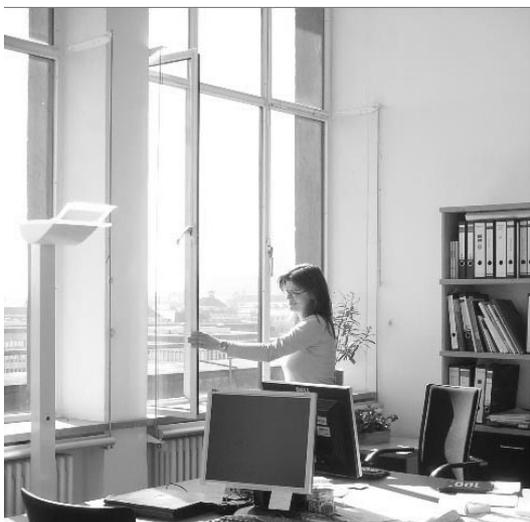


Thermische Behaglichkeit

Unterschiede zwischen frei und mechanisch
belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht

Dissertation

Runa Tabea Hellwig



Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Institut für Entwerfen und Bautechnik
Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik

Thermische Behaglichkeit

Unterschiede zwischen frei und
mechanisch belüfteten Bürogebäuden
aus Nutzersicht

Dipl.-Ing. Runa Tabea Hellwig

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur
der Technischen Universität München zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
3. Priv.-Doz. Dr. med. habil. Dr.-Ing. Wolfgang Bischof,
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Die Dissertation wurde am 10.10.2005 bei der Technischen
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für
Architektur am 24.10.2005 angenommen.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe Raumklimatologie des Universitätsklinikums der Friedrich-Schiller-Universität Jena sowie am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik der Technischen Universität München. Für die Förderung des Projektes „Thermische Behaglichkeit in Bürogebäuden“ an der Friedrich-Schiller-Universität Jena, in dessen Rahmen diese Arbeit entstand, sei der Rud. Otto Meyer-Umwelt-Stiftung Hamburg gedankt.

Mein Dank gilt besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen für die freie Hand bei der Entwicklung des Themas, für die Unterstützung bei der Durchführung der Promotion und für das entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser danke ich für die konstruktiven Anregungen, die zur Abrundung der Arbeit beigetragen haben und die Möglichkeit die Arbeit in seinem Doktorandenseminar zur Diskussion stellen zu können.

Herrn PD Dr. med. habil. Dr.-Ing. Wolfgang Bischof danke ich in besonderem Maße dafür, diese Arbeit an der Universität Jena durchführen zu können, für die spannenden fachlichen Diskussionen, für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und die stete Unterstützung. Mein Dank gilt ebenso Frau Dr. oec. Sabine Brasche von der Universität Jena und Herrn Dipl.-Math. Klaus-Jürgen Heilemann von der FH Erfurt für die wertvolle fachliche Beratung bei der statistischen Auswertung.

Bei Herrn Dr. Volker Herzog von der Universität Jena, Herrn Dr.-Ing. Hansjürgen Gebhardt von der Universität Wuppertal, Herrn Prof. Dr.-Ing. Boris Kruppa von der FH Gießen, Herrn Dipl.-Ing. Ehrenfried Heinz vom IEMB Berlin und Herrn Dr. rer. nat. Erhard Mayer vom IBP Holzkirchen möchte ich mich für die Unterstützung bei der Aufbereitung der Daten und das Bereitstellen zusätzlicher Informationen bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. em. Klaus Fitzner danke ich für die anregenden Diskussionen im Vorfeld der Arbeit.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Nowak bedanke ich mich für das Korrekturlesen und die gute Zusammenarbeit. Den Kollegen an der TU München und der Universität Jena, insbesondere Frau Karin Donko, Frau Ilona Albert, Frau Dipl.-Ing. Hana Meindl, Frau Dipl.-Ing. Simone Steiger, Frau Dipl.-Ing. Martina Thurner, Herrn Dipl.-Ing. Christian Huber, Herrn Dipl.-Ing. András Marghescu, Frau Dr. Zuzana

Giertlová, Frau Beate Ullrich und Herrn Dr.-Ing. Helge Hartwig sei für ihre Unterstützung gedankt.

Meinen Freunden Mirko Conrad und Michael Dirksmüller danke ich für ihre Korrekturbeiträge. Mein Dank gilt auch meinen Eltern, die mir eine vielseitige Bildung und Ausbildung ermöglichten. Nicht zuletzt möchte ich meinem Lebensgefährten Andreas Stockhausen von ganzem Herzen für seine Liebe, sein Verständnis, und seine tatkräftige Hilfe danken.

München, im November 2005

Runa Tabea Hellwig

Inhalt

Kurzfassung / Abstract.....	8
1. Zielsetzung.....	11
1.1 Problemstellung.....	11
1.2 Ziele	14
2. Stand der Forschung	17
2.1 Thermische Behaglichkeit in Büroräumen.....	17
2.1.1 Stellenwert des Raumklimas	17
2.1.2 Leistungsfähigkeit und thermische Einflüsse	18
2.2 Heutige Behaglichkeitsbewertung.....	20
2.2.1 DIN 1946-2	21
2.2.2 Arbeitsstättenverordnung, Arbeitsstättenrichtlinie	22
2.2.3 Untersuchungen von Fanger.....	23
2.2.4 DIN EN ISO 7730	23
2.2.5 CEN CR 1752 und Neufassung der ISO 7730	24
2.2.6 DIN 4108-2 mit Energieeinsparverordnung.....	24
2.2.7 Weitere Bewertungsverfahren	25
2.3 Aktuelle Forschungsergebnisse	26
2.3.1 Befindlichkeitsstörungen am Arbeitsplatz.....	26
2.3.2 Behaglichkeitsgrenzen der Fensterlüftung.....	27
2.3.3 Erweiterungen des PMV-Modells.....	28
2.3.4 ASHRAE-Studie und –Normung.....	29
2.3.5 Niederländische Richtlinie	32
2.3.6 Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit	34
2.4 Vergleich der Methoden zur Behaglichkeitsbewertung.....	36
3. Hypothesen.....	39
4. Material und Methoden.....	40
4.1 Das ProKlimA-Projekt.....	40
4.1.1 Gebäude und Anlagen.....	40
4.1.2 Befragungen und Messungen	41
4.2 Ergänzung der ProKlimA-Daten	42
4.2.1 Witterung zum Zeitpunkt der Untersuchungen	42
4.2.2 Gebäude- und Anlagenkennwerte.....	44
4.2.3 Metabolismus	45
4.2.4 Dämmwert der Bekleidung.....	45
4.3 Kennwerte des thermischen Raumklimas.....	46
4.4 Bewertung des Umgebungsklimas mit Befragungen.....	47
4.5 Statistische Methoden.....	47
4.5.1 Deskriptive Statistik.....	48
4.5.2 Induktive Statistik	49
4.5.3 Chi ² -Anpassungstest.....	50
4.5.4 Vergleich von Werten der zentralen Tendenz.....	50
4.5.5 Zusammenhangsanalyse.....	52
4.5.6 Faktorenanalyse	53
4.5.7 Logistische Regression	55

5.	Ergebnisse zum Untersuchungszeitpunkt 1	61
5.1	Gebäude und Anlagen	61
5.2	Stichprobenbeschreibung.....	62
5.3	Witterung während der Befragungen.....	63
5.4	Beurteilung des Raumklimas	64
5.4.1	Beurteilung des momentanen Raumklimas.....	64
5.4.2	Wunsch nach Einflussnahmemöglichkeit	67
5.4.3	Empfundene Einflussnahmemöglichkeit.....	67
5.4.4	Gesundheitsabträglichkeit des Raumklimas	69
5.4.5	Verbesserungswürdigkeit des Raumklimas.....	69
5.4.6	Raumklimaschwankungen im Tagesverlauf	70
5.4.7	Wichtigkeit von Raumklimaparametern.....	71
5.4.8	Zufriedenheit mit Raumklimaparametern	72
5.5	Beobachteter und vorhergesagter Anteil Unzufriedener	73
5.6	Zusammenhangsanalyse	76
5.7	Faktorenanalyse.....	78
5.8	Logistische Regression.....	80
5.8.1	Bivariate logistische Modelle	81
5.8.2	Modelle thermisches Empfinden	82
5.8.3	Modelle thermische Behaglichkeit.....	86
6.	Ergebnisse zum Untersuchungszeitpunkt 2	90
6.1	Stichprobenbeschreibung.....	90
6.2	Witterung zum Zeitpunkt von Messung und Befragung.....	90
6.3	Einordnung gemessener Raumklimaparameter	91
6.3.1	Aktivitätsgrad und Bekleidungs­dämmung.....	91
6.3.2	Operative Temperatur.....	92
6.3.3	Vorhergesagtes Mittleres Votum nach Fanger	95
6.3.4	Vorhergesagtes Mittleres Votum nach Mayer	96
6.3.5	Relative Luftfeuchte	97
6.3.6	Luftgeschwindigkeit.....	98
6.4	Beurteilung des Raumklimas	98
6.5	Verifizierung der logistischen Modelle	99
6.5.1	Modelle thermisches Empfinden	100
6.5.2	Modelle thermische Behaglichkeit.....	102
6.6	Beobachtete und vorhergesagte optimale Raumtemperaturen	106
6.7	Bandbreite der gemessenen Temperaturen	108
7.	Verifizierung der Hypothesen und Diskussion	110
7.1	Zufriedenheit	110
7.2	Nicht-thermische Einflussgrößen.....	111
7.2.1	Bauliche und anlagentechnische Größen.....	111
7.2.2	Psychosoziale Einflussgrößen	113
7.2.3	Raumklimatische Einflussgrößen bei kalt empfundener Umgebung	113
7.2.4	Raumklimatische Einflussgrößen bei warm empfundener Umgebung	114
7.3	Unterschiede zwischen thermischem Empfinden und thermischer Behaglichkeit ...	116
7.4	Bandbreite der operativen Temperaturen.....	118
7.5	Gültigkeit von Vorhersagemethoden	119

8. Schlussfolgerungen und Ausblick	121
9. Zusammenfassung.....	124
10. Literatur	128
Anhang	135

Kurzfassung / Abstract

Zurzeit führen fehlende Richtlinien für das Raumklima zu Planungsunsicherheit bei frei belüfteten Bürogebäuden in Deutschland. In der vorliegenden Arbeit wird anhand von Befragungs- und Messdaten untersucht, ob es Unterschiede in der thermischen Behaglichkeit von Personen in frei belüfteten und mechanisch belüfteten Gebäuden gibt. Es werden Befragungs- und Messdaten von 14 Bürogebäuden aus dem ProKlimA-Projekt verwendet.

Die Befragungsergebnisse zeigen, dass die Nutzer frei belüfteter Gebäude signifikant zufriedener mit dem thermischen Raumklima sind als die Personen in mechanisch belüfteten Gebäuden. Einige nicht-thermische Größen beeinflussen die thermische Behaglichkeit. Die Wirkung der nicht-thermischen Einflussgrößen ist von der Belüftungsart und der empfundenen Umgebungstemperatur (sehr warm bzw. kalt) abhängig.

In der Literatur wird erwähnt, dass Personen in frei belüfteten Gebäuden eine größere Bandbreite der Raumtemperatur akzeptieren als Personen in mechanisch belüfteten Gebäuden. Die in dieser Arbeit gefundenen Bandbreiten der Raumtemperatur sind unabhängig von der Art der Belüftung.

Die relevante Literatur nennt vier bedeutende Methoden zur Bewertung und Vorhersage der thermischen Behaglichkeit. Auf der einen Seite wird das PMV-Modell von Fanger sowie eine Modifizierung dieses Modells von Mayer betrachtet. Auf der anderen Seite stehen zwei Ansätze – eine niederländische Richtlinie und ein Ansatz aus einer ASHRAE Studie. Im Gegensatz zum PMV-Modell wird die optimale Raumtemperatur bei diesen zwei Ansätzen in Abhängigkeit von einer mittleren Außentemperatur bestimmt. Die vier Methoden werden auf ihre Eignung für die Bewertung thermischer Behaglichkeit in frei und mechanisch belüfteten Gebäuden untersucht. Der Ansatz nach Mayer erzielt für Personen in mechanisch belüfteten Gebäuden die beste Übereinstimmung mit der Beobachtung. Für frei belüftete Gebäude ist dies der ASHRAE-Ansatz.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl für freie als auch für mechanische Lüftung neue, bisher in Deutschland und Europa nicht genormte Modelle zur Planung von Behaglichkeit in Räumen erforderlich sind.

Thermal comfort - Natural ventilation versus air-conditioning in office buildings from the occupant's point of view

At present a lack of guidelines for the design of thermal comfort in naturally ventilated office buildings leads to uncertainty when planning such buildings in Germany. The present work was carried out in order to identify differences in the perception of thermal comfort of office workers in naturally ventilated and air-conditioned buildings. It is based on both subjective data from interviews as well as on objective data from physical measurements. The analysis includes data collected in 14 German office buildings from the ProKlimA-Survey.

The analysis of the interviews shows that occupants in naturally ventilated office buildings are significantly more often satisfied with their thermal environment than occupants in air-conditioned buildings. Several non-thermal parameters influence thermal comfort. The impact of the non-thermal variables depends on the type of ventilation and the perception of the indoor environment temperature (hot or cool).

In the literature it is mentioned that occupants in naturally ventilated offices accept a wider range of indoor temperatures than occupants in air-conditioned offices. The bandwidths of temperature found in the present work are the same for both types of ventilation.

Relevant literature comprises four major approaches. On the one hand there is the PMV-Model by Fanger and its modification by Mayer. On the other hand there are two adaptive approaches: a Dutch guideline and the ASHRAE approach. Both adaptive approaches determine the indoor comfort temperature dependent on a mean outdoor temperature. The suitability of the four approaches for assessing and predicting thermal comfort in naturally ventilated and air-conditioned offices was investigated. The closest agreement between predictions and interviews for air-conditioned offices is achieved by Mayer's modification of the PMV-Model. For naturally ventilated offices the ASHRAE approach shows the best match.

So far Fanger's PMV-Model is the standardized method to assess thermal comfort in Germany and Europe. The results demonstrate that new guidelines for assessing and planning of thermal comfort in office buildings are required for both natural ventilation and air-conditioning.

1. Zielsetzung

1.1 Problemstellung

Das Wohlbefinden des Menschen in seinem Arbeitsumfeld und seine Produktivität werden durch eine große Anzahl von Faktoren beeinflusst. Einer dieser Faktoren ist das Raumklima, das sich wiederum aus thermischem, akustischem, visuellem und olfaktorischem Raumklima zusammensetzt. Das thermische Raumklima umfasst diejenigen Parameter, die den Wärmehaushalt des Menschen beeinflussen wie Temperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit. Neben der Bauausführung und Nutzung des Gebäudes sowie der Beheizung und einer eventuell vorhandenen Kühlung bestimmt die Art der Belüftung das thermische Raumklima wesentlich.

Lüftungssysteme von Gebäuden werden grundsätzlich in Systeme mit freier (natürlicher) und erzwungener (mechanischer) Lüftung unterschieden. Bei freier Lüftung entsteht der Luftaustausch durch Druckdifferenzen infolge von Temperaturdifferenzen oder Windeinflüssen. Bei erzwungener Lüftung wird der Luftstrom durch mechanische Antriebe erzeugt.

Mechanische Lüftung wurde anfangs vor allem in Versammlungsräumen eingebaut. In den 50er Jahren wurde begonnen, mechanische Lüftungssysteme auch in Bürogebäuden vorzusehen. Mechanische Lüftung wird dort eingesetzt, wo es gilt, hohe Verunreinigungslasten oder hohe Wärmelasten abzuführen – verursacht beispielsweise durch eine große Personenzahl, große Fensterflächen oder viele technische Geräte. Mechanische Lüftung kommt auch bei tiefen Räumen (z.B. Großraumbüros) zum Einsatz, die mit freier Lüftung nicht mehr ausreichend belüftet werden können.

Bereits zu einem sehr frühen Planungszeitpunkt werden mit dem architektonischen Entwurf Festlegungen getroffen, die unmittelbare Auswirkungen auf das Lüftungskonzept des Gebäudes haben. Dabei gibt es eine Reihe von Argumenten, die gegen freie Lüftungskonzepte vorgebracht werden.

Bürogebäude mit offenen Grundrissen, großen Räumen oder die Forderung nach Flexibilität der Grundrissaufteilung lassen sich mit freier Lüftung ohne spezifisches Wissen um die Funktionsweise freier Lüftung nur schwer realisieren. Architekten beklagen oft eine eingeschränkte Gestaltungsfreiheit. Hohe Verglasungsanteile sowie der Verzicht auf

einen effizienten Sonnenschutz lassen sich mit freier Lüftung nur schwer in Einklang bringen. (Mit Klimatisierung können solche ästhetischen Probleme zwar gelöst werden, zu hinterfragen bleiben jedoch die damit verbundene geringe Nutzungsqualität und der Energieverbrauch). Gebäude an stark befahrenen Straßen sind sicherlich weniger geeignet für freie Lüftungskonzepte, da die Produktivität der unter starkem Lärm Arbeitenden deutlich herabgesetzt ist.

Mit freier Lüftung sind die geltenden Behaglichkeitsgrenzen des thermischen Raumklimas, die für mechanische Lüftung entwickelt wurden und heute auch für freie Lüftung angewendet werden, nicht immer einzuhalten. Vor allem im Sommer ist z.B. mit Überschreitungen der in den Arbeitsstättenrichtlinien geforderten 26 °C zu rechnen. Es gibt dabei keine speziellen Richtlinien für die Behaglichkeitsgrenzen bei freier Lüftung. Das Fehlen eines Regelwerks liegt darin begründet, dass freie Lüftung früher nicht hinterfragt wurde. Man wusste aus Erfahrung, dass sie funktioniert. Für Investoren birgt die Situation, „Garantien“ für ein thermisches Raumklima innerhalb der üblichen Grenzwerte nicht geben zu können, ein Vermarktungsrisiko bzw. das Risiko von Mietminderungsansprüchen zukünftiger Nutzer [Hausladen et al. 2004]. In der Regel werden daher raumluftechnische Anlagen mit Klimatisierungsfunktion vorgesehen.

Mit freier Lüftung lässt sich im Gegensatz zu mechanischer Lüftung keine Wärmerückgewinnung realisieren. In Abhängigkeit vom Gebäude- und Anlagenkonzept sowie von der Nutzung können mit Wärmerückgewinnung unterschiedlich große Energieeinsparungen erzielt werden.

In einer Befragung von [Aggerholm 1994] erwarten die Architekten, Ingenieure, Investoren und Entscheidungsträger zwar ein günstigeres Verhalten von Gebäuden mit raumluftechnischen Anlagen bezüglich des Raumklimas, gleichzeitig jedoch wird die Nutzerzufriedenheit für beide Lüftungsarten vergleichbar eingeschätzt. Dieser Widerspruch scheint darin begründet zu sein, dass die Planenden und Entscheidungsträger ihr Wissen um die Planung freier Lüftung geringer einschätzen und die Richtlinien und vorhandenen Produkte für mechanische Lüftung besser bewertet werden. Damit scheint die Auslegung von raumluftechnischen Anlagen für die Planenden und die Entscheidungsträger einfacher zu sein. Trotzdem erwarten sie den zunehmenden Einsatz freier Lüftung in Bürogebäuden.

