliche Ansätze zu Behaglichkeitsmodellen:

- Wärmebilanzmodelle und
- Adaptive Modelle.

Das Modell nach Fanger [5] zählt zu den Wärmebilanzmodellen. Die Bewertung der thermischen Behaglichkeit beruht auf die Einführung von zwei Indizes:

- PMV (predicted mean vote; vorausgesagtes mittleres Votum)
- PPD (predicted percentage of dissatisfied; vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener)

Das PMV ist ein Index, der den Durchschnittswert der Klimabeurteilung einer großen Personengruppe vorhersagt. Die Beurteilung ist durch eine 7-stufige Klimabeurteilungsskala gegliedert:

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

Der PPD-Index stellt eine quantitative Vorhersage der Anzahl der mit einem bestimmten Umgebungsklima unzufriedenen Personen dar. Dies bedeutet, dass der PPD den Prozentsatz einer großen Personengruppe ausdrückt, die das Raumklima entweder als heiß (+3), warm (+2), kühl (-2) oder kalt (-3) empfinden.

AD | D:\PRIMERO\DIAGRAMME\PPD\PPD_PMV_KOMBI.WTP | 26.4.2005

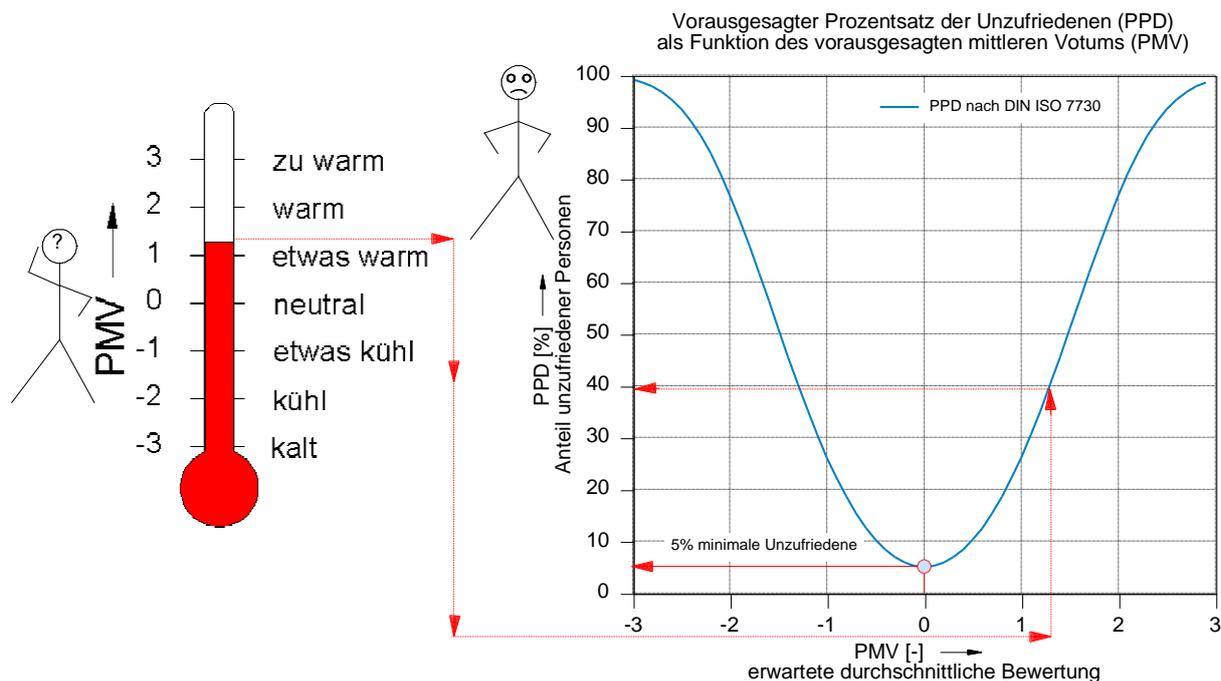


Abbildung 14: PMV und PPD nach DIN EN ISO 7730

Der PMV-Index kann mittels analytischen Gleichungen nach [5] berechnet werden. In die Berechnung des mittleren Votums fließen folgende Größen mit ein:

- Energieumsatz
- Bekleidung
- Lufttemperatur
- Strahlungstemperatur
- Luftfeuchte
- Luftgeschwindigkeit
- Wasserdampfpartialdruck
- Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
- Oberflächentemperatur der Bekleidung

Ist der PMV-Index ermittelt lässt sich daraus der Prozentsatz der Personen, die mit dem Raumklima unzufrieden sind ermitteln. Dies kann mathematisch ([5]) oder graphisch erfolgen. Die graphische Vorgehensweise zeigt **Abbildung 14**.

Der kleinstmögliche PPD-Wert beträgt 5%. Nach DIN EN ISO 7730 empfinden mindestens 2,5% der Personen das Raumklima etwas zu kühl bzw. etwas zu warm.

8.5 Luftqualität und Verordnungen (Versammlungsstätten)

Als Maß der Luftqualität wird der CO₂-Gehalt des Raumes herangezogen. Zurückzuführen ist dies auf den Hygieniker Max von Pettenkofer. Er definierte als Kriterium für eine gute Raumluftqualität eine CO₂-Konzentration von 0,1% (1000 ppm; Volumenkonzentration); die so genannte Pettenkofer-Zahl. Diese historische Zahl findet auch heute noch Anwendung in den nationalen Normen. Die DIN 1946-2 [4] empfiehlt eine Volumenkonzentration von 0,1%; Grenzwert: 0,15%.

Aus den Empfehlungen zur CO₂-Konzentration leiten sich, je nach Nutzung, verschiedene Außenluftvolumenströme ab. Die Außenluftvolumenströme nach DIN 1946-2 und ASR 5 finden sich in Tabelle 11 und Tabelle 12. Die DIN 1946-2 empfiehlt bei zusätzlichen Geruchsquellen im Raum (z.B. Zigarettenrauch) den Außenluftvolumenstrom um 20 m³/h Pers. zu erhöhen.

Tabelle 11: Personen- und flächenbezogener Mindestaußenluftvolumenstrom nach [4]

Raumart/ Tätigkeit	Außenluftvolumenstrom	
	Personenbezogen [m³/h]	Flächenbezogen [m³/m² h]
Einzelbüro	40	4
Großraumbüro	60	6
Versammlungsräume	20	10 – 20
Unterrichtsräume	20 – 30	12 – 15
Verkaufsräume	20	3 – 12
Gaststätten	30	8

Tabelle 12: Personenbezogener Außenluftvolumenstrom nach [23]

Raumart/ Tätigkeit	Außenluftvolumenstrom Personenbezogen [m³/h]
Überwiegend sitzende Tätigkeit	20 – 40
Überwiegend nicht sitzende Tätigkeit	40 – 60
Schwere körperliche Arbeit	> 65

Zusätzlich zu den oben genannten Richtlinien ist noch die jeweilige Bauordnung (Versammlungsstättenverordnung) der Länder zu beachten. Die dort angegebenen Werte decken sich jedoch mit denen der DIN 1946-2 bzw. ASR 5. Nach der bayerischen Versammlungsstättenverordnung werden 20 m³/h Pers. bzw. 30 m³/h Pers. (bei Tabakrauch) empfohlen.

8.6 ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

Die amerikanische Richtlinie ASHRAE Standard 55 [24] lehnt sich im Wesentlichen an die internationale ISO 7730 [5] an. Jedoch beschreibt der Standard 55 explizit die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit für natürlich belüftete Räume bzw. Gebäude.

Definitionsgemäß gilt diese für Räume/ Gebäude, die durch den Nutzer natürlich über Fenster belüftet werden. Studien haben erwiesen, dass sich das Empfinden der Nutzer in natürlich belüfteten Gebäuden von dem Empfinden der Nutzer in klimatisierten Gebäuden unterscheidet. Die Gründe hierfür liegen in den Erwartungen an das Innenraumklima, die Adaption an die Außentemperatur oder die Anpassung der Bekleidung (vgl. Kapitel 4.2). Die Anwendung beschränkt sich auf Nutzungen für einen Aktivitätsgrad von 1,0 bis 1,3 met und Gebäude bzw. Tätigkeiten bei denen der Nutzer seine Kleidung an die jeweiligen Witterungsverhältnisse anpassen kann.

Die zulässigen Rauminnentemperaturen können aus Abbildung 15 entnommen werden. In der Abbildung sind zwei verschiedene Grenzkurven der maximalen Rauminnentemperatur aufgenommen; 80% der Nutzer sind mit dem Raumklima zufrieden und die Grenzkurve für 90% Nutzerakzeptanz. Der ASHRAE Standard empfiehlt für normale Anforderungen an die thermische Behaglichkeit oder in der frühen Planungsphase, wenn noch keine detaillierten Informationen vorliegen die Grenzkurve der 80% Akzeptanz. Wenn ein höherer Raumkomfort gewünscht wird, so sollte die 90%-Kurve verwendet werden. Die Daten für die Ermittlung der Grenzkurven basieren auf adaptiven Modellen der thermischen Behaglichkeit, bei denen weltweit 21.000 Messreihen ausgewertet wurden. Die Anwendung der Grenzkurven beschränkt sich auf den angegebenen Temperaturbereich (10 – 33,5°C).