Es gibt aber auch eine Reihe von Argumenten, die für freie Lüftungskonzepte sprechen. Bürogebäude mit freier Lüftung haben eine hohe Nutzerakzeptanz. Untersuchungen zeigen, dass der Anteil der befindlichkeitsgestörten Personen (Sick Building Syndrom) in frei belüfteten Bürogebäuden im Mittel 15 Prozentpunkte geringer ist als in mechanisch belüfteten Gebäuden [Bischof et al. 2003]. Neue Untersuchungen zeigen sogar, dass in frei belüfteten Gebäuden ein breiteres Spektrum des thermischen Raumklimas akzeptiert wird als in Gebäuden mit raumluftechnischen Anlagen [de Dear et al. 1997].

Die internen Wärmelasten in Bürogebäuden sind vor allem durch deutlich geringere installierte Leistungen für die Beleuchtung von 65-100 W/m² im Jahr 1960 auf 25-30 W/m² im Jahr 2000 gesunken [Fitzner 2003]. Aus [DIN V 18599-4: 2005] ergeben sich in Abhängigkeit von Beleuchtungsart, verwendetem Vorschaltgerät und Raumart Werte für die spezifische Beleuchtungsleistung von 10 bis 55 W/m². Die thermischen Lasten durch Solareinstrahlung können durch heutige Entwurfstechniken und Materialien bei gleichzeitig ausreichendem Tageslichtangebot wirksam gering gehalten werden. Damit entfällt ein Grund für mechanische Lüftung (mit Kühlfunktion): das Abführen von thermischen Lasten.

Der Verzicht auf mechanische Lüftung eröffnet große Einsparpotentiale vor allem beim Stromverbrauch von Bürogebäuden. Bürogebäude mit mechanischer Lüftung und (Teil-)Klimatisierung haben oft einen hohen Primärenergieverbrauch von 200 bis 1000 kWh/(m²a). Davon werden 45 bis 550 kWh/(m²a) in Form von Strom für das Betreiben von raumluftechnischen Anlagen und zur Kühlung benötigt [Energierreferat Frankfurt 2002].

Mit freier Lüftung gehen auch Kostenvorteile einher. Investitionskosten können eingespart werden, da in der Regel geringere Geschosshöhen möglich sind [Hartwig et al. 2003]. Des Weiteren können der Raum für die Lüftungszentrale und der Aufwand für die Wartung der raumluftechnischen Anlagen eingespart werden. Der verringerte Energieverbrauch führt ebenfalls zu verringerten Betriebskosten [Wouters et al. 1999].

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Obwohl eine Reihe von Gründen für die freie Lüftung spricht und die allgemeine Akzeptanz hoch ist, werden aufgrund von fehlen-

den Planungsrichtlinien und bestehender Rechtsunsicherheit Bürogebäude weiterhin in der Regel mit raumluftechnischen Anlagen ausgestattet. Neue Untersuchungen zeigen, dass für die Bewertung der Behaglichkeit bei freier Lüftung andere Behaglichkeitsgrenzen gelten könnten als die bisher angewandten.

1.2 Ziele

Ziel der Arbeit ist es, herauszufinden, ob es Unterschiede in der thermischen Behaglichkeit von Personen in frei belüfteten Gebäuden und Personen in Gebäuden mit raumluftechnischen Anlagen gibt und ob jeweils andere Einflussgrößen dieses Behaglichkeitsempfinden bewirken.

Es ist zu klären, ob die freie Lüftung in Bürogebäuden aus Sicht der Nutzer thermisch behaglich ist, obwohl bisherige Methoden zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit für einige auftretende Raumklimazustände Unbehaglichkeit und folglich Unzufriedenheit vorhersagen.

In der vorliegenden Arbeit werden das allgemeine thermische Empfinden und die allgemeine thermische Behaglichkeit untersucht. Aspekte von lokaler thermischer Unbehaglichkeit wie Zugerscheinungen oder Strahlungstemperaturasymmetrie sind nicht Gegenstand der Arbeit. Gleichwohl werden andere Aspekte des Raumklimas als mögliche Einflussfaktoren auf die beiden Zielgrößen thermisches Empfinden und thermische Behaglichkeit berücksichtigt. Zur Erleichterung des Verständnisses sollen im Folgenden zwei Begriffe – thermisches Empfinden und thermische Behaglichkeit – erläutert werden.

Unter dem thermischen Empfinden wird die Wahrnehmung eines thermischen Zustandes als warm oder kalt verstanden. Das thermische Empfinden sollte zwar als personenbezogen geringfügig verschieden, trotzdem aber als eine Art objektive Messlatte zur Einstufung eines thermischen Zustandes angesehen werden.

Diese Wahrnehmung einer Person sagt aber noch nichts darüber aus, ob die Person diesen thermischen Zustand positiv oder negativ bewertet, oder ob die Person mit diesem Zustand zufrieden oder unzufrieden ist: Eine Aussage zur thermischen Behaglichkeit ist die subjektive Bewertung eines gefühlten thermischen Zustandes. Die thermische Behaglichkeit (oder Unbehaglichkeit) drückt aus, ob eine

Person einen thermischen Zustand behaglich (positiv) oder unbehaglich (negativ) einstuft.

Der ASHRAE-Standard 55 definiert thermische Behaglichkeit wie folgt: „Thermal comfort is that condition of mind, which expresses satisfaction with the thermal environment.“ Thermische Behaglichkeit ist der Zustand, in dem Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung herrscht. [ASHRAE, 2004].

Die Untersuchungen werden an Daten aus dem ProKlimA-Projekt durchgeführt. In dem BMBF-geförderten ProKlimA-Projekt [Bischof et al. 2003] wurden vor dem Hintergrund des Sick-Building-Syndromes (SBS) umfangreiche Daten zu zwei verschiedenen Untersuchungszeitpunkten erarbeitet. Diese Daten enthalten eine Vielzahl von objektiven Messdaten und subjektiven Bewertungen des thermischen Raumklimas. Die für das SBS typische sensorische Symptomatik zeigte sich in der ProKlimA-Auswertung von den thermischen Parametern unbeeinflusst. Deshalb verzichtete die ProKlimA-Projektgruppe auf die detaillierte Untersuchung der thermischen Parameter. Die in der ProKlimA-Studie erhobenen umfangreichen objektiven und subjektiven Daten werden nun im Hinblick auf das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit ausgewertet.

Das Wärmebilanzmodell nach Fanger [Fanger 1982] bezieht in die Bewertung die Größen Bekleidungsgrad, Aktivitätsgrad (Schwere der Arbeit), Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit ein. Wenn es Unterschiede zwischen der Behaglichkeit bei freier Lüftung und der Behaglichkeit bei mechanischer Lüftung gibt, so muss gefragt werden, welche nicht-thermischen Größen neben den oben genannten die thermische Behaglichkeit zusätzlich beeinflussen.

Im Ergebnis soll beantwortet werden, ob für die freie Lüftung andere Bewertungsverfahren erforderlich sind und was die Basis für neue Bewertungsverfahren sein kann.

2. Stand der Forschung

Im Folgenden wird der Stand der Forschung und Entwicklung aufgezeigt. Ausschnitte davon wurden bereits in [Hellwig 2004; Hellwig 2005] veröffentlicht.

2.1 Thermische Behaglichkeit in Büroräumen

Eine der wichtigsten Aufgaben von Bürogebäuden ist es, eine Umgebung für die darin arbeitenden Menschen bereitzustellen, die behaglich ist und weder Gesundheit noch Leistungsfähigkeit beeinträchtigt. Wohlbefinden, Arbeitszufriedenheit und Produktivität dieser Menschen werden durch eine Vielzahl von Größen beeinflusst (Bild 1). Viele der dargestellten Einflussgruppen können weder vom Architekten noch vom Ingenieur beeinflusst werden. Das Gebäude, der Raum, der Arbeitsplatz und das Raumklima aber können mitgestaltet werden. Daher ist es wichtig zu wissen, welchen Einfluss das Raumklima gegenüber anderen Faktoren überhaupt hat.

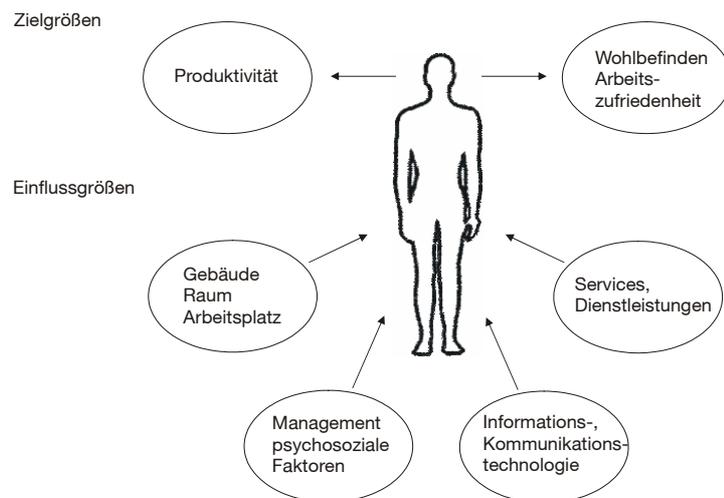


Bild 1 Die Zielgrößen Wohlbefinden und Arbeitszufriedenheit des Menschen und seine Produktivität werden von einer Reihe von Einflussgrößen bestimmt [nach Bauer 2003].

2.1.1 Stellenwert des Raumklimas

In einer Studie des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation zum Thema Office Performance wurden der Themenkreis Produktivität, Effektivität und Effizienz im Büroumfeld untersucht, Wirkungszusammenhänge analysiert sowie Wertigkeitsmaßstäbe unterschiedlicher Einflussgrößen ermittelt. Als zentrale Größe wurde der Office-Performance-Index gebildet, der sich aus der Bewertung der Arbeitsvorgänge und der Qualität der Arbeit im Bereich der Befragten ergab. Insgesamt konnten folgende Themenfelder identifiziert werden:

- Positive Emotionen / Negative Emotionen
- Informierte Nutzer / Uninformierte Nutzer
- Selbstbestimmte Nutzer / Fremdbestimmte Nutzer
- Gute Raumqualität / Schlechte Raumqualität
- Intensive Informations- und Kommunikations-Nutzer /
Verhaltene I. u. K.-Nutzer

Der Einfluss des Themenfeldes Emotionen (Arbeitsmotivation, Work-Life-Balance, Teamstimmung, Anerkennung, Identifikation) hat das größte Beeinflussungspotential. Demgegenüber steht die Raumqualität an vierter Stelle [Bauer 2003]. Kritisch anzumerken ist, dass die Studie nicht erwähnt, ob Einflüsse von Lärm oder der Raumakustik berücksichtigt worden sind.

Eine weitere Studie wurde mit dem Ziel durchgeführt, weiche Einflussfaktoren auf das subjektive Wohlbefinden im direkten Arbeitsumfeld herauszufinden und ihre Einflussstärke zu bewerten. Der dabei entwickelte Büroattraktivitätsindex setzt sich aus mehreren Einflussgrößen zusammen. In Bild 2 sind die signifikant wirksamen Größen dargestellt. Die wichtige Erkenntnis ist, dass die Ausstattung des Raumes, die verwendeten Materialien, das Ambiente, die Ergonomie und die Raumproportionen die Attraktivität eines Büros neben dem Raumklima sehr stark beeinflussen.

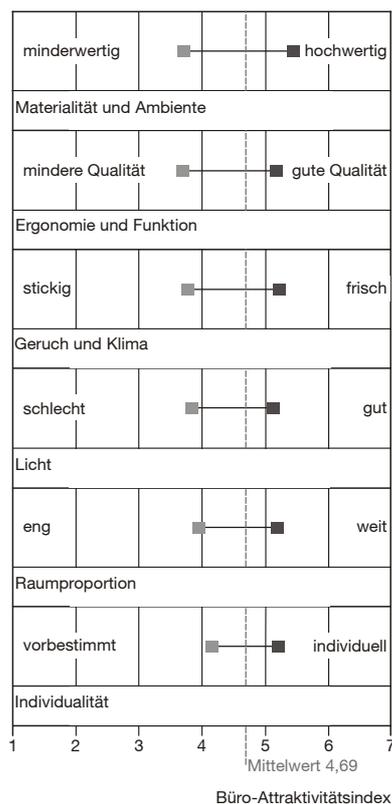


Bild 2 Abweichung des Büro-Attraktivitätsindex vom Mittelwert (MW = 4,69; SD = 0,97) in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren; angeben auf einer Skala von 1 (sehr geringe Attraktivität) bis 7 (sehr hohe Attraktivität) [Bauer 2003].

2.1.2 Leistungsfähigkeit und thermische Einflüsse

Das Bewusstsein hohe Leistungsfähigkeit bei der Arbeit zu gewährleisten, ist in den letzten Jahren stetig gewachsen. Büroräume sollen optimale Voraussetzung für die Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter bieten.

Ein immer wieder angeführtes Argument für strikte Temperaturgrenzen sind die Untersuchungen von Wyon [Wyon 1986], der Abhängigkeiten der Leistungsfähigkeit von der Raumtemperatur aufstellte. Diese Arbeit ist eine der wenigen, die die Leistungsminderung quantifiziert. Danach ist bei sitzender Tätigkeit, leichter Kleidung und einer Raumtemperatur von 26 °C mit einer Leistungsminderung von 13 Prozentpunkten gegenüber 23 °C zu rechnen. In [Wyon et al. 1981] kann aber auch nachgelesen werden, dass die Gedächtnisleistung bei einem Temperaturanstieg von 23 °C auf 26 °C stark zunimmt, um dann bei weiter steigender Temperatur wieder abzusinken. Die Untersu-

chungen fanden in klimatisierten Räumen statt. Dort konnten die Nutzer keinen Einfluss auf das Raumklima nehmen und auch ihre Kleidung nicht verändern. Die Untersuchungen können daher für klimatisierte Räume angewandt werden. Es kann jedoch bezweifelt werden, dass die Ergebnisse auf frei belüftete Räume ohne weiteres übertragbar sind.

Nach [Schrader et al. 1983] verschlechterte sich die Aufmerksamkeit von Schulkindern in Klimakammer-Versuchen bei Temperaturen über 27 °C signifikant. Die feinmotorischen Fähigkeiten verbesserten sich jedoch bei höheren Temperaturen.

In verschiedenen Quellen z.B. [Fitzner 2003, CCI.Print 2004] wird auch auf Angaben in [Hettinger et al. 1976] verwiesen, die aber vor dem Hintergrund von Industriearbeitsplätzen zu bewerten sind. [Hettinger et al. 1976] geben die Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Normal-Effektivtemperatur nach Yaglou an. Die Normal-Effektivtemperatur ist eine Klimasummengröße aus Trocken-Thermometer- und Feucht-Thermometertemperatur und der Luftgeschwindigkeit. Die Effektivtemperatur hat sich nach Hettinger vor allem im Bergbau bewährt. Bei 26 °C Normal-Effektivtemperatur beträgt die Leistungsfähigkeit nur noch 90%. Das entspricht bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,2 m/s und einer relativen Luftfeuchte von 55% einer Trockentemperatur von 30 °C. Dieser Wert wird auch als Grenze für eine leichte Dauerarbeit angesehen [Hettinger 1970]. 50% der Leistungsfähigkeit werden bei 34 °C Normal-Effektivtemperatur (Luftgeschwindigkeit: 0,2 m/s, relative Luftfeuchte: 80%, Trockentemperatur von 35 °C) erreicht.

In dem Forschungsprojekt SCATs [Nicol, McCartney 2000] wurden subjektive und objektive Daten zu Innenraumbedingungen von 25 Gebäuden in verschiedenen Ländern Europas erhoben. Die Daten wurden auch bezüglich der selbstbewerteten Produktivität der befragten Personen ausgewertet. Es wurde im Gegensatz zu den Untersuchungen von Wyon gezeigt, dass zwischen der gemessenen Lufttemperatur und der selbstbewerteten Produktivität kein Zusammenhang besteht [McCartney, Humphreys 2002]. Dagegen konnte ein Zusammenhang zwischen selbstbewerteter Produktivität und dem thermischen Präferenzvotum hergestellt werden. Die thermische Präferenz drückt aus, ob eine Person es wärmer oder kälter wünscht oder keine Änderung gewünscht wird. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen dem Bewerten einer Temperatur – also

der thermischen Behaglichkeit – und der Produktivität besteht, nicht jedoch zur Temperatur selbst.

In [Leaman, Bordass 1999] wird gezeigt, dass die selbstbewertete Produktivität signifikant mit der empfundenen Einflussnahmemöglichkeit der Personen auf Heizung, Kühlung, Lüftung und Lärm verknüpft ist. Personen, die ihren Einfluss auf das Raumklima hoch einschätzen, haben eine höhere Produktivität als Personen mit geringer empfundener Einflussmöglichkeit. Die Produktivität ist am stärksten assoziiert mit der Einflussnahmemöglichkeit auf Lärm, Beheizung, Kühlung und Lüftung. Allerdings sind die Zusammenhänge mit der Produktivität insgesamt nicht sehr stark. Die Einflussmöglichkeit auf die Beleuchtung zeigte keinen signifikanten Zusammenhang mit der empfundenen Produktivität. Vor dem Hintergrund der Gebäudetiefe wird in [Leaman, Bordass 1999] auf signifikante Mittelwertsunterschiede in der selbstbewerteten Produktivität von Personen in frei belüfteten Gebäuden (Gebäudetiefe geringer als 15 m) und in klimatisierten Gebäuden (nicht immer aber oft tiefer als 15 m) hingewiesen. Dabei wiesen die frei belüfteten Gebäude den höheren Wert der Produktivität auf.

Leaman und Bordass [Leaman, Bordass 1999] zeigen auch, dass die Bereitschaft des Facility Managements auf Beschwerden der Gebäudenutzer bezüglich unbehaglicher Zustände schnell und angemessen zu reagieren, signifikant positiv mit der Produktivität korreliert ist.

Aus den oben genannten Untersuchungen geht hervor, dass nicht nur das thermische Raumklima die Produktivität am Arbeitsplatz beeinflusst. Vielmehr können weitere Faktoren wie Arbeitsmotivation, Stimmung am Arbeitsplatz, Ausstattung des Büroraumes mindestens ebenso wichtig sein.

2.2 Heutige Behaglichkeitsbewertung

Im Folgenden werden die in Deutschland angewendeten und zur Verfügung stehenden Methoden zur Bewertung des thermischen Raumklimas vorgestellt. Auf relevante internationale Verfahren wird in Abschnitt 2.3 aktuelle Forschungsergebnisse eingegangen.