Behaglichkeitsfeld für natürlich belüftete Räume nach ASHRAE Standard 55

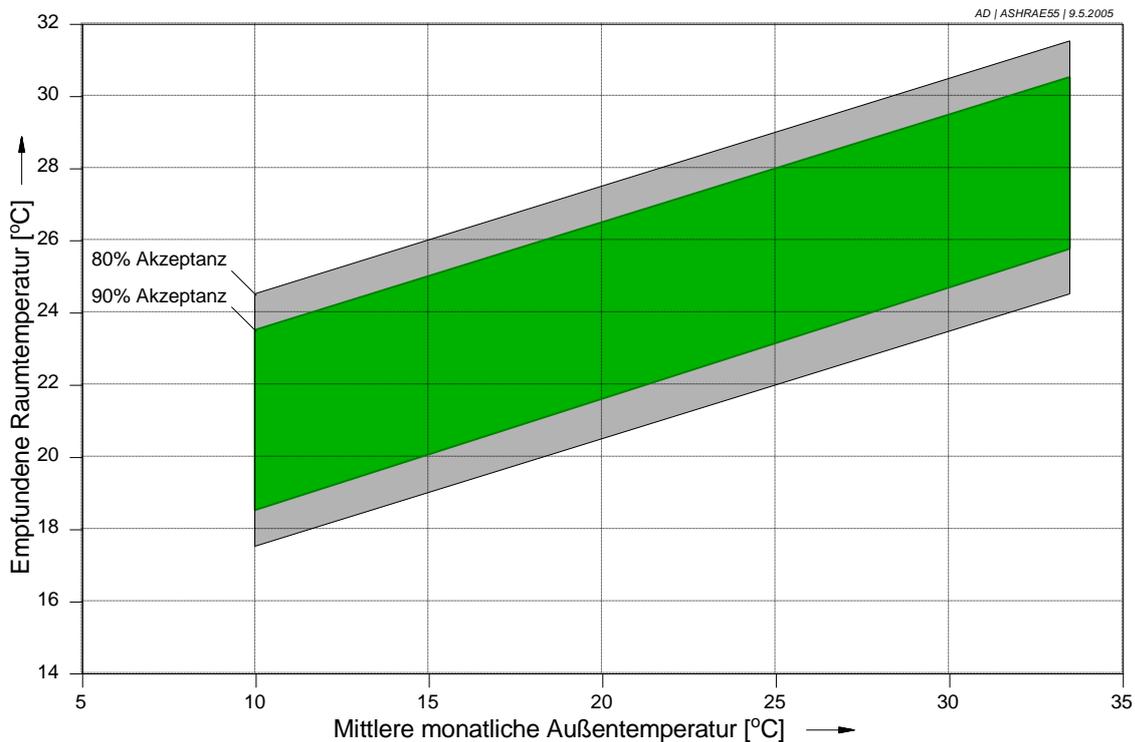


Abbildung 15: Behaglichkeitsfeld für natürlich belüftete Räume nach ASHRAE Standard 55

8.7 sia 2021: Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz

Das schweizer Merkblatt sia 2021 [25] behandelt Gebäude mit hohem Glasanteil. Dabei handelt es sich um Gebäude mit mehr als 50% Fensterfläche bzw. Gebäude bei denen das Verhältnis von Glasfläche zu Energiebezugsfläche (=beheizte Nutzfläche) größer 30% ist. Ziel des Merkblattes ist es, einfache Regeln für die Vermeidung von Behaglichkeitsproblemen im Winter und Sommer zu formulieren.

Zusammenfassend stellt die sia 2021 Regeln für Gebäude mit hohem Glasanteil auf; getrennt nach:

- Bauliche Maßnahmen
- Betriebliche Maßnahmen
- Haustechnische Maßnahmen

Bauliche Maßnahmen

- Der Glasanteil der Fassade soll mit Bedacht erfolgen: Je höher der Glasanteil, desto höher der Planungsaufwand bzw. weniger fehlertolerant. Beidseitig verglaste Eckräume sind besonders kritisch und nach Möglichkeit zu vermeiden.
- Räume hinter verglasten Fassaden sollen tief sein. Je tiefer die Räume, desto geringer die Auswirkungen der externen Wärmelasten.
- Die Art und Lage des Sonnenschutzes ist zu beachten. Die beste Wirkung hat ein automatisch betriebener, luftumströmter, beweglicher und windsicherer Sonnenschutz.
- Die Wahl der Gläser und Fenster: mittlerer U-Wert der Fassade < 0,9 W/m²K, g-Wert der Verglasung 0,3 bis 0,45, guter Lichttransmissionsgrad > 0,5.
- Ein Teil der Fenster soll individuell zu öffnen sein.
- Die Gebäudemasse an der Decke, Boden und an den Wänden soll offen zum Raum sein (Abhängungen vermeiden).

Betriebliche Maßnahmen

- Die Arbeitsplätze sollen nicht zu nah am Fenster platziert sein (ca. 2m Abstand).
- Die internen Wärmelasten sollen tief sein (energieeffiziente Bürogeräte, Helligkeits-Präsenzsteuerung beim Licht)
- Die Raumnutzer sollen die Möglichkeit haben, ihre Bekleidung der Jahreszeit anzupassen.
- Abgetrennte, separate Räume für Raucher

Haustechnische Maßnahmen

- Die mechanische Lüftungsanlage soll in Gebäuden ohne Zusatzkühlung in der Sommernacht einige Stunden voll zur Raumkühlung betrieben werden (Morgentemperatur beachten!)
- Im Sommer soll die Primärluft gekühlt werden bzw. der Raum sollte eine zusätzliche Flächenkühlung haben. Stark verglaste Räume können kaum ohne Kühlung behaglich benutzt werden. Eine Zusatzkühlung ist meist energieeffizienter als die Nachtlüftung.
- Die Kühlleistung (Luft und Bauteilkühlung) muss dem effektiven Bedarf angepasst sein; keine unnötige Überdimensionierung.

Die sia 2021 bietet eine Methode zur Risikobeurteilung des thermischen Komforts im Sommer. Im Nachfolgenden wird die Matrix zur Risikobeurteilung kurz erläutert. Beim Einsatz sollte jedoch daran gedacht werden, dass die Matrix ursprünglich für das schweizer Außenklima (Schweizer Mittelland) und für Räume mit thermisch aktiven Decken entwickelt wurde. Ein direktes Übertragen ist somit nur bedingt möglich. Jedoch kann mit Hilfe dieser Methode ein erster Trend aufgezeigt werden. Die dort prognostizierten Rauminnentemperaturen wurden auf der Grundlage von zahlreichen Simulationsberechnungen ermittelt. Das verwendete Außenklima enthielt keine Hitzetage (Temperaturen > 30°C). Die Tabelle 13 gibt einen Überblick über das Beurteilungsverfahren nach sia.

Tabelle 13: Matrix zur Risikobeurteilung des thermischen Komforts im Sommer für Gebäude mit hohem Glasanteil (>50%); Klimarandbedingung: Schweizer Mittelland

	Mittlere Tagessumme der Gesamtwärmelast (solare und interne Wärmelasten) Q_{total} [Wh/m ² d]			
	150	250	350	450
Systeme für Lüftung und Kühlung	Risikobeurteilung des thermischen Komforts und Beurteilung der Systemwahl			
0 Nur Fensterlüftung Komfort Fensterlüftung tags Wahl Haustechnik-System	evtl. genügend evtl. genügend	ungenügend ungenügend	unzumutbar ungenügend	unzumutbar ungenügend
1 Mech. Lüftung + Nachlüftung Luftwechselrate 2,0 h⁻¹ Komfort ohne Fensterlüftung tags Komfort mit Fensterlüftung tags Wahl Haustechnik-System	28°C - 29°C evtl. genügend genügend angemessen	29°C - 31°C ungenügend evtl. genügend evtl. genügend	30°C - 32°C unzumutbar ungenügend ungenügend	31°C - 34°C unzumutbar ungenügend ungenügend
2 wie 1 + Primärkühlung Komfort ohne Fensterlüftung tags Komfort mit Fensterlüftung tags Wahl Haustechnik-System	26°C - 27°C gut sehr gut optimal	27°C - 29°C genügend gut angemessen	28°C - 31°C ungenügend evtl. genügend evtl. genügend	29°C - 33°C unzumutbar ungenügend ungenügend
3 wie 2 + Zusatzkühlung tags mit 20 W/m² Komfort ohne Fensterlüftung tags Komfort mit Fensterlüftung tags Wahl Haustechnik-System	<< 26°C gut gut über- dimensioniert	< 26°C gut sehr gut optimal	26°C - 27°C genügend gut angemessen	27°C - 28°C ungenügend evtl. genügend evtl. genügend

8.8 sia 382/1: Technische Anforderungen an lufttechnische Anlagen

Die schweizer sia-Norm 382 [26] beschränkt den Einsatz von Kälteanlagen zur Klimatisierung mit einer klaren Regelung. Zunächst sind Anforderungen an die Luftdichtheit des Gebäudes, Sonnenschutz, Verglasung und die Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile zu erfüllen. Zeigen diese Maßnahmen bezüglich einer Verbesserung des Raumkomforts keine Wirkung oder treten im Raum sehr hohe interne Lasten ($> 350 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}$) auf, darf eine Kühlung realisiert werden. Die dabei einzuhaltende Rauminnentemperatur ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Raumlufttemperatur in Wohn- und Bürobauten darf die Grenze während maximal 100 h/a überschreiten. Dies gilt für die Nutzungszeit, auch in Perioden mit sehr hohen Außentemperaturen.

Obere und untere Grenze der Raumlufttemperatur je nach Außentemperatur nach sia 382

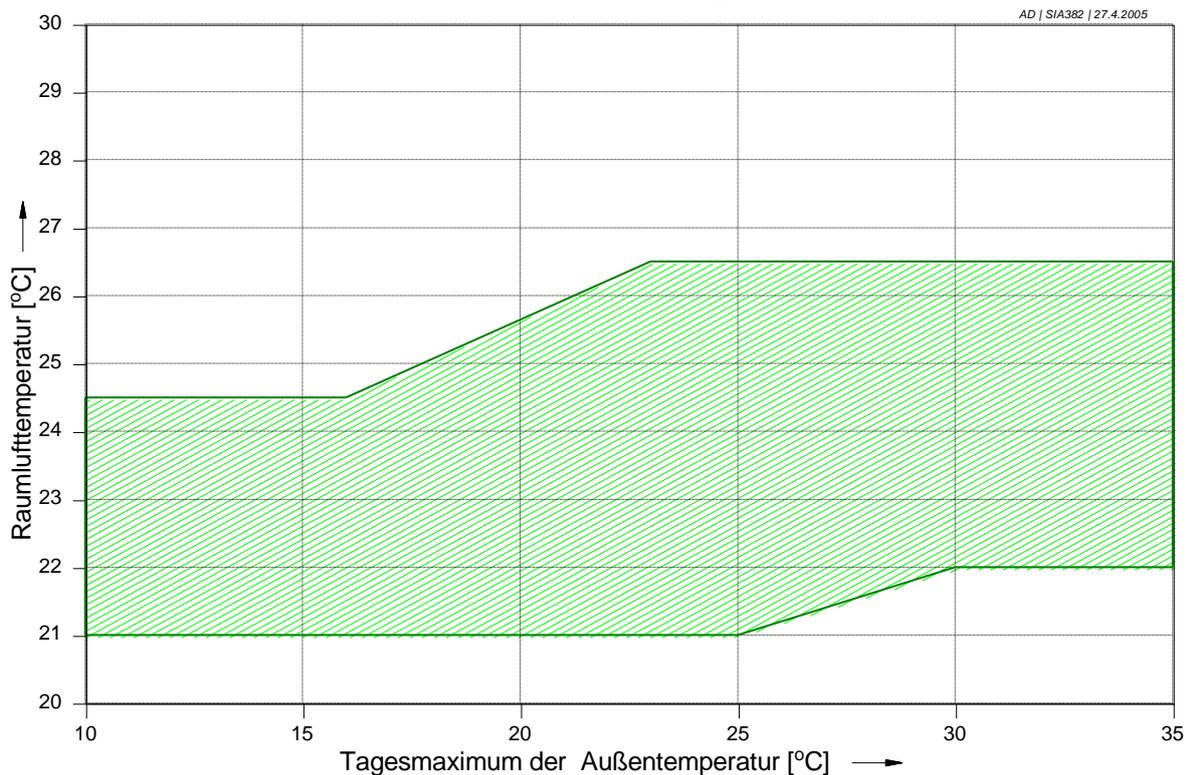


Abbildung 16: Obere und untere Grenze der Raumlufttemperatur je nach Außentemperatur nach [26]

8.9 Niederländischer Komfort Index

Die Unterscheidung zwischen natürlich belüfteten und klimatisierten Gebäuden und die daraus folgenden Behaglichkeitskriterien beschreibt ein neuer Ansatz aus den Niederlanden [12] (vgl. Kapitel 4.2). Es wird generell in zwei Gebäudeklassen unterschieden:

- „Typ ALPHA“ – Gebäude mit hohem Nutzereinfluss (im Wesentlichen natürlich belüftete Gebäude) und
- „Typ BETA“ – Gebäude mit niedrigem Nutzereinfluss (im Wesentlichen klimatisierte Gebäude).