Die in Deutschland angewendeten bzw. zur Verfügung stehenden Bewertungsmethoden sind vor dem Hintergrund der Auslegung von raumluftechnischen Anlagen geschaffen worden. Der Gültigkeitsbereich dieser in Normen festge-

schriebenen Methoden wird angegeben mit:

- DIN 1946-2: Raumluftechnische Anlagen in Arbeits- und Versammlungsräumen [DIN 1946-2: 1994], (seit Mai 2005 ersetzt durch [DIN EN 13779: 2005])
- DIN EN ISO 7730: anwendbar bei der Schaffung neuer Umgebungsklimata und der Bewertung vorhandener; gilt für konstante Umgebungsbedingungen aber auch bei geringen Schwankungen einer oder mehrerer Parameter des Raumklimas [DIN EN ISO 7730: 1995; ISO 7730: 2003]
- CEN-Bericht CR 1752: Anforderungen für die Innenraumqualität und die Verfahren zur Darstellung der Innenraumqualität hinsichtlich Auslegung, Inbetriebnahme, Betrieb und Regelung der raumluftechnischen Anlagen [CEN 1998].

Zur Bewertung des thermischen Raumklimas bei freier Lüftung gibt es keine eigenständigen Normen.

2.2.1 DIN 1946-2

Nach DIN 1946-2 ist für den Menschen thermische Behaglichkeit gegeben, wenn er mit Temperatur, Feuchte und Luftbewegung in seiner Umgebung zufrieden ist und weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Raumluf wünscht [DIN 1946-2: 1994].

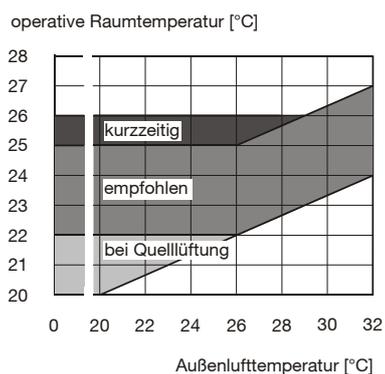


Bild 3 Zulässige Temperaturbereiche nach [DIN 1946-2: 1994] für die Auslegung von raumluftechnischen Anlagen.

DIN 1946-2 galt für raumluftechnische Anlagen, wurde jedoch in Ermangelung anderer Richtwerte auch für frei belüftete Gebäuden herangezogen. Der geforderte Bereich der operativen Raumtemperatur wird immer auf die momentane Außenlufttemperatur bezogen. Relativ schnelle Änderungen der Außenlufttemperatur müssen also von der raumluftechnischen Anlage oder zusätzlichen Kühleinrichtungen abgedeckt werden. Um hier die zu installierenden Leistungen von Geräten zu begrenzen, werden kurzzeitige Überschreitungen zugelassen (Bild 3).

In der Vergangenheit gefällte Urteile zu den maximal zulässigen Temperaturen am Arbeitsplatz beziehen sich auf DIN 1946-2, obwohl es sich in der Mehrheit der Fälle um frei belüftete Arbeitsräume handelte. Die Urteile erkennen in ihren Begründungen zwar an, dass der Geltungsbereich der DIN 1946-2 sich eigentlich nur auf Räume mit raumluftechnischen Anlagen erstreckt. Trotzdem werden die Forderungen der DIN 1946-2 auch als Bewertungsgrundlage für

Räume mit freier Lüftung herangezogen. Dies erfolgt mit der Begründung, dass keine vergleichbaren Regelungen für frei belüftete Räume vorliegen [OLG Köln 1991; Hausladen et al. 2004].

Im Mai 2005 wurde die DIN 1946-2 ersetzt durch [DIN EN 13779: 2005]. Dort wird für die Auslegung der thermischen Behaglichkeit in Nicht-Wohngebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen auf die [DIN EN ISO 7730: 1995] verwiesen (siehe Abschnitte 2.2.4 und 2.2.5).

2.2.2 Arbeitsstättenverordnung, Arbeitsstättenrichtlinie

Die Arbeitsstättenverordnung [ArbStättV 2004] gilt für Arbeitsstätten in Betrieben, in denen das Arbeitsschutzgesetz Anwendung findet. Dort wird festgelegt, dass in Arbeitsstätten der Gesundheit der Beschäftigten zuträgliche Raumtemperaturen herrschen müssen und eine Abschirmung gegen übermäßige Sonneneinstrahlung ermöglicht sein muss. Die Arbeitsstättenverordnung verweist auf die Arbeitsstättenrichtlinien in der unter anderem auch Anforderungen an die Temperaturen [ASR 6 2001] spezifiziert sind. Die Lufttemperatur in Arbeitsräumen soll für eine sitzende leichte Tätigkeit 20 °C nicht unterschreiten und 26 °C nicht überschreiten. Bei darüber liegender Außentemperatur darf in Ausnahmefällen die Lufttemperatur höher sein. Nach Ansicht der Gerichte gelten die 26 °C nicht als absolut zu verstehende Grenze. Bei höheren Außentemperaturen werden in Anlehnung an verschiedene Ausgaben der DIN 1946-2 höhere Lufttemperaturen zugelassen [Hausladen et al. 2004].

2.2.3 Untersuchungen von Fanger

deutsch		english
heiß	+3	hot
warm	+2	warm
leicht warm	+1	slightly warm
neutral	0	neutral
leicht kühl	-1	slightly cool
kühl	-2	cool
kalt	-3	cold

Bild 4 Bewertungsskala des Vorhergesagten mittleren Votums (PMV) nach [ISO 7730: 2003].

Fanger entwickelte ein Modell für die Vorhersage der thermischen Behaglichkeit, mit dem in Abhängigkeit von der Dämmung der Bekleidung, dem Aktivitätsgrad, der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur, der Luftfeuchte sowie der Luftgeschwindigkeit die Einschätzung des thermischen Raumklimas auf einer 7-stufigen Skala (Bild 4) vorhergesagt werden kann. Dieser Wert wird das Vorhergesagte mittlere Votum (Predicted Mean Vote, PMV) genannt [Fanger 1982]. Um auch vorhersagen zu können, wie hoch der Anteil der mit dem Raumklima Unzufriedenen sein wird, entwickelte Fanger den Zusammenhang zwischen dem PMV und dem vorhergesagten Prozentsatz Unzufriedener (Predicted Percentage Dissatisfied PPD) (Bild 8).

Allerdings fragte Fanger die Personen bei seinen Versuchen nicht nach ihrer Zufriedenheit mit dem thermischen Raumklima, sondern er legte fest, dass Personen die PMV-Wert von -3, -2, +2 oder +3 berichten, unzufrieden sind. Gleichzeitig legte Fanger fest: wenn sich der Mensch im thermischen Gleichgewicht zwischen Körper und Umgebung befindet, ist er in einem behaglichen Zustand. Dies entspricht auf der PMV-Skala dem Wert Null = neutral und ist mit einem erwarteten Anteil Unzufriedener von 5 % verbunden.

Die Untersuchungen, auf denen Fangers Modell beruht, wurden in Klimakammern durchgeführt. Die Probanden hatten keinen Einfluss auf das Raumklima; es war ihnen vorgegeben. Sie konnten auch ihre Kleidung nicht beeinflussen.

Fanger hat mit seiner Festlegung des Zusammenhangs vom PMV und PPD die beiden Größen thermisches Empfinden und thermische Behaglichkeit (siehe auch Abschnitt 1.2) gleich gesetzt. Fanger erwähnt außerdem in seiner Arbeit, dass das vorhergesagte mittlere Votum PMV und der Zusammenhang zwischen PMV und PPD unabhängig von der Klimazone gilt. Außerdem geht er davon aus, dass es keine saisonalen Unterschiede bei den Behaglichkeitsgrenzen gibt [Fanger 1982].

2.2.4 DIN EN ISO 7730

Die DIN EN ISO 7730 [DIN EN ISO 7730: 1995] beruht auf dem PMV-Modell nach Fanger (Abschnitt 2.2.3). Der Ansatz gilt für stationäre Raumzustände, die in der Regel nur mit

raumluftechnischen Anlagen erzeugt werden können. Die Norm empfiehlt einen Bereich des Vorhergesagten mittleren Votums von $-0,5 < PMV < +0,5$ einzuhalten. Das entspricht einem Vorhergesagten Anteil Unzufriedener von 10%. Tabelle 1 zeigt die behaglichen Temperaturbereiche für den Sommer (Kühlperiode, Bekleidungsdämmung 0,5 clo) und für den Winter (Heizperiode, Bekleidungsdämmung 1,0 clo).

2.2.5 CEN CR 1752 und Neufassung der ISO 7730

Der CEN CR 1752 [CEN 1998] legt Kategorien der Innenraumqualität fest. Bei Räumen der Kategorie A sind die einzuhaltenden Grenzen sehr eng (hohes Erwartungsniveau, weniger als 6% Unzufriedene), bei Gebäuden der Kategorie C sind die Grenzen weiter gefasst (weniger als 15 % Unzufriedene). Im Übrigen werden in dem Bericht Anforderungen hinsichtlich der Auslegung und des Betriebes von raumluftechnischen Anlagen aufgestellt. Tabelle 1 zeigt die Anforderungen an die operative Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Raumkategorie.

Die geplante Neufassung der ISO 7730 [ISO 7730: 2003] übernimmt den Ansatz aus [CEN 1998]. Zusätzlich wird in einem Abschnitt darauf eingegangen, dass es bestimmte Adaptationsprozesse geben kann, wie beispielsweise die Anpassung der Kleidung, Veränderung der Körperhaltung oder eine verringerte Aktivität. Dies kann in eine Akzeptanz von höheren Temperaturen münden. Daher kann für die Planung frei belüfteter Gebäude die Kategorie C aus Tabelle 1 verwendet werden.

2.2.6 DIN 4108-2 mit Energieeinsparverordnung

Mit Hilfe der DIN 4108-2 [DIN 4108-2: 2003], auf welche die Energieeinsparverordnung [EnEV 2004] verweist, werden vor dem Hintergrund der Energieeinsparung die baulichen Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz vorgegeben. Dies erfolgt mit dem Ziel, moderate Innentemperaturen allein durch bauliche Maßnahmen zu erreichen, wenn das Gebäude keine besonders hohen internen Lasten aufweist.

Die Norm unterscheidet mit den dort festgelegten drei Klimaregionen auch drei Grenzwerte der Innentemperaturen (Tabelle 2). Diese Grenztemperaturen werden danach für übliche Gebäuden an nicht mehr als 10 % der Aufenthalts-

	°C Sommer (Kühlperiode)	°C Winter (Heizperiode)
CEN CR 1752		
Kategorie A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0
Kategorie B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0
Kategorie C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0
DIN EN ISO 7730	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0

Tabelle 1 Anforderungen an die operative Raumtemperatur bei einer sitzenden Tätigkeit (1,2 met) für die nach CEN CR 1752 [CEN 1998] festgelegten Kategorien und nach bisheriger DIN EN ISO 7730 [DIN EN ISO 7730: 1995].

Sommer-Klimaregion	Grenzwert der Innentemperatur
A: sommerkühl	25 °C
B: gemäßigt	26 °C
C: sommerheiß	27 °C

Tabelle 2 Zugrunde gelegte Grenzwerte der Innentemperatur für Sommer-Klimaregionen nach DIN 4108-2 [DIN 4108-2: 2003].

zeit überschritten, wenn die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz der Norm erfüllt werden. Die unterschiedliche Festlegung des Grenzwertes der Innentemperatur wurde mit Hinweis auf die Adaptation des Menschen an das vorherrschende Außenklima gewählt. Die Norm verweist außerdem darauf, dass andere Regelwerke zu Anforderungen an die thermische Behaglichkeit von den aufgeführten Temperaturen unberührt bleiben. In diesem Sinne sollte die DIN 4108-2 auch als Hilfsmittel für den Entwurf von Gebäuden verstanden werden.

	warme Jahreszeit	kalte Jahreszeit
optimale Lufttemperatur	22 – 25 °C	20 – 23 °C
zul. Lufttemperatur (bis 17 W/m ³ Kühllast im Sommer)	bis 3 K über Außenlufttemperatur aber ≤ 28 °C	19 – 20 °C
zulässige mittlere Überschreitungshäufigkeit	200 h/a bis zu 3 K über Außenlufttemperatur	-

Tabelle 3 Anforderungen in [TGL 32603/01 1980] an optimale und maximale Temperaturen für leichte Tätigkeit (bis 170 W/Person, z.B. Bürotätigkeit). Die Temperatur der Umschließungsflächen sollte möglichst nicht mehr als 2 K von der Lufttemperatur abweichen.

2.2.7 Weitere Bewertungsverfahren

Im Gegensatz zur Weiterentwicklung der DIN 1946 aus den erstmals 1937 im VDI-Verlag veröffentlichten Lüftungsregeln [Recknagel 1944] bis zur heutigen Fassung [DIN 1946-2: 1994] in der Bundesrepublik Deutschland wurde in der ehemaligen DDR der ursprüngliche Anwendungsrahmen von DIN 1946 für Versammlungsräume beibehalten [TGL O-1946: 1963]. Es wurde aber ein TGL-Standard [TGL 32603/01: 1980] entwickelt, der Aussagen zum Klima am Arbeitsplatz enthält. So wurden optimale und maximale Temperaturen in Abhängigkeit von Jahreszeit und der Tätigkeit der Personen sowie zulässige Überschreitungzeiten dieser Temperaturen festgelegt. Tabelle 3 zeigt eine Zusammenstellung der Temperaturwerte für leichte bis mittlere Arbeiten. Die warme Jahreszeit war dabei definiert über eine Tagesmitteltemperatur von > 12 °C. Dementsprechend wurde die kalte Jahreszeit, zu der auch die Übergangszeit gehört, charakterisiert durch Tagesmitteltemperaturen ≤ 12 °C. Bei Klimatisierung von Arbeitsräumen war nach der Norm die Einhaltung der optimalen Bedingungen (Zeile 1 in Tabelle 3) anzustreben. Für freie Lüftung waren die Werte nach Zeile 2 und 3 zulässig. Die zulässigen Werte waren mindestens einzuhalten. Es wurde davon ausgegangen, dass bei den zulässigen Werten keine thermische Behaglichkeit mehr gegeben ist. Die festgelegte Überschreitungszeit von 200 h/a entspricht ca. 10% der jährlichen Nutzungszeit eines Bürogebäudes. Dabei durfte die Innentemperatur während der warmen Jahreszeit nie höher sein als die Außentemperatur zuzüglich 3 K. Zusätzlich zu den Temperaturangaben fanden sich in der Norm auch optimale Werte und Grenzwerte für Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit.

2.3 Aktuelle Forschungsergebnisse

2.3.1 Befindlichkeitsstörungen am Arbeitsplatz

In dem vom BMBF geförderten ProKlimA-Projekt [Bischof et al. 2003] wurden vor dem Hintergrund des Sick-Building-Syndroms (SBS) 14 Bürogebäude untersucht. Davon waren sechs frei belüftet. Dabei wurden Personen befragt und aktuelle Raumklimaparameter messtechnisch erfasst. Bild 5 zeigt, dass der Anteil der befindlichkeitsgestörten (unter dem SBS leidenden) Personen in den mechanisch belüfteten Gebäuden im Mittel um etwa 15 Prozentpunkte höher liegt als in den frei belüfteten Gebäuden. Es konnte aber kein signifikanter Unterschied in den Fehlzeiten der Belegschaft aufgrund von Krankheit zwischen den frei belüfteten und den mechanisch belüfteten Gebäuden festgestellt werden.

Gemessene Werte in den frei belüfteten Gebäuden zeigen, dass die tatsächliche Belastung mit Bakterien, Pilzen, CO₂ und flüchtigen organischen Substanzen höher ist als in den mechanisch belüfteten Gebäuden (ausgenommen davon sind Formaldehyd und Stickstoffdioxid). Die Personen beurteilten die Luft in den Gebäuden mit freier Lüftung jedoch trotzdem als frischer und waren mit der Lüftung deutlich zufriedener (Bild 6). Deutlich höhere CO₂-Konzentrationen in frei belüfteten Büroräumen im Gegensatz zu mechanisch belüfteten Büroräumen wurden bereits von [Hauser 1989] gemessen.

Die individuelle Regelbarkeit des Raumklimas am Arbeitsplatz konnte ebenfalls als ein wichtiger Einfluss auf die Zielgröße Befindlichkeitsstörung nachgewiesen werden. Personen, die einen direkten Einfluss auf die Raumtemperatur hatten, äußerten im ProKlimA-Projekt signifikant weniger Befindlichkeitsstörungen als wenn die Einflussnahme nicht möglich war.

Wird das Raumklima als gesundheitsabträglich eingeschätzt, so ist die Chance, unter dem Sick-Building-Syndrom zu leiden, gegenüber Personen, die das Raumklima positiv beurteilen, 2,6-mal höher. In [Kruppa et al. 2002] wird daher folgerichtig festgestellt: Wenn der Nutzer einer RLT-Anlage sich durch diese gestört oder gar gesundheitlich bedroht fühlt, wird dieser Umstand auf Dauer den Einbau solcher Anlagen nicht rechtfertigen. Allerdings zeigt sich auch, dass gut gewartete RLT-Anlagen genauso positiv bewertet werden wie freie Lüftung (Bild 7).

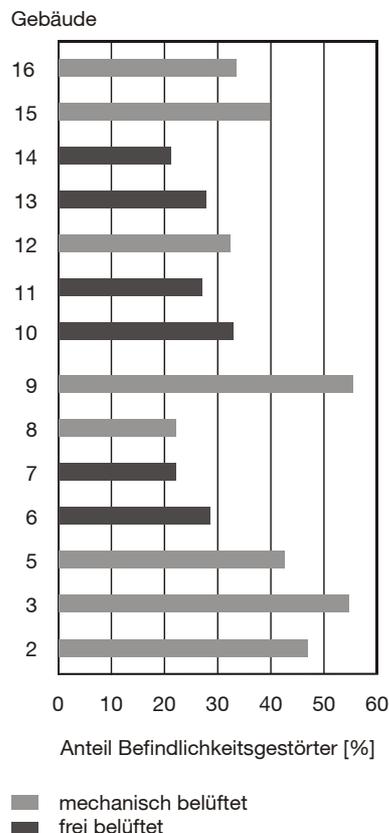


Bild 5 Anteil der als befindlichkeitsgestört eingestuft Personen in den im ProKlimA-Projekt untersuchten Gebäuden [Kruppa et al. 2002].

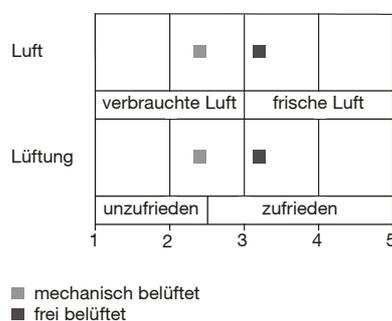


Bild 6 Auswertung der Frage: „Wie beurteilen Sie das Raumklima an Ihrem Arbeitsplatz? Dargestellt sind die Mittelwerte. Die Antworten konnten auf einer Skala von 1= verbrauchte Luft bzw. mit der Lüftung unzufrieden bis 5 = frische Luft bzw. mit der Lüftung zufrieden gegeben werden [Bischof et al. 2003].