Die Bestimmung des Gebäudetyps ist in Abbildung 11 ausführlich dargestellt. Zur Bewertung wird das Gebäudeverhalten über einen Zeitraum betrachtet. Die Bewertung erfolgt mittels eines Prozentsatzes der Personen, die während der Arbeitszeit mit dem Raumklima zufrieden sind. Je nach dem Anteil der zufriedenen Personen (90%, 80% und 70%) wird das Gebäude in die betreffende Gebäudeklasse (A, B und C) eingeteilt. Die Einteilung der Gebäudeklassen basiert auf der fortlaufend gemittelten Außentemperatur (RMOT*). Diese wird aus dem momentanen Außenklima und dem Klima der vergangenen 3 Tage (Theorie der Adaption und Akklimatisation) bestimmt. Aufbauend auf dieser gemittelten Außentemperatur (RMOT*) wird eine neutrale Temperatur (100% zufriedene Personen) ermittelt. Bis zu einer RMOT* von 12°C ist die neutrale Temperatur für den Gebäudetyp ALPHA und BETA identisch. Steigt die gemittelte Temperatur über 12°C so verschieben sich die oberen Komfortlimiten des Gebäudetyps ALPHA nach oben. Die Gebäudeklassen sind somit als die Schwankung bzw. Bandbreite der neutralen Temperatur definiert. Die Komfortbereiche nach dem niederländischen Ansatz sind in Abbildung 17 und

Komfortbereiche für den Gebäudetyp BETA
Empfundene Raumtemperatur vs. RMOT*

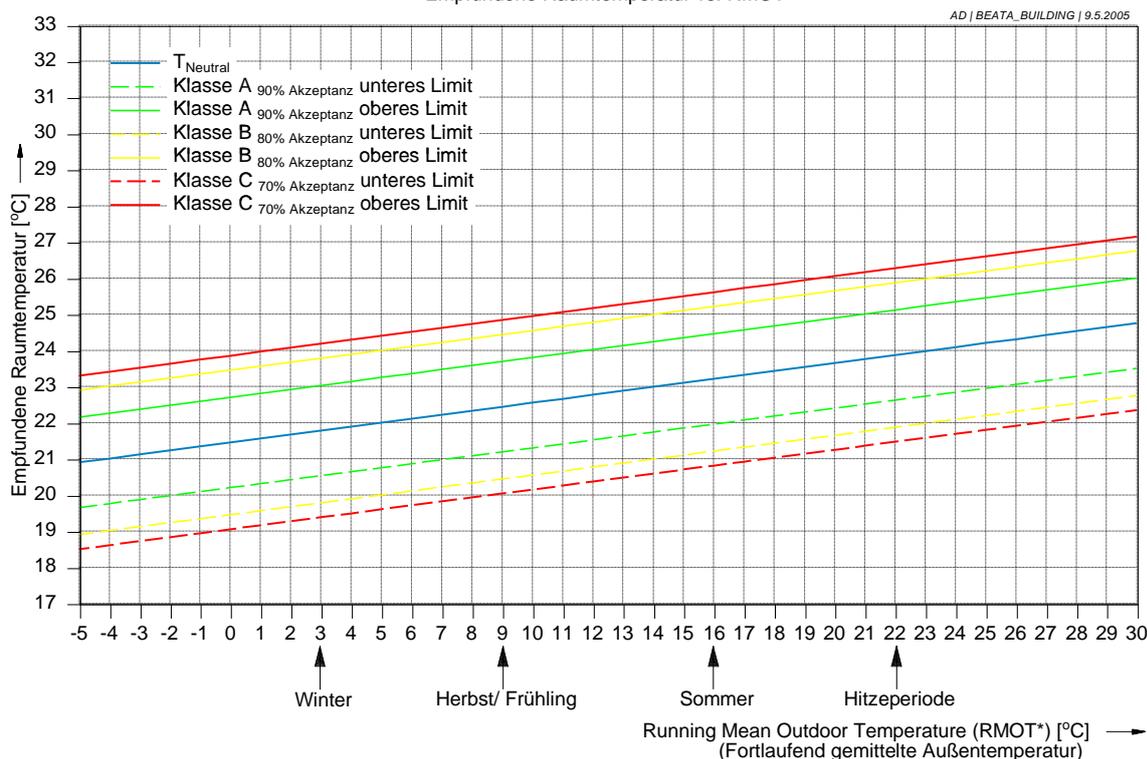


Abbildung 18 dargestellt. In Abbildung 19 ist beispielhaft die empfundene Raumtemperatur für einen Raum des Gebäudetyps ALPHA dargestellt.

Komfortbereiche für den Gebäudetyp ALPHA
Empfundene Raumtemperatur vs. RMOT*

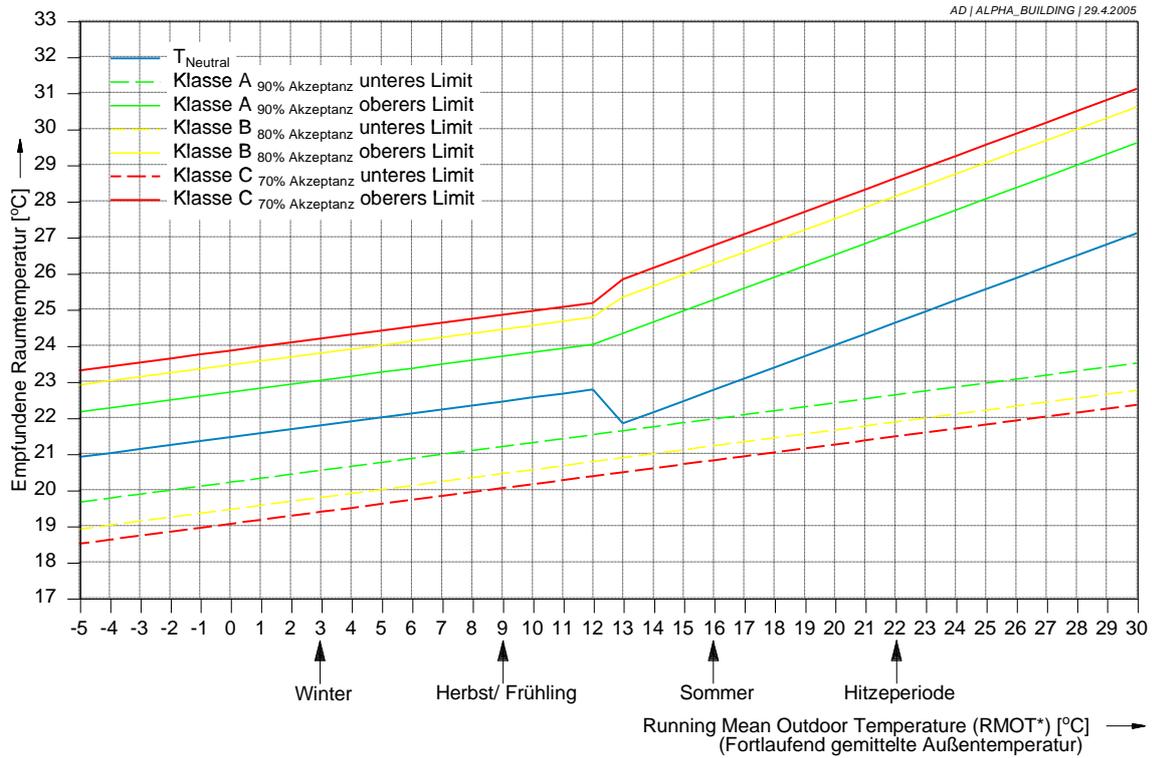


Abbildung 17: Komfortbereiche für den Gebäudetyp ALPHA nach [12]

Komfortbereiche für den Gebäudetyp BETA
Empfundene Raumtemperatur vs. RMOT*

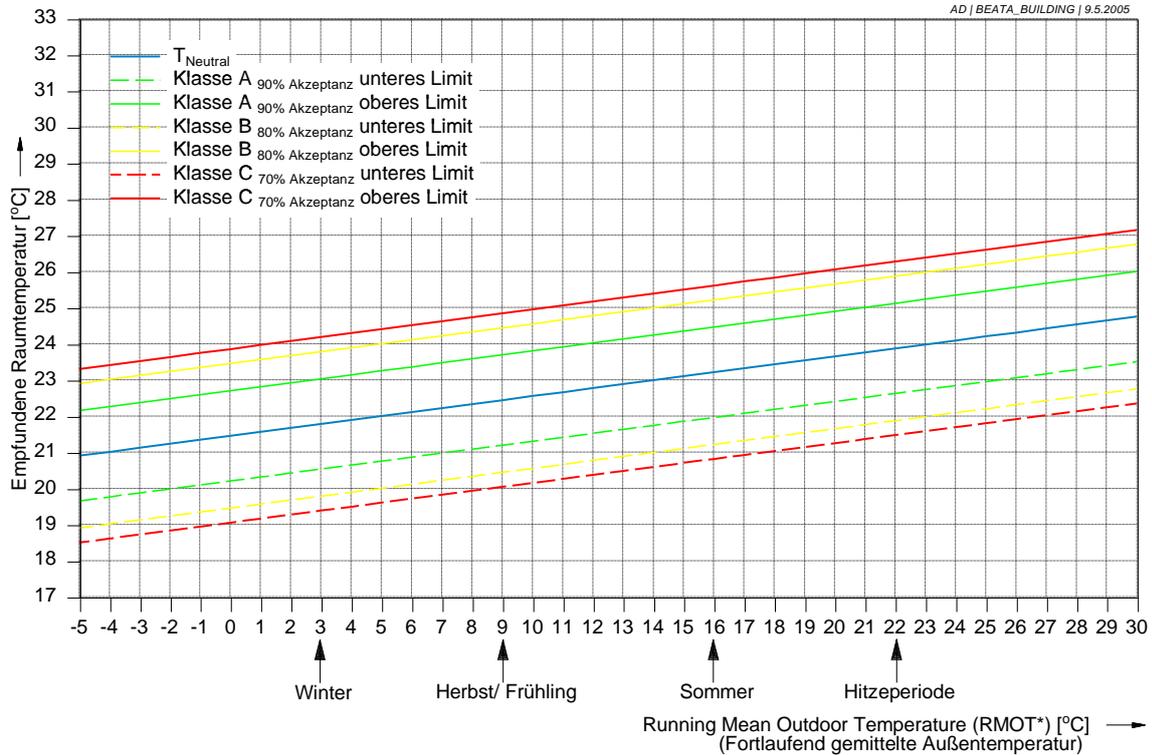


Abbildung 18: Komfortbereiche für den Gebäudetyp BETA nach [12]