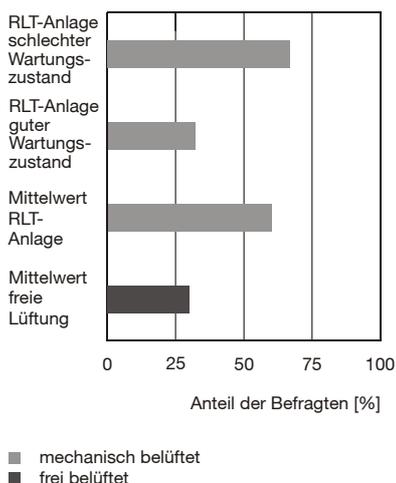


Bild 7 Anteil der Personen, die das Raumklima als gesundheitsabträglich einschätzen [Kruppa et al. 2002].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Befindlichkeitsstörungen primär mit Faktoren wie Arbeitsanforderungen, dem Arbeitsumfeld sowie weiteren psychosozialen Faktoren verbunden sind. Die Beschwerderate liegt umso höher je geringer die Anforderungen an die geistige Leistung sind. Auch negativ bewertete Software trägt zu einer Befindlichkeitsstörung bei. Ein Zusammenhang zwischen gemessenen Raumklimazuständen und der sensorischen Befindlichkeit wie Reizerscheinungen an Augen, Mund, Nase, Hals konnte nur für die Belastung durch flüchtige organische Substanzen gefunden werden. Eine umfassende Darstellung der Ergebnisse des ProKlimA-Projektes erfolgte in [Bischof et al. 2003].

2.3.2 Behaglichkeitsgrenzen der Fensterlüftung

Arbeiten am Hermann-Rietschel-Institut in Berlin zeigen, dass im Winter bei stationärer Dauerlüftung (Lüftung über gekippte Fenster bzw. Schlitzreihen) die Anforderungen der gültigen Normen an die thermische Behaglichkeit nicht immer eingehalten werden können, da zu hohe Lufttemperaturgradienten und zu hohe Luftgeschwindigkeiten entstehen können [Zeidler 2001; Wildeboer, Fitzner 2002].

Bei den Versuchen waren die durch das Fenster oder die Schlitze abgeführte Wärmeleistung und die Summe der Wärmelasten im Raum gleich. Die Raumtemperatur war während der Untersuchungen also konstant. Einflüsse des Windes wurden nicht berücksichtigt, einzige treibende Kraft war die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Aus den genannten Untersuchungen geht hervor, dass Fensterlüftung unterhalb von Außentemperaturen von ca. 5 °C nicht behaglich ist. Die Bewertung erfolgte mit [DIN 1946-2: 1994; CEN CR 1752 1998]. In [Zeidler et al. 2004] wird sogar ausgeführt, Fensterlüftung wäre bei Außentemperaturen zwischen 12 und 20 °C sinnvoll. Allerdings gilt die Grenze von ca. 5°C Außentemperatur bei thermischen Lasten von ca. 300 W/m Fassadenlänge. Das entspricht bei 4 m Fassadenlänge je nach Raumtiefe thermischen Lasten von über 40 W/m². Bei den heute gesunkenen thermischen Lasten dürfte daher in vielen Fällen Fensterlüftung möglich sein. Anzumerken ist, dass bei den vorgenannten Untersuchungen die Option von Variablen Öffnungen in der Fassade ausgesprochen eingeschränkt, nämlich nur über zwei unterschiedliche Kipp-

stellungen bzw. durch drei Schlitzreihen mit unveränderlicher Größe untersucht wurde. Die Variabilität von Öffnungen dürfte jedoch für ganzjährige Fensterlüftung entscheidend sein und ist bisher nicht untersucht worden.

Ähnliche Ergebnisse liegen auch von [Mayer, Schwab 2004] vor. Sie untersuchten die Behaglichkeit bei Fensterlüftung im Winter mit einem luftqualitätsgesteuerten Fenster. Während der Fensteröffnungszeit bildet sich eine Temperaturschichtung aus, die sehr geringe Temperaturen im Fußbereich zur Folge hat und somit zu einem Zukalt-Empfinden im Fußbereich führt. Die Arbeiten kommen zu dem Schluss, dass Fensterlüftung bei Außentemperaturen um 0 °C zu nicht normgerechten Temperaturzuständen im Raum führen kann.

2.3.3 Erweiterungen des PMV-Modells

Das in Abschnitt 2.2.3 beschriebene PMV-Modell von Fanger wurde aufgrund der Erkenntnisse von Feldstudien erweitert. Mayer stellte eigene Untersuchungen zur Beziehung zwischen PMV und PPD an, bei denen er neben dem thermischen Empfinden auch nach der Zufriedenheit (= thermische Behaglichkeit) fragte [Mayer, Schwab 1990; Mayer 1994]. Er stellte dabei fest, dass ein Votum auf der PMV-Skala von -1 (leicht kühl) schon als unbehaglich eingestuft wird. Daraufhin modifizierte er den Zusammenhang von PMV und PPD nach Fanger mit dem Erfolg, dass er eine bessere Übereinstimmung mit seinen eigenen Messdaten erzielte. Nach Mayer liegt das Optimum des PMV bei +0,4, verbunden mit einem minimalen Anteil Unzufriedener von 16%. Dies bedeutet, dass Personen eine thermische Umgebung, die zwischen neutral und leicht warm liegt als behaglicher einstufen als den neutralen Zustand [Mayer 1998]. Auch die Untersuchungen von Mayer fanden in Räumen mit raumluftechnischen Anlagen und unter vorgegebenen thermischen Raumzuständen statt.

Als Konsequenz einer Reihe von Feldstudien (unter anderem auch die im Abschnitt 2.3.4 vorgestellte Studie), bei denen sich für frei belüftete Gebäude zeigte, dass das PMV-PPD-Modell keine ausreichend guten Vorhersagen liefert, machten Fanger und Toftum in [Fanger, Toftum 2002] einen Vorschlag für eine Anpassung. Die Anpassung basiert auf der Vorstellung, dass Menschen mit niedrigen Erwartungen an ihre thermische Umgebung höhere Temperaturen akzeptieren, als man nach dem PMV-Modell erwarten würde. Dazu

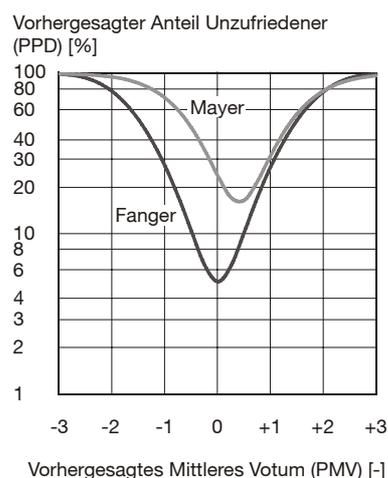


Bild 8 Vorhergesagter Anteil Unzufriedener (PPD) in Abhängigkeit vom Vorhergesagten Mittleren Votum (PMV) nach [Fanger 1982] und [Mayer 1998].

wurde der Expectancy Factor e eingeführt, der für hohe Erwartungen gerade 1 ist und als niedrigsten Wert 0,5 bei geringen Erwartungen erreichen kann. Wird der PMV-Wert mit e multipliziert erhält man den PMV_e -Wert.

	Expectancy Factor e		
	1	0,7	0,5
PPD [%]	20	20	20
PMV_e	0,85	0,85	0,85
PMV alt	0,85	1,2	1,7
obere Temperaturgrenze [°C]	28,7	29,4	30,5

Tabelle 4 Beispiel für die obere Temperaturgrenze des Behaglichkeitsbereiches bei verschiedenen Expectancy Factors in frei belüfteten Gebäuden in warmen Klimaten. Die Berechnungen basieren auf einem Aktivitätsgrad von 1 met, einer Bekleidungs-dämmung von 0,5 clo, einer Luftgeschwindigkeit von 0,3 m/s und einer relativen Luftfeuchte von 70% [Fanger, Toftum 2002].

Von hohen Erwartungen ($e = 0,9 - 1,0$) kann ausgegangen werden, wenn ein frei belüftetes Gebäude in Regionen steht, in denen Gebäude üblicherweise klimatisiert werden und wenn die warme Periode im Sommer vergleichsweise kurz ist. Moderate Erwartungen ($e = 0,7 - 0,9$) treten in frei belüfteten Gebäuden auf, wenn in der Region nur einige der sonstigen Gebäude klimatisiert sind und der Sommer warm ist. Die niedrigsten Erwartungen ($e = 0,5 - 0,7$) treten in frei belüfteten Gebäuden in Regionen auf mit wenigen klimatisierten Gebäuden und wenn alle Jahreszeiten warm sind. Tabelle 4 zeigt die mit bestimmten Erwartungsfaktoren einhergehenden Verschiebungen der oberen Temperaturgrenze.

Der Nachteil dieser Methode ist, dass der Expectancy Factor für jede Region der Welt durch Feldstudien erst ermittelt werden muss. Außerdem kann sich der Faktor durch verstärkte Ausrüstung von neuen und alten Gebäuden mit Klimatisierung mit der Zeit dem Wert 1 nähern. Dadurch gleicht sich der Behaglichkeitsbereich mit der Zeit wieder dem einfachen PMV-Modell an. Fände solch ein Faktor Eingang in die Normung, so wäre eine Klimatisierung aller Gebäude auf lange Sicht die Folge.

2.3.4 ASHRAE-Studie und -Normung

In einer Studie für die amerikanische ASHRAE-Gesellschaft wurden Daten von 160 Bürogebäuden, die sich auf vier Kontinenten und in verschiedenen Klimazonen befinden, nachträglich neu ausgewertet [de Dear, et al. 1997]. Die Daten wurden geteilt in frei belüftete Gebäude und Gebäude mit Klimatisierung. Die frei belüfteten Gebäude hatten keine Kühlung und wurden über Fenster gelüftet, die die Gebäudenutzer betätigen konnten. Die Nutzer der klimatisierten Gebäude hatten im Gegensatz wenig oder keine Kontrolle über ihr thermisches Raumklima. In den klimatisierten Gebäuden konnte im Mittel eine gute Übereinstimmung zwischen der Bewertung der thermischen Behaglichkeit durch die Befragten und dem PMV-Modell erreicht werden (Bild 9). Die Neigung der Geraden im Bild wird hauptsächlich verursacht durch den sich mit der Außentemperatur verändernden Dämmwert der Bekleidung.

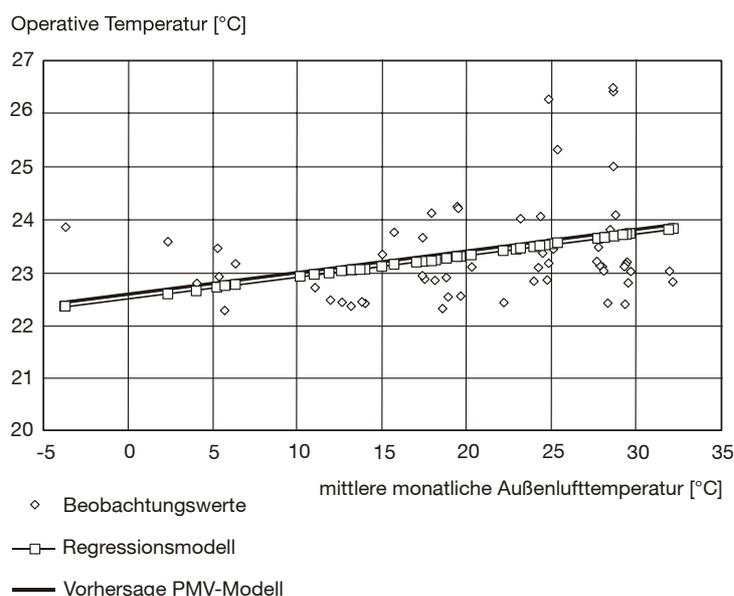


Bild 9 Beobachtete und vorhergesagte behagliche Innentemperaturen für klimatisierte Gebäude in Abhängigkeit von der mittleren monatlichen Außentemperatur. Dargestellt ist ebenso das Regressionsmodell für die beobachteten Werte [de Dear, Brager 2002].

In den frei belüfteten Gebäuden dagegen traten große Abweichungen zwischen den Antworten der Nutzer und der Vorhersage auf (Bild 10). In frei belüfteten Räumen empfinden Personen bei höheren mittleren monatlichen Außenlufttemperaturen im Vergleich zum PMV-Modell höhere operative Innentemperaturen als behaglich. Um die Unterschiede zwischen klimatisierten und frei belüfteten Gebäuden zu klären, wurde untersucht, ob Unterschiede im Bekleidungsgrad, der relativen Luftfeuchte, dem Aktivitätsgrad und Luftgeschwindigkeit vorlagen. Alle diese Untersuchungen konnten die Abweichungen nicht erklären. Daher wurde der Unterschied auf den aktuellen Kontext, in dem sich die Personen befanden, und die damit verbundenen Erwartungen zurückgeführt. Die Ergebnisse in [de Dear, Brager 2002] zeigen, dass Nutzer von frei belüfteten Gebäuden toleranter gegenüber einem weiteren Spektrum der Behaglichkeitsparameter sind als Nutzer von klimatisierten Gebäuden. [de Dear, Brager 1998] fanden bei 80% Akzeptanz eine Temperaturbandbreite von ca. 4 K für mechanisch belüftete Gebäude und von ca. 7 K für frei belüftete Gebäude.

Nach bisherigen Kriterien wird die Komforttemperatur bzw. der Komforttemperaturbereich entweder unabhängig von den Außenklimabedingungen [DIN EN ISO 7730: 1995, CEN 1998, ASR 6 2001] oder in Abhängigkeit von der Momentan-Außentemperatur [DIN 1946-2: 1994] bestimmt. In dem neuen Ansatz wird dagegen die operative Komforttemperatur in Abhängigkeit von einer mittleren monatlichen Außentemperatur bestimmt (Bild 9 und Bild 10).

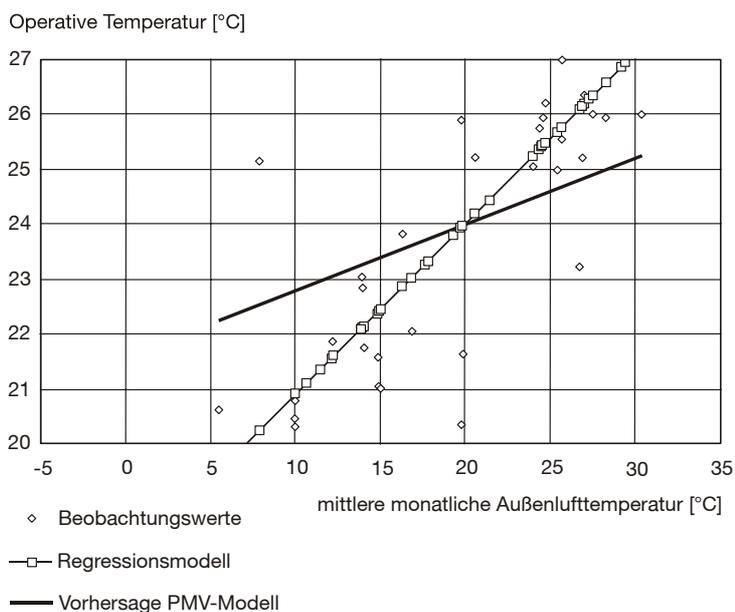


Bild 10 Beobachtete und vorhergesagte behagliche Innentemperaturen für frei belüftete Gebäude in Abhängigkeit von der mittleren monatlichen Außentemperatur. Dargestellt ist ebenso das Regressionsmodell für die beobachteten Werte [de Dear, Brager 2002].

Die Ergebnisse aus [de Dear, Brager 2002] wurden in eine revidierte Fassung des ASHRAE Standards 55 [ASHRAE 2004] aufgenommen. Damit liegt ein einfaches Bewertungsinstrument für behagliche Temperaturen in frei belüfteten Räumen vor (Bild 11). Für Außentemperaturen von unter 10 °C und über 33,5 °C ist der Ansatz nicht anzuwenden. Der Ansatz darf zwar bei Gebäuden, die mit einem Heizsystem ausgerüstet sind, angewendet werden, allerdings nur wenn dieses ausgeschaltet ist. Der Ansatz gilt ausdrücklich für leichte sitzende Tätigkeiten von 1 bis 1,3 met.

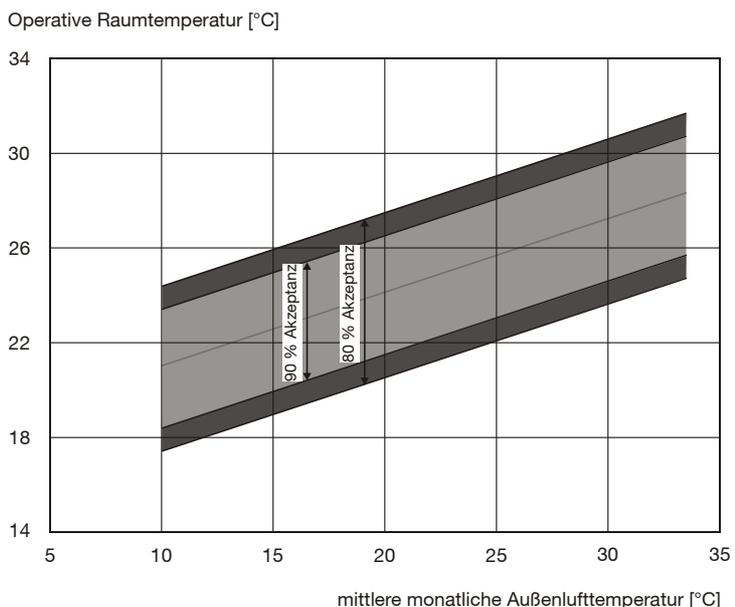


Bild 11 ASHRAE Standard 55 [ASHRAE 2004]: Behagliche operative Raumtemperaturen für frei belüftete Räume.

Bei Anwendung der neuen ASHRAE-Methode ergäbe sich für den Standort Freiburg mit einer mittleren monatlichen Außentemperatur von etwa 19,2 °C im August (nach Testreferenzjahr) eine maximale operative Raumtemperatur von 27,3 °C bei einer Akzeptanz von 80% der Nutzer. Legt man die im Sommer 2003 aufgetretene Mitteltemperatur des Augusts von 27 °C (Münchner Innenstadt) zugrunde so wäre eine Raumtemperatur von 29,7 °C für 80% der Personen akzeptabel.

2.3.5 Niederländische Richtlinie

Ebenfalls auf den Erkenntnissen der ASHRAE-Studie [de Dear, Brager 2002] beruht eine niederländische Richtlinie [Boerstra et al. 2003; van Hoof, Hensen 2005] zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Bürogebäuden. Der Ansatz unterscheidet zwischen Gebäuden mit einem hohen Grad an möglichem Nutzereinfluss und Gebäuden mit einem geringen Grad an möglichem Nutzereinfluss. Die maximal bzw. minimal zulässige operative Raumtemperatur ist dabei abhängig von einer so genannten laufenden mittleren Außentemperatur, die sich aus dem Mittel der Außentemperaturen des aktuellen Tages und der drei vorgegangenen Tage zusammensetzt (Bild 12). Die Richtlinie enthält eine vergleichbare Darstellung für Gebäude, die nur eine geringe Nutzereinflussnahme ermöglichen. Bis ca. 12 °C laufender mittlerer Außentemperatur wird davon ausgegangen, dass ein Gebäude beheizt wird (Heizgrenztemperatur). In diesem Falle sind die zulässigen Temperaturen für Gebäude mit geringem und mit hohem Nutzereinfluss gleich. Bei laufenden mittleren Außentemperaturen über 12 °C ist die Steigung der oberen Temperaturgrenze bei Gebäuden mit hohem Nutzereinfluss größer als bei Außentemperaturen unter 12 °C.

Das momentane Verhalten des Gebäudes wird als gut eingestuft, wenn die operative Raumtemperatur innerhalb des 90-Prozent-Akzeptanzbereiches liegt (Kategorie A Bereich), als mäßig wenn die Temperaturen zwischen der 90 bzw. 80 Prozent Akzeptanzlinie liegen (Kategorie B). Ähnlich wird vorgegangen, wenn das Gebäudeverhalten beispielsweise über den Zeitraum eines Jahres bewertet werden soll. Für jedes Gebäude wird dann angegeben in wieviel Prozent der Nutzungszeit die operative Temperatur innerhalb der Kategorie A, B oder C (65% Akzeptanz) liegt.

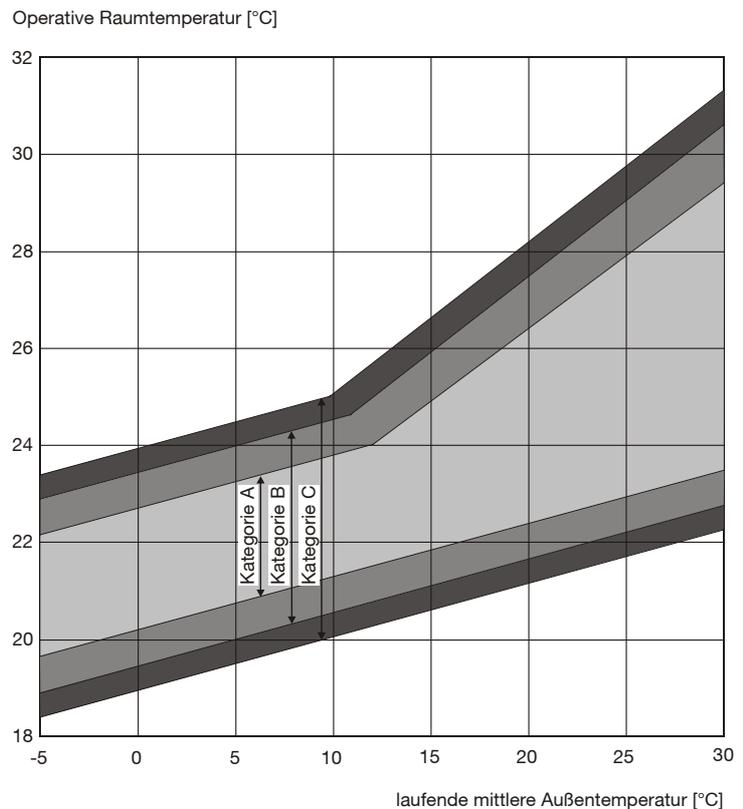


Bild 12 Niederländische Richtlinie für Gebäude mit hoher Nutzerbeeinflussungsmöglichkeit mit Kennzeichnung der drei Gebäudekategorien [Boerstra et al. 2003; van Hoof, Hensen 2005].

Bei Anwendung der neuen niederländischen Methode ergäbe sich für den Standort Freiburg mit einer mittleren Außentemperatur für vier heiße Tage im August (nach Testreferenzjahr) von etwa 24,2 °C eine maximale operative Raumtemperatur von 28,8 °C bei einer Akzeptanz von 80% der Nutzer. Legt man die im Sommer 2003 aufgetretene Mitteltemperatur von vier Tagen im August von 29,2 °C (Münchener Innenstadt) zugrunde so wäre eine Raumtemperatur von 30,4 °C für 80% der Personen und 31,1 °C für 65% der Personen akzeptabel. Für Gebäude mit geringem Nutzereinfluss ergäben sich akzeptable Raumtemperaturen von 26,7 °C für 80% der Personen und 27,2 °C für 65% der Personen.

Über ein Flussdiagramm wird ermittelt, ob es sich um ein Gebäuden mit viel oder wenig Einflussmöglichkeiten handelt. Ist ein Dresscode vorgeschrieben, der es den Angestellten nicht ermöglicht ihre Kleidung an die Verhältnisse im Gebäude anzupassen, so wird das Gebäude als eines mit geringer Beeinflussungsmöglichkeit eingestuft. Hat das Gebäude eine mechanische Kühlung und gibt es für je zwei Gebäudenutzer nicht mindestens eine individuelle Temperaturregelmöglichkeit, so wird das Gebäude ebenfalls als

eines mit geringem Nutzereinfluss eingestuft. Soll eine hohe Möglichkeit des Nutzereinflusses vorliegen, so müssen öffentbare Fenster vorhanden sein.

2.3.6 Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit

Abweichungen zwischen dem Votum von Befragten in Felduntersuchungen und dem aus Messwerten ermittelten vorhergesagten Mittleren Votum (PMV) werden in der Literatur oft mit so genannten Kontext-Effekten versucht zu erklären. Kontext-Effekte können kulturelle Variablen (Klima, Anpassung), psychologische Faktoren (Erfahrungen, Erwartungen, Wissen, Einstellung), demographische (Alter, Geschlecht) oder andere Faktoren (Einflussnahmemöglichkeit, Umfeld) sein.

Oseland führte Untersuchungen mit 30 Probanden durch. Dabei verbrachten die Probanden innerhalb eines Tages jeweils 3 Stunden in einer Klimakammer, in ihrem alltäglichen Büro und in ihrer Wohnung. Die physikalischen Parameter wurden weitestgehend konstant gehalten und protokolliert. Außerdem bekamen die Probanden Instruktionen für die Art der zu tragenden Bekleidung [Oseland 1995]. Sie führten eine sitzende Tätigkeit aus. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Personen unter gleichen thermischen Bedingungen in ihrer Wohnung am wärmsten fühlten. Die Klimakammer wurde am kältesten bewertet. Die berichteten Temperaturen für ein Votum von „neutral“ (Wert Null auf der PMV-Skala) waren in den Wohnungen 2,2 K geringer und in den Büros 0.6 K geringer als in der Klimakammer.

Zufriedenheit mit dem Raumklima hängt auch davon ab, ob die thermischen Bedingungen und die Erwartung der Personen, wie das Raumklima sein sollte in einem gegebenen Kontext von Außenklima, Büroumfeld, Ausstattung in Übereinstimmung gebracht werden. Im Rahmen des ProKlima-Projektes wurde herausgefunden, dass die Erwartungen an das Raumklima (Luftfeuchte, Temperatur, Luftgeschwindigkeit, Lüftung) bei Personen in klimatisierten Umgebungen etwa 1,5 bis 1,9mal höher sind als bei Personen in frei belüfteten Umgebungen [Bischof et al. 2002].

In einer australischen Studie wurde gezeigt, dass die Arbeitszufriedenheit einen signifikanten Effekt auf die Zufriedenheit mit der Temperatur hat [Cena, de Dear 1998].

Das Vorhandensein von verschiedenen Möglichkeiten, das Raumklima beeinflussen zu können, wird in vielen Arbeiten der letzten Jahre als sehr wichtig erachtet. Folgende Einrichtungen werden immer wieder genannt:

- Öffnbare Fenster
- Sonnenschutz/ Blendschutz
- Türen
- Ventilatoren (lokaler Einsatz im Sommer)
- Thermostatventile
- Beleuchtung

Die Quantifizierung des Einflusses auf die Zufriedenheit der Gebäudenutzer ist jedoch noch nicht gelungen. In [Raja et al. 2001] wird aus Feldstudien geschlussfolgert: Personen, die Zugang zu öffnbaren Fenstern haben, berichten seltener Unbehaglichkeit als solche, die eingeschränkten Zugang haben (z.B. weiter entfernt vom Fenster sitzen).

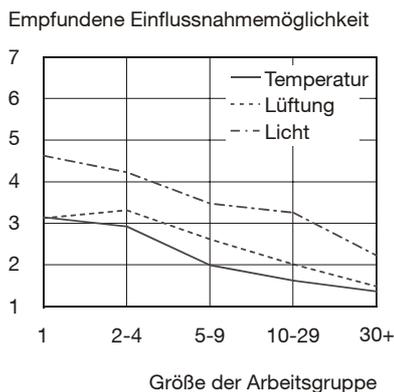


Bild 13 Empfundene Einflussmöglichkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen im Raum nach [Wilson, Hedge 1987].

Die Anzahl der Personen im Raum scheint einen Einfluss auf die empfundene Einflussnahmemöglichkeit zu haben. Auf Basis von 50 Gebäuden in Großbritannien wurde die Abhängigkeit der Personenzahl im Raum auf die empfundene Einflussmöglichkeit auf Temperatur, Lüftung und Licht untersucht. Bei allen Variablen nahm die Einflussmöglichkeit bei Gruppengrößen von mehr als 5 Personen deutlich ab [Wilson, Hedge 1987] (Bild 13). Da die empfundene Einflussnahmemöglichkeit mit der Produktivität korreliert ist (siehe Abschnitt 2.1.2) kann angenommen werden, dass die Personenzahl im Raum auch die Produktivität beeinflusst.

In einer Studie fanden [Clausen et al. 1993] heraus, dass ein Temperaturanstieg um 1 K den gleichen Effekt auf die allgemeine Behaglichkeit hat wie ein Lautstärkeanstieg von etwa 4 dB (A) oder wie eine Verschlechterung der empfundenen Luftqualität um 2,4 decipol. Zur Auswirkung der Kombination dieser Effekte gab es bisher keine Untersuchungen. [Witterseh et al. 2002] stellten dagegen keinen signifikanten Effekt von Lärm auf das thermische Empfinden und die thermische Akzeptanz bei steigender Temperatur fest. Die Literaturanalyse zeigt, dass zwar einzelne Faktoren bereits untersucht wurden, jedoch kein Modell für die Gesamtzusammenhänge und Beeinflussungen besteht.

2.4 Vergleich der Methoden zur Behaglichkeitsbewertung

Es wurde festgestellt, dass raumklimatische Situationen, die in klimatisierten Gebäuden als inakzeptabel gelten, in frei belüfteten Gebäuden durchaus akzeptiert werden können. Bisherige Methoden erlauben es nicht, die Möglichkeiten der Beeinflussung des Raumklimas durch die Nutzer, die ein Gebäude bietet, in die Bewertung mit einzubeziehen. Die scheinbar vorhandene Ankoppelung der behaglichen Raumtemperaturen an die Außentemperatur kann mit dem PMV-Modell nicht berücksichtigt werden. Erste neue Modelle wurden in den Abschnitten 2.3.4 und 2.3.5 vorgestellt. Bild 14 stellt diese neuen Modelle den behaglichen Temperaturen nach DIN 1946-2, ISO 7730 und TGL 32603/01 gegenüber. Allerdings haben die Modelle jeweils unterschiedliche Außentemperaturwerte als Bezug.

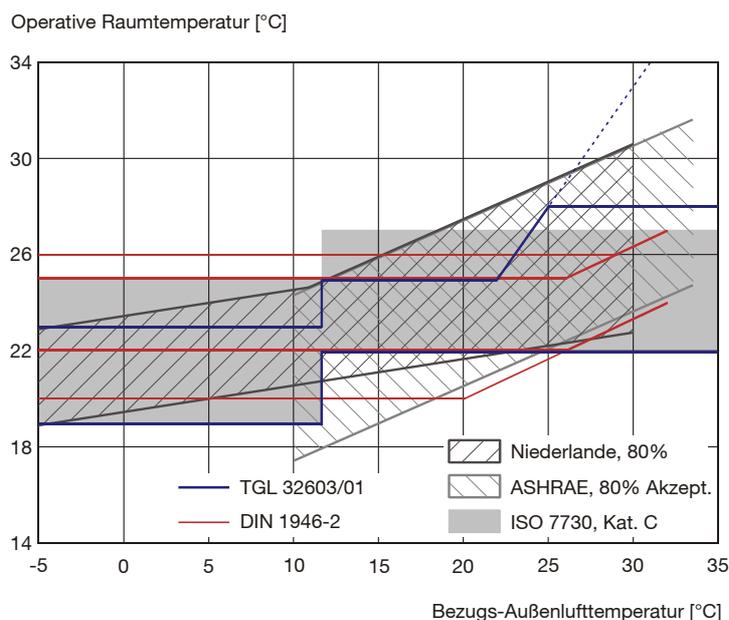


Bild 14 Vergleich verschiedener Grenzwerte der operativen Temperatur bei freier Lüftung in Abhängigkeit von der jeweiligen Bezugs-Außentemperatur. DIN 1946-2 und ISO 7730 gelten zwar nur für mechanisch belüftete Räume, wurden aber als Vergleich dazugestellt.

Die – nicht mehr gültige – DIN 1946-2 ist an das Außenklima gekoppelt; allerdings an die momentane Außentemperatur und scheint damit durchaus vergleichbar dem ASHRAE Standard 55 [ASHRAE 2004] für frei belüftete Räume. Alle der bis heute angewandten Methoden gelten nur für Gebäude mit raumluftechnischen Anlagen ausgenommen [TGL 32603/01 1980].

Die obere Grenze des Behaglichkeitsbereiches des ASHRAE Standards und des niederländischen Modell sind identisch, da beide Verfahren aus der gleichen Studie abgeleitet worden sind. Die untere Grenze dagegen weist eine

unterschiedliche Steigung auf. Im niederländischen Modell wird hier die Grenze für klimatisierte Gebäude aus der ASHRAE Studie herangezogen. Die untere Grenze von ASHRAE und DIN 1946-2 sind praktisch identisch, allerdings bei unterschiedlicher Bezugs-Außentemperatur. Ebenso ist die Steigung der oberen Grenze gleich. Allerdings liegt die obere Grenze bei DIN 1946-2 ca. 4 K niedriger. Der in der DIN 1946-2 festgelegte zulässige Bereich bei hohen Außentemperaturen liegt innerhalb der in der ISO 7730, Kategorie C, Sommer.

Bild 15 vergleicht die aus den Regelwerken resultierenden maximal zulässigen Raumtemperaturen in Abhängigkeit von der jeweiligen Bezugs-Außentemperatur für ein Beispiel des Sommers 2003 in der Münchner Innenstadt. Mit dem Niederländischen Modell ist bei 80% Akzeptanz bezogen auf die laufende mittlere Außentemperatur die höchste Raumtemperatur von etwas über 30 °C zulässig. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich mit dem ASHRAE Standard 55. Da der Bezugswert hier aber die monatliche mittlere Außentemperatur ist, ergibt sich ein maximal zulässiger Wert von etwas unter 30 °C.

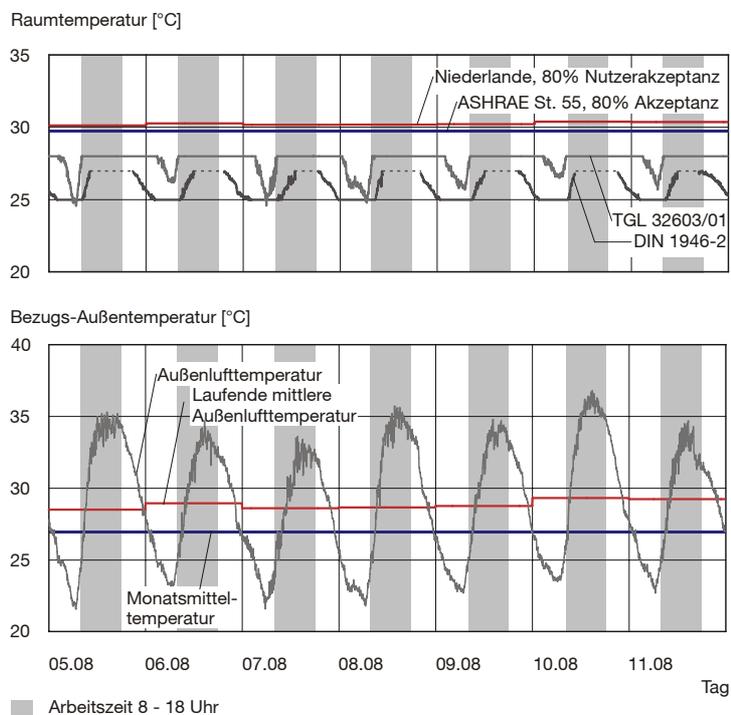


Bild 15 Zulässige maximale Raumtemperaturen am Beispiel gemessener Außentemperaturen in der Münchner Innenstadt einer Woche im heißen Sommer 2003. Der obere Teil des Diagramms zeigt die zulässigen maximalen Raumtemperaturen. Der untere Teil der Darstellung die jeweilige Bezugs-Außentemperatur.

Die nicht mehr gültige TGL 32603/01 erlaubt maximal eine Temperatur von 28 °C; Überschreitungen sind an bis zu 200 h/a zulässig. Zu hinterfragen ist sicherlich der Ansatz, dass die Überschreitungen bis zu 3 K über der der Außentemperatur liegen dürfen. Da eine Extrapolation des Diagramms in Bild 3 nicht zulässig ist, ist die DIN 1946-2 in dem aufgetretenen Außentemperaturbereich nicht definiert. Daher wurden die betreffenden Teile der Temperaturkurve gestrichelt dargestellt. Im Vergleich zur Niederländischen Methode und zum ASHRAE Standard 55 lässt die DIN 1946-2 – wenn sie für frei belüftete Gebäude angewendet wird – 5 bis 3 K geringere Maximaltemperaturen zu. Bei Außentemperaturen von ca. 22 bis 36 °C wären Temperaturen im Bereich von 25 °C bis 27 °C zulässig. Dieses Ziel kann mit freier Lüftung nicht eingehalten werden.

3. Hypothesen

Aus der Analyse der Literatur lassen sich folgende Hypothesen ableiten. Die Arbeit soll die Hypothesen bestätigen oder aber diese verwerfen.

- Personen in frei belüfteten Räumen sind zufriedener mit ihrem thermischen Raumklima als Personen in mechanisch belüfteten Umgebungen.
- Unterschiede in der thermischen Behaglichkeit von Nutzern in frei belüfteten Räumen und Nutzern in mechanisch belüfteten Räumen sind mit einer Reihe von nicht-thermischen Einflussgrößen zu begründen (z.B. anlagentechnische und bauliche Größen, die Einflussmöglichkeit der Nutzer oder psychosoziale Größen).
- Die Belüftungsart bestimmt das Spektrum der Einflussgrößen der thermischen Behaglichkeit, nicht jedoch des thermischen Empfindens.
- Nutzer in frei belüfteten Räumen akzeptieren eine größere Bandbreite der Temperaturen als Nutzer in mechanisch belüfteten Räumen.
- Der Zusammenhang von vorhergesagtem mittlerem Votum (PMV) und vorhergesagtem Prozentsatz Unzufriedener (PPD) nach Fanger gilt nicht für frei belüftete Räume.

Um die Hypothesen beantworten zu können, müssen die sich daraus ergebenden beiden Hauptzielgrößen thermisches Empfinden und thermische Behaglichkeit betrachtet werden (zur Unterscheidung der Begriffe siehe Abschnitt 1.2). In Abschnitt 4 werden die verwendeten Daten aus dem ProKlimA-Projekt, Erweiterungen der Daten sowie die angewandten Auswertungsmethoden erläutert. Die Ergebnisse werden in den Abschnitten 5 und 6 vorgestellt. In Abschnitt 5 geschieht dies auf der Basis von Befragungsdaten und in Abschnitt 6 auf der Basis von Befragungen und Raumklimamessungen. In Abschnitt 7 werden die oben angeführten Hypothesen anhand der Untersuchungsergebnisse diskutiert.

4. Material und Methoden

4.1 Das ProKlimA-Projekt

Das ProKlimA-Projekt (Projektgruppe Klima und Arbeit) ist eines der umfangreichsten Forschungsprojekte weltweit zum Thema Sick-Building-Syndrom (SBS) [Bischof et al. 2003]. Wichtigstes Ziel des Projektes war es, auf Basis einer statistisch fundierten Analyse, Erkenntnisse über die Ursachen von Befindlichkeitsstörungen am Arbeitsplatz zu ermitteln. Das Projekt umfasste die Untersuchung von 14 Bürogebäuden in Deutschland. Tabelle 5 zeigt den Umfang der Untersuchungen. Neben Befragungen und medizinischen Untersuchungen der arbeitenden Personen wurden auch physikalische, biologische und chemische Messungen an Arbeitsplätzen, in Räumen und raumluftechnischen Anlagen des Gebäudes durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse wurden bereits in Abschnitt 2.3.1 vorgestellt.

Ebene	Anzahl
Gebäude	14
Arbeitsplätze	1497
davon frei belüftet	638
davon teil- oder klimatisiert	859
Personen (Untersuchungszeitpunkt 1)	4596
Personen (Untersuchungszeitpunkt 2)	1497

Tabelle 5 Umfang der Untersuchungen im ProKlimA-Projekt.

Die für das Sick-Building-Syndrom typische sensorische Symptomatik zeigte sich in der Auswertung hauptsächlich von psychosozialen Faktoren beeinflusst. Der Einfluss der thermischen Parameter auf die Zielgrößen Befindlichkeit und Gesundheit konnte nicht dargestellt werden. Daher verzichtete die ProKlimA-Projektgruppe auf eine detaillierte Auswertung des thermischen Raumklimas. Die ProKlimA-Daten werden in der vorliegenden Arbeit hinsichtlich der Zielgrößen thermisches Empfinden und thermische Behaglichkeit ausgewertet.

4.1.1 Gebäude und Anlagen

Die Gebäude- und Anlagenbeschreibungen der 14 untersuchten Gebäude wurden im ProKlimA-Projekt durch Experten der Arbeitsgruppe erstellt. Einige allgemeine Angaben zu jedem Gebäude wurden bestimmt wie z.B. Gebäudebetreiber, Gebäudelage und Gesamtzahl der Angestellten und Büros im Gebäude. Zur Kennzeichnung der Bauweise wurden unter anderem folgende Größen aufgenommen:

- Baujahr
- Außenwand- und Innenwandaufbau
- Art der Decken und abgehängten Decken
- Art der Verschattungseinrichtungen
- Steuerung der Verschattungseinrichtungen
- Öffnungsmöglichkeit der Fenster

Die Anlagen wurden mit folgenden Variablen charakterisiert:

- Anlagenart
- Lüftungsprinzip
- Lüftführung im Raum
- Befeuchtung
- Heiztyp
- Wartungszustand der Anlagen

Eine genaue Beschreibung aller aufgenommenen Gebäude- und Anlagenvariablen findet sich im ProKlimA-Abschlussbericht. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden die Größen herangezogen, denen eine Bedeutung für das thermische Raumklima zugeschrieben wird.

4.1.2 Befragungen und Messungen

Die Untersuchungen im ProKlimA-Projekt wurden in zwei Schritten zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt. Zum Untersuchungszeitpunkt 1 wurde eine umfangreiche Befragung von ca. 4500 Personen durchgeführt. Es wurden alle im jeweiligen Gebäude anwesenden Personen befragt. Der Fragebogen war modular aufgebaut:

- Körperliche Empfindungen/ Sensorikliste (störend empfundenen Symptome an Auge, Nase, Haut, Mund, Hals sowie allgemeine Befindlichkeit)
- Raumklimawahrnehmung, -wichtigkeit, -zufriedenheit
- psychisches Befinden
- Arbeit (Arbeitsauslastung, Arbeitszufriedenheit)
- Gesundheitszustand (Beschwerdeliste, Krankheiten, subjektive Gesundheit, Fitness)
- Person (Lebenszufriedenheit)
- Tätigkeit und Soziodemographie (Tätigkeitsmerkmale, Alter, Geschlecht, Bildung)

In Anhang 1 ist das Modul Raumklima des Fragebogens abgebildet. Die Befragung erfolgte an einem einzigen Tag je Gebäude.

Zum Untersuchungszeitpunkt 2 wurde eine Auswahl der zum Messzeitpunkt 1 Befragten von ca. 60 Personen ohne Befindlichkeitsstörungen (SBS-Symptome) und 60 Personen mit Befindlichkeitsstörungen getroffen. Diese Personen wurden erneut befragt und medizinisch untersucht. Zusätzlich wurden Messungen verschiedener Raumklimaparameter an

den Arbeitsplätzen vorgenommen. Die Befragung erfolgte zum Untersuchungszeitpunkt 2 mit einer verkürzten Form des Fragebogens. Folgende direkt mit dem thermischen Raumklima verbundenen Messgrößen wurden erfasst:

- Lufttemperatur [°C], in Kopfhöhe einer sitzenden Person 1,1 m, Messgenauigkeit $\pm 0,1$ K
- minimale, maximale, mittlere Strahlungstemperatur [°C] am Arbeitsplatz Messgenauigkeit $\pm 0,1$ K
- relative Luftfeuchte [%], in Kopfhöhe einer sitzenden Person 1,1 m, Messgenauigkeit ± 4 Prozentpunkte
- Luftgeschwindigkeit [m/s], in Kopfhöhe einer sitzenden Person 1,1 m, Messgenauigkeit $\pm 0,05$ m/s sowie Standardabweichung
- Bekleidung [DIN EN ISO 7730: 1995]
- Aktivitätsgrad nach [Spitzer et al. 1982]

Nach [LASI 1999] sollen Messungen der Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit sitzender Personen in einer Höhe von 0,6 m erfolgen, wenn nur ein Messwert je Parameter erhoben werden kann. Günstiger ist eine Erfassung der Parameter im Profil (0,1 m – 0,6 m – 1,1 m Höhe). Nach [Mayer 2005] wurden aufgrund des begrenzten Projektumfanges die Messungen ausschließlich in 1,1 m Höhe durchgeführt. Allerdings lassen Untersuchungen in [Mayer 1994] auch darauf schließen, dass die Behaglichkeitsempfindung im Gesichtsbereich mit derjenigen des gesamten Körpers übereinstimmt.

Befragungen und Messungen erfolgten parallel. Die Untersuchungen fanden an 3 bis 5 aufeinander folgenden Tagen in jedem Gebäude statt.

4.2 Ergänzung der ProKlimA-Daten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden weitere Größen erhoben, neu definiert bzw. berechnet.

4.2.1 Witterung zum Zeitpunkt der Untersuchungen

Um eine mögliche Abhängigkeit des thermischen Empfindens und der thermischen Behaglichkeit von der Außentemperatur untersuchen zu können, werden die Außentemperaturen der nächstgelegenen Wetterstation in die Daten aufgenommen. Dazu werden Angaben aus [Deutscher Wetterdienst] unter Berücksichtigung des jeweiligen Messda-

tums verwendet. Die Tagesmitteltemperatur bestimmt sich als Mittelwert des jeweiligen Tagesminimums und -maximums, um eine Vergleichbarkeit mit den Ansätzen von [Boerstra et al. 2003] zu ermöglichen. Während zum Untersuchungszeitpunkt 1 die Befragungen an nur einem Tag je Gebäude durchgeführt wurden, gab es zum Untersuchungszeitpunkt 2 bis 4 Messtage pro Gebäude. Für jeden dieser Tage wird die Tagesmitteltemperatur auf die gleiche Weise bestimmt.

Es wird außerdem ein Monatsmittelwert der Außentemperatur ermittelt. Dafür wird der Messtag bzw. die Messwoche jeweils in die Mitte eines 30-tägigen Zeitraumes gestellt und aus diesem Zeitraum der Mittelwert der Tagesmitteltemperaturen berechnet.

Nach [Boerstra et al. 2003] und [Morgan et al. 2002] ist der Dämmwert der in Innenräumen getragenen Kleidung abhängig von einer so genannten laufenden mittleren Außentemperatur. Sie berechnet sich nach [Boerstra et al. 2003] aus dem Mittel der Außentemperaturen des aktuellen Tages und der drei vorgegangenen Tage:

$$T_{\text{out,rm}} = \frac{1 \cdot T_{\text{out,today}} + 0,8 \cdot T_{\text{out,yesterday}} + 0,4 \cdot T_{\text{out,2 days ago}} + 0,2 \cdot T_{\text{out,3 days ago}}}{1 + 0,8 + 0,4 + 0,2}$$

$T_{\text{out, today}}$, $T_{\text{out, yesterday}}$, $T_{\text{out, 2 days ago}}$ und $T_{\text{out, 3 days ago}}$ sind jeweils die Tagesmitteltemperaturen bestimmt aus dem jeweiligen Tagesminimum und -maximum. In [Morgan et al. 2002] wird gezeigt, dass ein Einfluss der Außentemperatur auf den Dämmwert der Bekleidung bis zum 7 Tage zurück reichen kann. Trotzdem wird aus Gründen der Vergleichbarkeit für die vorliegende Arbeit auf den Ansatz aus [Boerstra et al. 2003] zurückgegriffen. Die laufende mittlere Außentemperatur wird für jeden Messtag bestimmt. Aus den laufenden mittleren Außentemperaturen der Messtage zum Untersuchungszeitpunkt 2 wird je Gebäude zusätzlich ein Messtage-Mittelwert der laufenden Außentemperatur ermittelt. Dieser dient dazu die Gebäude den Jahreszeiten zuzuordnen:

- Sommer: Messtage-Mittel der laufenden Außentemperatur $\geq 12 \text{ }^\circ\text{C}$
- Übergangszeit: $0 \text{ }^\circ\text{C} \leq$ Messtage-Mittel der laufenden Außentemperatur $< 12 \text{ }^\circ\text{C}$
- Winter: Messtage-Mittel der laufenden Außentemperatur $< 0 \text{ }^\circ\text{C}$

Für jeden Befragungs- bzw. Messtag wird außerdem die Sonnenscheindauer aufgenommen. Um die Sonnenscheindauer von saisonalen Unterschieden unabhängig als Einflussgröße berücksichtigen zu können, wird die relative Sonnenscheindauer als Verhältnis von aufgetretener und maximal möglicher Sonnenscheindauer des jeweiligen Tages gebildet.

4.2.2 Gebäude- und Anlagenkennwerte

Die Charakterisierung der untersuchten Gebäude durch deren Bauweise aus dem ProKlimA-Projekt wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit neu definiert. Dabei werden feste Kriterien angewandt. Ein Gebäude besitzt demnach eine mittelschwere Bauweise, wenn es keinen aufgeständerten Boden besitzt, die Außenwände schwer sind sowie der Fensterflächenanteil in diesen Außenwänden gering ist. Es kann dabei Leichtbau-Innenwände und abgehängte Decken besitzen. Als schwer würde ein Gebäude eingestuft werden, wenn es keine abgehängten Decken und keine leichten Trennwände besitzt. Dieses trifft allerdings auf keines der Gebäude zu.

Für die Hauptfassaden der Gebäude wird der mittlere Verglasungsanteil bestimmt. Der Verglasungsanteil bestimmt maßgeblich den solaren Energieeintrag ins Gebäude und beeinflusst damit das Behaglichkeitsempfinden.

Ergänzt werden die Daten auch durch die Berechnung eines modifizierten Sonneneintragskennwertes als Produkt von Verschattungsfaktor und Verglasungsanteil. Die Verschattungsfaktoren wurden nach [DIN 4108-2: 2003] festgelegt:

- ohne Sonnenschutzvorrichtung $F_C = 1,0$
- innenliegende Sonnenschutzvorrichtung mit hellen Farben oder geringer Transparenz, $F_C = 0,8$
- außenliegende Sonnenschutzvorrichtung mit drehbaren Lamellen, hinterlüftet, $F_C = 0,25$

Da die Daten keine Angaben über Kühleinrichtungen enthielten, wird die Art der Kühlung (ohne, Luft, Wasser) aus ProKlimA-Erhebungen nach [Kruppa 2004] ergänzt.

4.2.3 Metabolismus

Körperhaltung	Tätigkeit	Energieumsatz W/m ² (met)
sitzend	leichte Tätigkeit	70 (1,20)
	mittlere Handarbeit	85 (1,46)
	leichte Einarmarbeit	90 (1,55)
	leichte Zweiarbeit	120 (2,05)
stehend	mittlere Handarbeit	100 (1,72)
	leichte Zweiarbeit	135 (2,32)

Tabelle 6 Energieumsatz bei Körperhaltung und Tätigkeit nach [DIN EN ISO 8996: 2005].

Die in ProKlimA erhobenen Energieumsätze basieren auf [Spitzer et al. 1982]. Um die Vergleichbarkeit mit internationalen Studien herstellen zu können, wird in dieser Arbeit der Energieumsatz auf Grund der Beschreibung von Körperhaltung und Tätigkeit [Gebhardt 2004] nach Angaben des Anhangs B der [DIN EN ISO 8996: 2005] geändert. Tabelle 6 enthält die zugrunde gelegten Tätigkeiten und Energieumsätze. Nachdem die Analyse der Tätigkeiten in Gebäude 11 keine Abweichungen von denen der anderen Gebäude ergab, wird der für alle Probanden in Gebäude 11 angegebene Wert von 120 W/m² nach Angaben von [Gebhardt 2004] in einen Wert von 85 W/m² geändert.

4.2.4 Dämmwert der Bekleidung

Die Bekleidungs-dämmwerte wurden im ProKlimA-Projekt anhand eines Fragebogens, auf dem die Probanden die entsprechend von ihnen getragenen Kleidungsstücke ankreuzen konnten, bestimmt. Die Einzelwerte des Fragebogens entstammen der [DIN EN ISO 7730: 1995] und wurden zu einem Summenwert addiert [Gebhardt 2004]. Der Dämmwert eines eventuell vorhandenen Büro-Stuhles wurde in der Erhebung nicht berücksichtigt.

Die Literatur gibt für die zusätzliche Dämmung durch Bürostühle einen großen Bereich an. [DIN EN ISO 7730: 1995] führt einen Bereich von 0 – 0,4 clo für einen Bürostuhl auf. [ISO 7730: 2003; ASHRAE: 2004] nennen zusätzlich für einen Standard Bürostuhl einen Wert von 0,1 clo und einen Stuhl mit durchgehender hoher Rückenlehne einen Wert von 0,15 clo. Diese Werte können zu den Dämmwerten der Bekleidung addiert werden. [McCullough et al. 1994] haben sowohl den Einfluss der Position (sitzend oder stehend) auf dem Dämmwert der Bekleidung als auch Dämmwerte für verschiedene Stühle ermittelt. Der Beitrag des Stuhles ist dabei auch abhängig von der Bekleidungs-dämmung.

In [de Dear 1994] wird ein Wert von 0,15 clo für gepolsterte Bürostühle empfohlen, wenn der Bekleidungs-dämmungsgrad aus einfacher Addition der Einzelkleidungsstücke berechnet wird. Für die Meta-Analyse von Feldstudien wurde in [de Dear et al. 1997] ebenfalls ein einheitlicher Wert von 0,15 clo addiert.

Anhand der Tätigkeitsbeschreibung der Personen in ProKlimA kann festgestellt werden, ob die Personen eine überwiegend sitzende Tätigkeit ausführten. Bei allen Personen, die eine überwiegend sitzende Tätigkeit ausführten, wird der Dämmwert der Bekleidung um den Dämmwert eines durchschnittlichen Stuhles von 0,15 clo erhöht.

4.3 Kennwerte des thermischen Raumklimas

Zur Auswertung des Untersuchungszeitpunktes 2 werden weitere Kennwerte des thermischen Raumklimas aus den Messgrößen berechnet. Aus Lufttemperatur und Strahlungstemperatur bestimmt sich die operative Temperatur als Mittelwert. Dies ist möglich, da die mittleren Luftgeschwindigkeiten sämtlich kleiner als 0,2 m/s waren.

Aus den gemessenen Raumklimakennwerten Lufttemperatur, mittlerer Strahlungstemperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und den personenbezogenen Kennwerten Metabolismus und Bekleidungs-dämmwert berechnet sich das PMV (Predicted Mean Vote) nach Fanger [DIN EN ISO 7730: 1995, ISO 7730: 2003]. Aus der Beziehung von PMV und PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) bestimmt sich der vorhergesagte Prozentsatz Unzufriedener. Hierbei wird sowohl der Ansatz von Fanger [DIN EN ISO 7730: 1995; ISO 7730: 2003] als auch der Ansatz von Mayer [Mayer 1998] berücksichtigt. Da zu dem frei belüfteten Gebäude 10 keine Messwerte der mittleren Luftgeschwindigkeit vorlagen, wird hier der Mittelwert aller frei belüfteten Gebäude angesetzt. So können die genannten Kennwerte auch für dieses Gebäude berechnet werden.

Des Weiteren wird für jeden Angestellten die optimale operative Temperatur nach verschiedenen Normen oder Bewertungsansätzen berechnet:

- mit einem PMV = 0 nach [DIN EN ISO 7730: 1995, ISO 7730: 2003]
- mit einem PMV = 0,4 nach [Mayer 1998]
- nach ASHRAE Standard 55 [ASHRAE 2004] für frei belüftete Arbeitsplätze bei mittleren monatlichen Außentemperaturen über 10 °C und abgeleitet aus dem Gültigkeitsbereich des ASHRAE Standards 55 bei Temperaturen unter 10 °C wie für mechanisch belüftete Arbeitsplätze
- für mechanisch belüftete Arbeitsplätze nach [Morgan et al. 2002]

- nach Niederländischer Richtlinie [Boerstra et al. 2003; van Hoof, Hensen 2005] für alle Arbeitsplätze in Abhängigkeit von der Art der Belüftung.

Diese Werte dienen dem Vergleich mit den wirklich gemessenen Werten.

4.4 Bewertung des Umgebungsklimas mit Befragungen

Da in ProKlimA-Projekt sämtliche Fragen zur momentanen Einschätzung des Raumklimas auf einer 5-stufigen Skala erhoben wurden und sowohl Fanger als auch Mayer mit einer 7-stufigen Skala arbeiten (siehe Bild 4), muss die 7-stufige Skala in eine 5-stufige transformiert werden. Dabei werden die äußeren Pole „heiß“ und „kalt“ der 7-stufigen Skala den äußeren Polen „sehr warm“ und „sehr kalt“ der 5-stufigen Skala gleichgesetzt. Nach [EN ISO 10551: 2002] können die Skalen zur Abfrage des thermischen Empfindens als intervallskaliert angesehen werden. Im ProKlimA-Projekt wird dies in der Auswertung ebenso gehandhabt.

4.5 Statistische Methoden

Dieser Abschnitt soll einerseits dazu dienen, die in dieser Arbeit angewandten statistischen Methoden zu erläutern. Andererseits sollen dem Nicht-Statistiker Erläuterungen von üblichen statistischen Darstellungsformen und Ergebnissen gegeben werden, die bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse unerlässlich sind.

Eine statistische Analyse wird in zwei Schritten durchgeführt. Mit der deskriptiven (beschreibenden) Statistik (Abschnitt 4.5.1) werden Eigenschaften der Merkmale in einer Stichprobe (z.B. die befragten Angestellten in 14 Bürogebäuden) zu einem bestimmten Zeitpunkt beschrieben. Die Ergebnisse der deskriptiven Statistik sagen ausschließlich etwas über die Stichprobe aus, die untersucht wurde. Ziel ist es aber, Ergebnisse einer Untersuchung an einer Stichprobe auf eine Population (Gesamtheit: z.B. alle Angestellten in Bürogebäuden in Deutschland) zu übertragen. Die induktive (schließende) Statistik (Abschnitt 4.5.2) fasst die Stichprobe als repräsentative Teilmenge einer Population auf. Signifikanztests ermöglichen es mit einer gewissen Fehlerwahrscheinlichkeit von den Verhältnissen in der Stichprobe auf die Verhältnisse in der Population zu schließen [Nachtigall, Wirtz 2002-1]. In den Abschnitten 4.5.3 bis 4.5.7

werden die in der Arbeit angewendeten Verfahren und Tests erläutert. Die Verfahren bestehen in der Regel aus einem deskriptiven und einem induktiven Teil.

Der Skalentyp der Variablen ist für die richtige Anwendung von statistischen Methoden entscheidend. Es werden Nominalskala, Ordinalskala, Intervallskala unterschieden. Tabelle 7 zeigt Beispiele für unterschiedliche Skalentypen. Nominale Merkmale mit nur zwei Ausprägungen werden auch als dichotom (z.B. das Geschlecht: männlich, weiblich) bezeichnet. Bei ordinalen Skalen sind die Kategorien in einer auf- oder absteigenden Reihenfolge angeordnet. Intervallskalierte Daten besitzen zusätzlich zwischen den einzelnen Kategorien den gleichen Abstand.

Skalentyp	Beispiel
nominal	Anlagenart: Fensterlüftung Teilklimaanlage Klimaanlage
ordinal	Zufriedenheit: unzufrieden eher unzufrieden eher zufrieden ziemlich zufrieden sehr zufrieden
intervallskaliert	Messwerte der Raumtemperatur in °C

Tabelle 7 Beispiele für verschiedene Skalentypen.

4.5.1 Deskriptive Statistik

Die beschreibende (deskriptive) Statistik soll dazu dienen, die Verhältnisse in einer Stichprobe zu charakterisieren. Dazu können einige statistische Maßzahlen bestimmt und Diagramme erstellt werden.

Eine erste einfache Beschreibung der Stichprobe kann durch Häufigkeiten geschehen: „1596 von 4460 Angestellten beurteilten die Temperatur als sehr oder eher unbehaglich.“ oder „Während in den frei belüfteten Gebäuden 20% der Personen die Temperatur als sehr oder eher unbehaglich einstufen, waren dies in den teilklimatisierten 34% und in den klimatisierten 54%.“

Lagemaße kennzeichnen die Lage des Zentrums einer Verteilung. Der Median ist für mindestens ordinalskalierte Daten solch ein Lagemaß. Der Median halbiert die Stichprobenverteilung. 50% der Werte sind kleiner oder gleich und 50% der Werte sind größer oder gleich dem Median. Der arithmetische Mittelwert wird für intervallskalierte Daten (z.B. Mittelwert der Raumtemperatur) angewendet.

Streuungsmaße charakterisieren die Variabilität eines Merkmals. Aus Streuungsmaßen lässt sich ablesen, wie homogen eine Stichprobe ist oder wie ähnlich Befragte einer Stichprobe hinsichtlich eines gemessenen oder befragten Merkmals sind.

Ein wichtiges Streuungsmaß für mindestens ordinalskalierte Daten ist der Quartilabstand: die Differenz zwischen dem ersten Quartil (25 % der Daten) und dem dritten Quartil

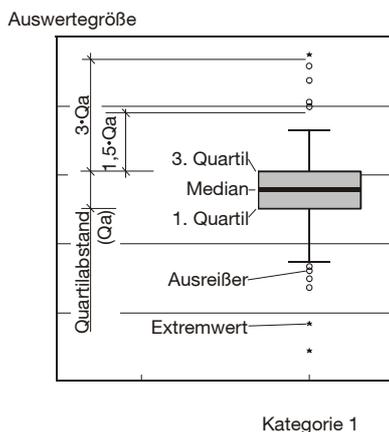


Bild 16 Erläuterung zum Inhalt von Boxplotdiagrammen.

(75 % der Daten) einer Verteilung. Für intervallskalierte Daten stellt die Varianz, als durchschnittliche quadrierte Abweichung der Einzelwerte vom arithmetischen Mittel, eine häufige Maßzahl für die Streuung dar. Die Standardabweichung ist der Betrag der Quadratwurzel der Varianz.

Eine übliche Darstellungsform sind so genannte Boxplots. In dieser Darstellung können die wichtigsten Lage- und Streuungsmaße zusammengefasst werden. Je nach verwendetem statistischem Auswerteprogramm können die Definitionen variieren. Da die vorliegenden Untersuchungen mit dem Auswerteprogramm [SPSS 2003] durchgeführt wurden, bezieht sich die folgende Definition auch auf [SPSS 2003]. Die Box umfasst dabei den Median, das erste Quartil sowie das dritte Quartil (Bild 16). Die Box repräsentiert damit 50% der Daten. Ausgehend vom ersten und dritten Quartil werden zwei Grenzen mit einem Abstand von $1,5 \times$ Quartilabstand markiert. Werte, die außerhalb dieser Grenze aber innerhalb des dreifachen Quartilabstandes liegen, werden als Ausreißer bezeichnet. Werte die außerhalb des dreifachen Quartilabstandes liegen, werden als Extremwerte gekennzeichnet. Nähere Angaben zur deskriptiven Auswertung von Daten können beispielsweise [Nachtigall, Wirtz 2002-1] und [Kreienbrock, Schach 2000] entnommen werden.

4.5.2 Induktive Statistik

Die induktive (schließende) Statistik ermöglicht den Schluss von der Stichprobe auf die Population. Dabei gilt es nach [Nachtigall, Wirtz 2002-1] eine Antwort auf folgende Fragen zu geben:

- Sind die in der Stichprobe gefundenen Zusammenhänge oder Unterschiede auch allgemein gültig?
- Sind die gefundenen Zusammenhänge oder Unterschiede in der Stichprobe nur Zufall oder handelt es sich um systematische Unterschiede?

Die nach Analyse des allgemeinen Wissensstandes aufgestellten inhaltlichen Hypothesen (z.B. Gibt es Unterschiede in der thermischen Behaglichkeit von Personen in frei belüfteten Räumen und Personen in klimatisierten Räumen?) werden in statistische Hypothesen übersetzt. Die Alternativhypothese stellt inhaltlich das dar, was vermutet wird und eine Erweiterung des vorhandenen Wissens ist. Im Gegenteil dazu wird eine Nullhypothese aufgestellt. Nullhypothesen unterstellen, dass es keine Zusammenhänge oder

keinen Unterschied gibt. Der Signifikanztest ist das Verfahren, mit dem entschieden wird, ob die Nullhypothese (bisheriger Wissensstand) beibehalten wird oder ob sie verworfen wird und dann die Alternativhypothese angenommen wird.

Im Signifikanztest wird daher bestimmt, wie groß die Fehlerwahrscheinlichkeit p für das zufällige Zustandekommen der gefundenen Zusammenhänge oder Unterschiede unter Annahme der Nullhypothese ist. Liegt die berechnete Wahrscheinlichkeit unterhalb einer zuvor festgelegten Schranke (Signifikanzniveau), dann wird die Nullhypothese verworfen. Es erfolgt eine Entscheidung für die Alternativhypothese. Das Signifikanzniveau α ist der festgelegte Schwellenwert für die Wahrscheinlichkeit p einer falschen Annahme (Fehlerwahrscheinlichkeit) der Alternativhypothese [Nachtigall, Wirtz 2002-2]. In der vorliegenden Arbeit wird das Signifikanzniveau α , wie in vergleichbaren Arbeiten üblich, mit 5% festgelegt. Wird davon abgewichen, so wird darauf hingewiesen.

Für das Testen von Unterschieden und Zusammenhängen auf Signifikanz gibt es eine Reihe von Testverfahren. Es werden in den folgenden Abschnitten die verwendeten Verfahren kurz vorgestellt.

4.5.3 Chi²-Anpassungstest

Der Chi²-Anpassungstest dient der Analyse von Häufigkeiten. Mit dem Chi²-Anpassungstest wird die Häufigkeitsverteilung der untersuchten Zielgröße mit einer theoretisch erwarteten Häufigkeitsverteilung verglichen [Sachs 1999]. Eine theoretisch erwartete Häufigkeitsverteilung kann mit einer Vorhersagemethode wie z.B. der PPD-Methode nach Fanger (Abschnitt 2.2.3) ermittelt werden.

4.5.4 Vergleich von Werten der zentralen Tendenz

Rangtests

Die zentrale Tendenz (hier: Median) von zwei unabhängigen Stichproben mit ordinaler Skala kann mit einem Rangtest verglichen werden. Dazu wird der Wilcoxon-Test angewendet. Dabei werden die Daten der zwei Stichproben in einer gemeinsamen Rangreihe, also ihrer Größe nach, angeordnet. Bei einer Anzahl von z.B. 10 Werten in jeder der zwei Stichproben erhält der kleinste Wert den Rangplatz 1 und

der größte Wert den Rangplatz 20. Wenn die Mediane der ersten und der zweiten Stichprobe gleich sind, dann wären für die Stichproben ungefähr gleich viele kleine und große Rangplätze zu erwarten [Nachtigall, Wirtz 2002-2].

Varianzanalyse

Die Varianzanalyse dient dem Testen von Mittelwertunterschieden bei zwei oder mehr als zwei Stichproben (F-Test). Die Nullhypothese besagt, dass sich die Mittelwerte in den Stichproben nur zufällig unterscheiden und in der Population keine Mittelwertunterschiede vorliegen. Die Alternativhypothese dagegen sagt, dass mindestens einer der Mittelwerte sich nicht zufällig von den anderen Mittelwerten unterscheidet. Um eine Varianzanalyse durchführen zu können, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein [Nachtigall, Wirtz 2002-2]:

- unabhängige Stichproben
- intervallskalierte Variable
- Normalverteilung der Stichproben
- Gleichheit der Varianzen der Stichproben

Die Gleichheit der Varianzen von mehr als zwei Stichproben wird mit dem Levene-Test überprüft. Dabei wird ein Signifikanzniveau von 10% herangezogen. Mit Hilfe von Kontrasten können innerhalb einer Varianzanalyse auch Mittelwerte von zwei bestimmten Stichproben getestet werden. Für den Fall nicht homogener (nicht gleicher) Varianzen können Mittelwertunterschiede mit dem Welch-Test getestet werden.

Konnte gezeigt werden, dass die Mittelwertunterschiede signifikant sind, so bleibt immer noch die Frage, ob diese Mittelwertunterschiede überhaupt relevant sind. Mit dem Effektstärkemaß d kann für normalverteilte Stichproben mit homogenen Varianzen beurteilt werden, wie stark sich Mittelwerte unterscheiden [Nachtigall, Wirtz 2002-1]. Es gilt:

- $d = 0,2$ schwacher Effekt
- $d = 0,5$ mittlerer Effekt
- $d = 0,8$ starker Effekt

t-Test für gepaarte Stichproben

Liegen für Personen jeweils gemessene Werte wie z.B. Raumtemperaturen und vorhergesagte Werte wie z.B. opti-

male Raumtemperaturen vor, so handelt es sich um gepaarte Stichproben. Sollen Messwerte und Vorhersage verglichen werden, um so eine Aussage über die Vorhersagegüte einer Methode machen zu können, so wird der t-Test für gepaarte Stichproben angewendet. Die Stichproben selbst müssen nicht normalverteilt sein. Die Paardifferenzen sollten annähernd normalverteilt sein [Sachs 1999]. Die Gleichheit der Varianzen ist keine Voraussetzung. Es wird auf dem 10% Signifikanzniveau getestet.

4.5.5 Zusammenhangsanalyse

Um Zusammenhänge zwischen zwei Variablen entdecken zu können, bedient man sich der Kreuztabellierung (Beispiel siehe Tabelle 8) und der Kontingenzanalyse (Zusammenhangsanalyse). Die Analyse dient dazu festzustellen, ob ein Zusammenhang zwischen zwei Variablen erkennbar, signifikant und praktisch relevant ist. Der Vorteil einer Zusammenhangsanalyse gegenüber anderen Verfahren ist, dass ordinale Variablen auf Zusammenhänge mit nominalen Variablen hin untersucht werden können.

Dazu wird der Kontingenzkoeffizient CC verwendet. Dieser Wert liegt zwischen 0 und einem maximalen Wert CC_{max} , der eine Funktion von maximaler Zeilen bzw. Spaltenzahl in einer Kreuztabelle ist. Um auch Kontingenzkoeffizienten von Variablen mit unterschiedlicher Kategorienganzahl miteinander vergleichen zu können, wird der Kontingenzkoeffizient CC auf den Maximalwert CC_{max} bezogen und so der korrigierte Kontingenzkoeffizient CC_{kor} gebildet [Sachs 1999]. Dieser Wert liegt nun zwischen 0 (kein Zusammenhang) und 1 (perfekter Zusammenhang). Ist ein möglicher Zusammenhang aufgedeckt worden, so kann mit dem Chi²-Unabhängigkeitstest der Frage nachgegangen werden, ob der Zusammenhang zufällig in der Stichprobe aufgetreten ist, oder ob ein nicht zufälliger Zusammenhang vorliegt [Backhaus et al. 2003].

Tabelle 8 zeigt ein Beispiel einer Kreuztabellierung. In den Spalten befinden sich die Antwortkategorien der Variable: „Einfluss auf die Raumtemperatur möglich?“ und den Zeilen die drei Kategorien der Anlagenart. Die sich ergebenden Zellen enthalten die Anzahl der Personen, die beispielsweise in einem Raum mit Fensterlüftung arbeiten und angeben, auf die Raumtemperatur Einfluss nehmen zu können. Das sind im Beispiel 1593 Personen von insgesamt 4494 Per-

Anlagenart	Einfluss auf die Raumtemperatur möglich?		
	ja	nein	gesamt
Fensterlüftung	1593 (87%)	233 (13%)	1826 (100%)
Teilklimaanlage	426 (44%)	553 (56%)	979 (100%)
Klimaanlage	555 (33%)	1134 (67%)	1689 (100%)
Gesamt	2574 (57%)	1920 (43%)	4494 (100%)

Tabelle 8 Beispiel für eine Kreuztabelle von zwei nominalen Variablen: Anlagenart und Einfluss auf die Raumtemperatur.

sonen, die an der Befragung teilgenommen haben. Bei Fensterlüftung gaben 1593 von 1826 Personen an, Einfluss auf die Raumtemperatur nehmen zu können. Bei Räumen mit Teilklimaanlage waren 426 von 979 Personen. Waren die Gebäude mit Klimaanlage ausgestattet, waren es nur 555 von 1689 Personen. Bei Fensterlüftung gaben also 87% der Personen an Einfluss nehmen zu können. Bei einer Ausstattung mit Teilklimaanlage waren es 44% und mit Klimaanlage nur 33%. Ob eine Person also angibt Einfluss auf die Raumtemperatur zu haben, hängt offensichtlich mit der anlagentechnischen Ausstattung zusammen. Im Beispiel von Tabelle 8 ergibt sich ein Kontingenzkoeffizient CC von 0,453 bei einem CC_{\max} von 0,707. Der korrigierte Kontingenzkoeffizient CC_{kor} berechnet sich zu 0,64. Der Zusammenhang ist signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,001$ auf dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ und als stark einzustufen.

4.5.6 Faktorenanalyse

Wenn viele inhaltlich ähnliche Variablen in den Daten vorhanden sind, die paarweise stark miteinander zusammenhängen, kann es sinnvoll sein, für weitere Analysen (z.B. logistische Regression) die Variablen zu wenigen neuen Faktoren zusammenzufassen. Die Anzahl der im Fragebogen zum Thema momentane Bewertung des Raumklimas (Anhang 1) enthaltenen Variablen kann mit einer Faktorenanalyse reduziert werden. Die Faktorenanalyse erkennt Gruppen von Variablen, die ähnliche Informationen erfassen. Voraussetzung für die Durchführung einer Faktorenanalyse sind Variablen auf dem Intervallskalenniveau. Im Folgenden sollen nur die in der Arbeit angewandten Auswahl- und Bewertungskriterien aufgeführt werden. Details zur Faktorenanalyse sind in [Backhaus et al. 2003; Nachtigall, Wirtz 2002-1] zu finden.

Zuerst müssen die Variablen auf eine Eignung für eine Faktoranalyse hin untersucht werden. Prüfkriterien wie das Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium erlauben dies. Das Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium hat einen Wertebereich zwischen Null und 1. Werte des Kaiser-Meyer-Olkin-Kriteriums unter 0,5 werden als untragbar angesehen, Werte über 0,7 als gut. Das Kriterium erlaubt sowohl eine Beurteilung der Gesamtheit der Variablen in der Faktorenanalyse als auch eine Beurteilung einzelner Variablen.

In dieser Arbeit wird als Methode die Hauptkomponentenanalyse (in Verbindung mit einer Varimax-Rotation) ange-

wendet. Für die Wahl der Anzahl der neuen Faktoren gibt es mehrere Kriterien. Zuerst besteht die Aufgabe, dass die neuen Faktoren nicht nur statistisch „gute“ Werte liefern, sondern auch inhaltlich interpretierbar sind. Kriterien für Anzahl der Faktoren sind:

- Nach dem Kaiser-Kriterium werden nur Faktoren extrahiert, die so genannte Eigenwerte größer 1 besitzen. Denn nur solche Faktoren erklären mehr Varianz als eine der Ursprungsvariablen.
- Die Zahl der Faktoren soll kleiner sein als die Hälfte der Zahl der Variablen.
- Scree-Plot: Die so genannten Eigenwerte der Faktoren werden in abnehmender Reihenfolge in einem Diagramm aufgetragen. Ein deutlicher Sprung in der Grafik bestimmt die Anzahl der Faktoren.

Wie gut die neuen Faktoren die Ausgangsvariablen abbilden, kann anhand verschiedener Kenngrößen überprüft werden. Die Gesamtvarianz gibt an, wieviel der jeweilige neue Faktor an Erklärung in Bezug auf alle Ausgangsvariablen besitzt. Eine weitere wichtige Größe ist die Kommunalität der Ausgangsvariablen. Sie gibt an, welcher Anteil der Varianz der Ausgangsvariablen durch die neuen Faktoren erklärt werden kann. Werte unter 0,5 deuten auf eine vergleichsweise schlechte Erklärung der Variablen durch die gefundenen Faktoren hin.

Statistikprogramme schätzen innerhalb einer Faktorenanalyse die Werte der neuen Faktoren für jede Person. Allerdings ist es üblich, die Werte der neuen Faktoren als Summenwerte aus den zugeordneten Ausgangsvariablen zu bilden. Dies hat den Vorteil, dass auch für Personen aus einer anderen Stichprobe die neuen Faktoren als Summenwerte aus Einzelvariablen berechnet werden können, ohne eine neue Faktorenanalyse durchführen zu müssen. Zwischen den geschätzten Faktorwerten und den Summenwerten kann die Faktorkongruenz berechnet werden. Diese zeigt die Stärke des Zusammenhangs (Korrelation) zwischen geschätztem Faktorwert und Summenwert an. Korrelationswerte von 0,85 werden hier als gut angesehen.

4.5.7 Logistische Regression

Die logistische Regression ermöglicht es gegenüber der klassischen Regression nicht nur intervallskalierte, ordinale und nominale Einflussgrößen zu berücksichtigen. Auch die Zielgröße kann bei der logistischen Regression eine Nominalskala besitzen. Mit dem Verfahren der logistischen Regression sollen in dieser Arbeit nicht-thermische Einflussgrößen auf die Zielgrößen thermisches Empfinden und thermische Behaglichkeit in ihrer Wirkung überprüft werden. Mögliche Unterschiede zwischen thermischem Empfinden und thermischer Behaglichkeit einerseits und den Belüftungsarten andererseits sollen erkannt werden. Die mit der logistischen Regression entwickelten Modelle weisen die auf die Zielgrößen wirkenden wichtigen Einflussgrößen mit ihrer Einflussstärke aus.

In der vorliegenden Arbeit werden Modelle untersucht, bei denen die Zielgröße dichotom ist. Dabei bekommen die zwei Kategorien der Zielgröße z.B. für thermisches Empfinden die Zuordnungen „sehr warm“ und „nicht sehr warm“. Es werden im Folgenden anhand eines fiktiven Beispiels Hinweise für die Interpretation der Ergebnisse einer logistischen Regressionsanalyse gegeben. Daran schließt sich eine Darstellung der in der Arbeit angewendeten Methoden bei der Durchführung der logistischen Regressionsanalyse an.

Beispiel

Im Beispiel soll herausgefunden werden, welche Größen Einfluss auf die Chance einer Person nehmen, eine Umgebung als sehr warm einzuschätzen. Für das Modell werden für nominale Einflussgrößen so genannte Dummy-Variablen gebildet [Andreß et al. 1997]). Für die Variable akustische Güte, die aus drei Kategorien besteht:

- niedrige akustische Güte
- mittlere akustische Güte
- hohe akustische Güte

ergeben sich zwei Dummy-Variablen wie folgt:

- keine niedrige akustische Güte = 0
niedrige akustische Güte = 1
- keine mittlere akustische Güte = 0
mittlere akustische Güte = 1
- hohe akustische Güte = Referenzgruppe.

Die Kategorie hohe akustische Güte wird hier als Referenzkategorie für die beiden anderen Kategorien benutzt. Es wird also untersucht, wie sich eine niedrige oder mittlere akustische Güte im Gegensatz zu einer hohen akustischen Güte auf die Chance einer Person auswirken, sich sehr warm zu fühlen.

In der Modellbildung haben sich im Beispiel folgende Größen als Einflussgrößen herausgestellt:

- 1 – niedrige akustische Güte
- 2 – mittlere akustische Güte
- 3 – schlechte Lichtverhältnisse
- 4 – mittlere Lichtverhältnisse
- 5 – Überempfindlichkeit gegenüber Wärme

Bild 17 zeigt das Ergebnis der Modellbildung. Im Diagramm ist auf der Abzisse das so genannte Odds Ratio für jede Einflussgröße aufgetragen. Das Odds Ratio einer Einflussgröße ist der transformierte Regressionskoeffizient dieser Einflussgröße im logistischen Modell. Das Odds Ratio (OR, Chancen-Verhältnis) spiegelt die Chance wider, eine Umgebung sehr warm im Vergleich zu nicht sehr warm einzuschätzen. Das Odds Ratio kann Werte zwischen Null und ∞ annehmen. Für das OR, das selbst ein geschätzter Wert ist, werden 95%-Vertrauensintervalle angegeben. Sie geben den Bereich an, in dem der wahre Wert mit 95%iger Wahrscheinlichkeit liegt [Nachtigall, Wirtz 2002-2]. Die Vertrauensintervalle sind in Bild 17 ebenfalls eingezeichnet.

Der Wertebereich von Null bis 1 kennzeichnet Odds Ratios, die die Chance verringern, dass Personen sich sehr warm fühlen. Sie wirken also dem Sehr-Warm-Empfinden entgegen. Dies trifft auf die in Bild 17 dargestellten Einflussgröße 3 schlechte Lichtverhältnisse zu. Odds Ratios in dem Wertebereich von 1 bis ∞ bedeuten, dass die Einflussgröße die Chance von Personen erhöht sich sehr warm zu fühlen. Dies trifft auf die Einflussgrößen 1 niedrige akustische Güte und 5 überempfindlich gegen Wärme zu.

Rot dargestellte Odds Ratios sind signifikant wie im Bild z.B. die Einflussgrößen 1, 3 und 5. Blau dargestellt sind die Einflussgrößen, die sich nicht signifikant zeigten. Nicht signifikant sind alle die Odds Ratios, die in ihrem Vertrauensintervall den Wert 1 einschließen. Die Einflussgröße 2 – mittlere akustische Güte schließt den Wert von 1 recht genau in der Mitte des Vertrauensintervalls ein. Daher kann ange-

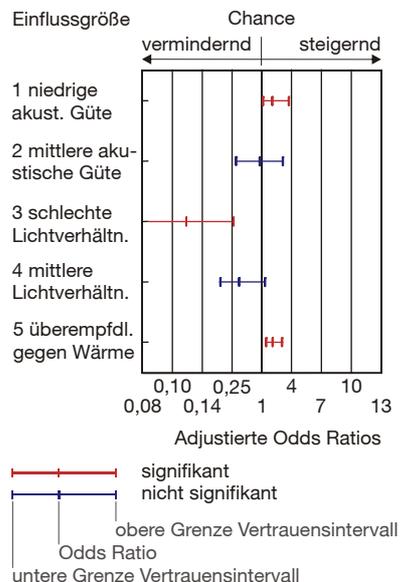


Bild 17 Fiktives Beispiel für die Ergebnisdarstellung einer logistischen Regressionsanalyse. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, eine Umgebung als sehr warm zu empfinden.

nommen werden, dass die mittlere akustische Güte im Verhältnis zur Referenzgröße hohe akustische Güte die Chance sich sehr warm zu fühlen nicht beeinflusst. Anders stellt es sich mit der Einflussgröße 4 – mittlere Lichtverhältnisse dar. Der Wert 1 wird hier ganz am Rand des Vertrauensintervalls eingeschlossen. Die Einflussgröße ist zwar nicht signifikant, jedoch zeigt ihre Wirkungsrichtung eher eine Chance mindernde Wirkung an. In Verbindung mit der Einflussgröße 3 – schlechte Lichtverhältnisse kann hier von einer Art „Dosis-Wirkungs-Beziehung“ ausgegangen werden. Auffällig bei der Einflussgröße 3 ist das sehr große Vertrauensintervall. Es ist so groß, dass die untere Grenze aus dem im Bild dargestellten Wertebereich der Abzisse herausfällt. Solche Effekte können entstehen, wenn nur sehr wenige Personen gleichzeitig mit „sehr warm“ und mit „schlechte Lichtverhältnisse“ geurteilt haben. In diesem Fall ist der genaue Wert des Odds Ratios als sehr weich anzusehen. Das Vertrauensintervall der Einflussgröße 5 – überempfindlich gegen Wärme ist dagegen kleiner und der Wert des Odds Ratios ist damit genauer bestimmt.

Bei der Interpretation des Odds Ratios ist zu beachten, dass der Wertebereich von 0 bis 1 in seiner Bedeutung genauso groß (weit) ist wie der Wertebereich von 1 bis ∞ . Aus diesem Grund wurde der Bereich von 0 bis 1 in der Darstellung aufgeweitet. So entspricht die Wirkungsstärke eines Odds Ratios von 0,5 der Wirkungsstärke eines Odds Ratios von 2 nur mit entgegengesetzter Wirkungsrichtung. Ein OR von 0,14 entspricht demnach einem OR von 7 usw.. Der in der Abzissenbeschriftung untergebrachte Hinweis adjustiert bedeutet: In das logistische Modell wurden so genannte Störgrößen (Confounder) mit aufgenommen. Bei diesen wird davon ausgegangen, dass sie auf die Zielgröße wirken, aber selbst nicht Ziel der Untersuchung sind. Solche Variable sind z.B. das Alter und das Geschlecht. Die Odds Ratios der Einflussgrößen nennt man dann auf das Alter und Geschlecht adjustierte Odds Ratios.

Vorgehen bei der Modellbildung

Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Modellbildung erläutert und die angewendeten Prüfkriterien genannt. Die Modelle werden gebildet auf Basis der Daten zum Untersuchungszeitpunkt 1. Nach Abschluss der Modellbildung erfolgt eine Modellverifizierung an Daten des Untersuchungszeitpunktes 2.

Zuerst werden die möglichen Einflussgrößen aus inhaltlicher Sicht zusammengestellt. Dann werden mit Hilfe der Zusammenhangsanalyse nach Abschnitt 4.5.5 und der Faktorenanalyse nach Abschnitt 4.5.6 die Einflussgrößen bestimmt, die einen bedeutenden Einfluss auf die Zielgrößen haben könnten. Jede ausgewählte Variable wird in ein bivariates logistisches Modell aufgenommen. In einem bivariaten Modell ist nur je eine Einflussgröße auf die jeweilige Zielgröße enthalten. Nach [Hosmer Lemeshow 2000] werden mit den Ergebnissen der bivariaten Modelle die Variablen als Einflussgrößen ausgewählt, die im sogenannten Likelihood-Ratio-Test (LR-Test) Wahrscheinlichkeiten von $p < 0,25$ erreichen. Alle mit diesem Test ausgewählten Größen werden in ein gemeinsames erstes logistisches Modell aufgenommen. Dann werden alle Variablen einzeln aus dem Modell herausgenommen und das jeweils um eine Variable reduzierte Modell mit dem ersten Modell verglichen. Dies erfolgt mit dem Likelihood-Quotienten-Test auf einem Signifikanzniveau von 10% Irrtumswahrscheinlichkeit. Auf diese Weise werden alle wichtigen Variablen herausgefunden und in ein zweites Modell aufgenommen. Dieses Modell kann abhängig von der Modellgüte schon das Endmodell sein.

Mit der Prüfung der Modellgüte eines logistischen Modells insgesamt soll die Frage beantwortet werden, wie gut die in das Modell aufgenommenen Einflussgrößen in ihrer Gesamtheit zu einer guten Vorhersage der Ausprägungen der Zielgröße beitragen. Dazu wird in der Arbeit auf die folgenden Gütekriterien zurückgegriffen, wobei die allgemeine Zuordnung zu Gütekriteriengruppen in Klammern aufgeführt ist:

- Likelihood Ratio-Test (Gütekriterium auf Basis der Log-Likelihood-Funktion)
- Hosmer-Lemeshow-Test, Klassifikationstabelle (Beurteilung der Klassifikationsergebnisse)
- Nagelkerke- R^2 (Pseudo- R^2 -Statistiken)

Der Likelihood-Ratio Test bildet die Differenz einer Testgröße des vollständigen Modells (Modell mit allen Einflussgrößen) und der gleichen Testgröße für das so genannte Null-Modell. Das Null-Modell enthält keine Einflussgrößen und besteht allein aus einer Konstanten. Die Differenz der beiden Testgrößen wird mit einer Prüfgröße verglichen.

Der Hosmer-Lemeshow-Test prüft die Abweichungen zwischen beobachteter Kategoriezuordnung (z.B. sehr warm) und der vorhergesagten Kategoriezuordnung. Dazu werden die für jede Person geschätzten Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung zur Kategorie „sehr warm“ in 10 gleich große Gruppen aufgeteilt. Mit einem Chi²-Test wird überprüft, inwieweit sich die beobachteten und erwarteten Häufigkeiten in den Gruppen unterscheiden. Allerdings ist hier die Wunschhypothese die Nullhypothese (= keine Unterschiede zwischen Beobachtung und Vorhersage). Der Test sichert gegen eine falsche Annahme der Alternativhypothese ab. Daher wird das Signifikanzniveau α mit 10% gewählt [Nachtigall, Wirtz 2002-2; Sachs 1999].

Mit Klassifikationstabellen werden ebenfalls die Abweichungen zwischen beobachteter Kategoriezuordnung und der vorhergesagten Kategoriezuordnung geprüft. Dabei erfolgt bei einer Wahrscheinlichkeit für eine Person sich z.B. sehr warm zu fühlen von kleiner als 0,5 eine Zuordnung zur Kategorie „nicht sehr warm“. Ist die Wahrscheinlichkeit größer als 0,5 erfolgt die Zuordnung zur Kategorie „sehr warm“. Da der Test in seiner Anwendung aufgrund des genannten Zuordnungskriteriums kritisch gesehen wird [Hosmer, Lemeshow 2000], wird diese Testgröße in der Arbeit nur als zusätzliches Kriterium für die Bewertung der Modellgüte herangezogen. Neben dem Likelihood-Ratio-Test wird aber der Hosmer-Lemeshow-Test als wichtigste Beurteilungsgröße herangezogen.

Die Pseudo-R²-Statistiken (hier Nagelkerke-R²) versuchen, den Anteil erklärter Abweichungen des logistischen Modells von der Beobachtung zu quantifizieren. Das Nagelkerke-R² ist so definiert, dass es ein Maximum von 1 erreichen kann. Die Anwendung ist aber umstritten [Hosmer, Lemeshow 2000]. Daher wird in dieser Arbeit als das wichtigste Gütekriterium der Hosmer-Lemeshow-Test angewendet.

Neben der Modellgüte müssen auch die einzelnen Einflussgrößen auf ihre Trennfähigkeit bezogen auf die zwei Kategorien der Zielvariablen untersucht werden. Dazu werden zwei Verfahren verwendet: Der Likelihood-Quotienten-Test untersucht durch Entfernen einer Variablen aus dem Modell und Vergleich mit dem vollständigen Modell deren Trennfähigkeit. Die Prüfung erfolgt wie bereits beim Likelihood-Ratio-Test beschrieben. Das zweite Verfahren ist die Wald-Statistik. Auch bei der Wald-Statistik wird die Nullhypothese getestet, dass die Effekte der Einflussgröße Null sind. Wird

die Wald-Statistik größer als die Prüfgröße (Chi²-Verteilung, $\alpha = 5\%$), hat die untersuchte Einflussgröße einen signifikanten Einfluss auf die Zielvariable.

Einzelheiten zum Vorgehen bei der logistischen Regression können [Andreß et. al 1997; Backhaus et al. 2003; Kreienbrock, Schach 2000; Hosmer, Lemeshow 2000] entnommen werden.

5. Ergebnisse zum Untersuchungszeitpunkt 1

5.1 Gebäude und Anlagen

Die untersuchten Gebäude sind zwischen 1900 und 1995 erbaut worden. 41% der Befragten arbeiten in Gebäuden mit Fensterlüftung. Mit Teilklimaanlage sind 22% und mit Klimaanlage 37% der untersuchten Arbeitsplätze ausgestattet. In den Gebäuden mit Klimaanlage lassen sich an 87% der Arbeitsplätze die Fenster nicht öffnen. Nur ein Gebäude befindet sich in ländlicher Umgebung. 55% der Befragten arbeiteten im öffentlichen Dienst und 45% der Befragten in privaten Unternehmen.

Gebäude	2		3	5	6	7		8	9	10	11	12	13			14		15	16	
Gebäudeteil	1	2	-	-	-	1	2	-	-	-	1+2	-	1	2	3	1	2	-	-	
Baujahr	1972	1988	1977	1974	1900	1992	1992	1988	1973	1982	1994	1959	1965	1987	1994	1995	1920	1972	1988	
Betreiber	P	P	Ö	Ö	Ö	P	P	P	Ö	Ö	P	Ö	Ö	Ö	Ö	Ö	Ö	P	P	
Ort	KS	KS	GV	GZ	GZ	GZ	GZ	GV	GV	GZ	KS	GZ	KS	KS	KS	KS	KS	GZ	LD	
Anzahl Angestellter	204	40	400	600	449	180	240	450	1500	1030	233	550	176	260	200	270	609	500	700	
Anzahl Büros	20	20	202	128	177	116	44	128	261	600	187	500	103	115	134	154	74	96	130	
Anzahl Befragter	171	36	203	236	243	139	122	256	871	580	159	233	124	176	91	201	47	348	353	
Fenster öffnenbar	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
Bauweise	lei	lei	lei	lei	mit	mit	mit	lei	lei	mit	mit	lei	mit	mit	lei	mit	mit	lei	lei	
mittlerer Verglasungsanteil %	35	45	65	60	45	50	50	25	55	50	30	60	30	30	50	25	25	60	50	
Verschattung	in	au	au	au	au/ in/ kei	au	au	au/ kei	in	au/ kei	au/ kei	in	in	in	in	au/ kei	au	au	au	
Anlagenart	K	TK	K	K	F	F	F	TK	K	F	F	K	F	F/ (TK)	F	F	F	TK	TK	
Lüftungsprinzip	M	M	M	M	-	-	-	M	M	-	-	Q/M	-	-(M)	-	-	-	Q	M	
Luftführung im Raum	DD	DD	DD	DD/I	-	-	-	BD	DD/I	-	-	DU	-	-(DD)	-	-	-	DU	BD/I	
Befeuchtung	ja	ja	ja	ja	-	-	-	ja	ja	-	-	ja	-	-(