Komfortbereiche für den Gebäudetyp ALPHA
Empfundene Raumtemperatur vs. RMOT*

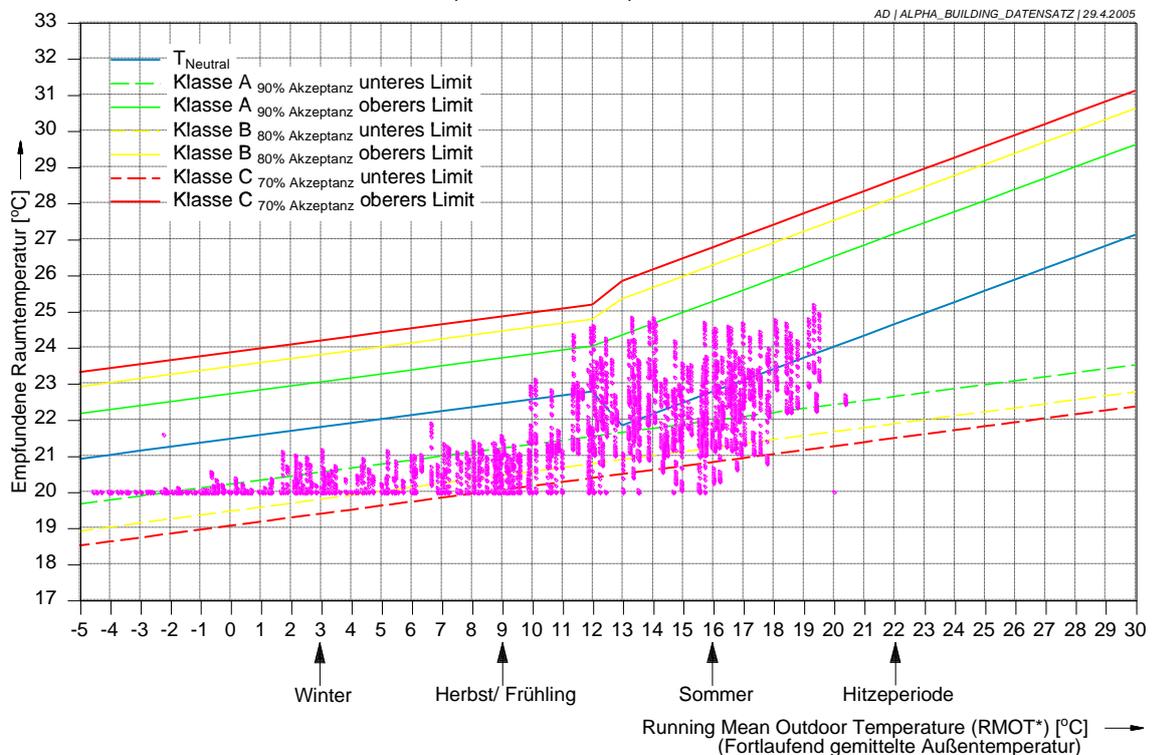


Abbildung 19: Auswertung, Darstellung der empfundenen Raumtemperatur in Abhängigkeit der RMOT* für den Gebäudetyp ALPHA

9. Literatur

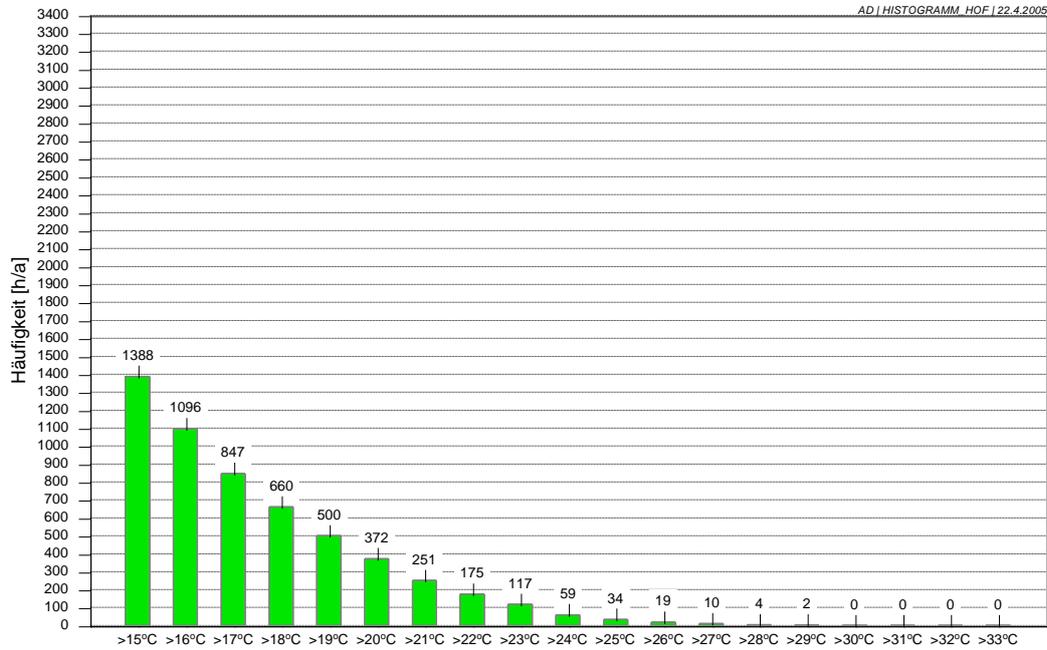
- [1] Wyon, D.P.: The effect of indoor climate on productivity and performance, revised version of a Swedish publication in VVS & Energy, (1986) 3, 59 - 65.
- [2] Wyon, D.P.; J. Andersen, G. R. Lundquist (2001): The effect of moderate heat stress on mental performance, Chapter 16 in Indoor Air Quality Handbook (Edts. J. Spengler, J. M. Samet & J. F. McCarthy), New York, McGraw-Hill, 251 – 267.
- [3] Witterseh, Th. Environmental Perception (2001), SBS Symptoms and the Performance of Office Work and Combined Exposures to Temperature, Noise and Air Pollution, Ph. D. Thesis, ICIEE, Technical University of Denmark.
- [4] DIN 1946-2 (1994-01). Raumluftqualität; Gesundheitliche Anforderungen. Berlin: Beuth
- [5] DIN EN ISO 7730 (2003-10). Ergonomie des Umgebungsklimas Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD- Indexes und der lokalen thermischen Behaglichkeit. Berlin: Beuth
- [6] Esdorn H. & Rietschel H. (2002). Raumklimatik – Grundlagen. Berlin: Springer.
- [7] Frank W. (1975), Berichte aus der Bauforschung – Raumklima und Thermische Behaglichkeit. Berlin-München-Düsseldorf: Ernst & Sohn KG.
- [8] ieg (2005), Institut für Energie und Gebäude. Nürnberg
- [9] Brager G. S., de Dear R. J.(1998). Thermal adaption in the built enviroment: a literature review. Energy and Buildings 27, 83-96
- [10] Glück B.(1994). Zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie, Gesundheitsingenieur. 115. Jg., H. 6. 285-293
- [11] de Dear R. J., Brager G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. Energy and Buildings 34, 549-561
- [12] Boerstra A.C., Raue A.K., Kurvers S.R., van der Linden A.C., Hogeling J.J.N.M, de Dear R. (2003). A new Dutch adaptive thermal comfort guideline. Healthy Buildings, 743-748
- [13] Bischoff W., Bullinger-Naber M. et al. (2003). Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden, Ergebnisse des ProKlimaA-Projekts. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag
- [14] Arbeitsstätten-Richtlinien ASR 6 (2001): Raumtemperaturen, Bundesarbeitsblatt. Nr. 6/7, S. 94 ff.
- [15] DIN 4108-2 (2003-07). Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth
- [16] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin:
Kein Recht auf „Hitzefrei“: Tipps für heiße Tage, Pressemitteilung 104/03 vom 11.08.2003 (http://www.baua.de/news/archiv/pm_03/pm104_03.htm)
- [17] Meteonorm
- [18] DIN 4108-6 (2003-06). Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs. Berlin: Beuth
- [19] Deutscher Wetterdienst (2004). Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY. Offenbach: Selbstverlag des DWD



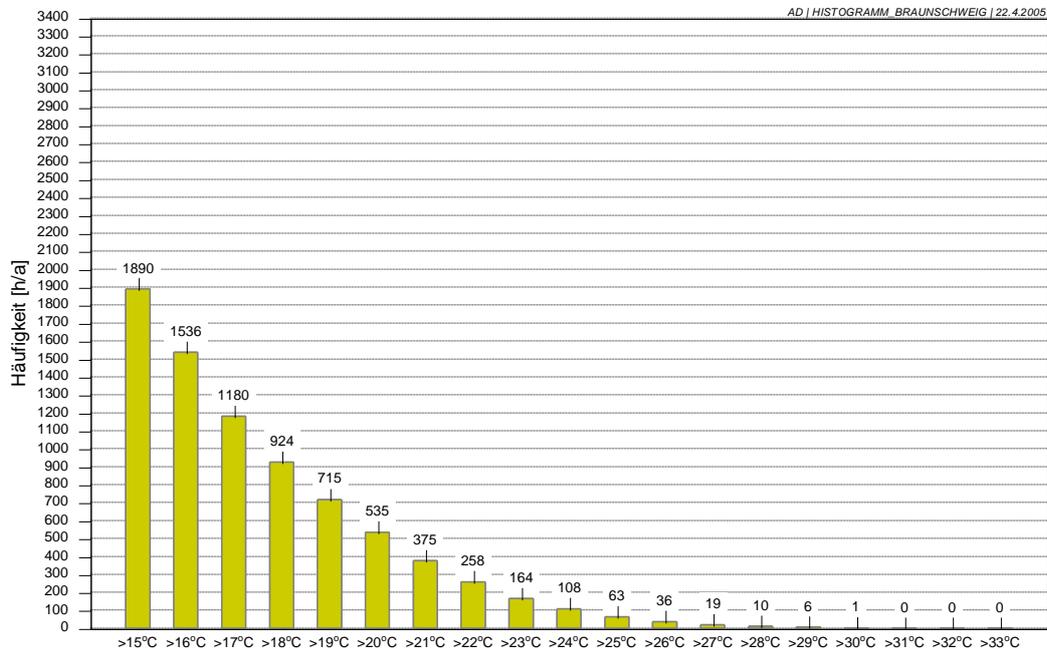
-
- [20] **MEG (2004). Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden. Darmstadt: Institut für Wohnen und Umwelt**
 - [21] **Zimmermann M. (1999). Handbuch der passiven Kühlung. Dübendorf (Schweiz): EMPA**
 - [22] **Wilkins C., Hosni M.H. (2000): Heat Gain From Office Equipment. ASHRAE JOURNAL, June 2000, 33 – 39.**
 - [23] **Arbeitsstätten-Richtlinien ASR 5(1979) Lüftung, Bundesarbeitsblatt. Nr. 10, S. 103 ff.**
 - [24] **ANSI/ ASHRAE Standard 55 (2004). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE: Atlanta, USA**
 - [25] **sia 2021 (2002). Merkblatt 2021: Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz. sia: Zürich, Schweiz**
 - [26] **sia V 382/1 (1992). Technische Anforderungen an lufttechnische Anlagen. sia: Zürich, Schweiz**

A.Anhang – Wetterdaten in PRIMRO - Sommer

Klimaregion A
Histogramm - Außentemperatur



Klimaregion B
Histogramm - Außentemperatur



Klimaregion C
Histogramm - Außentemperatur

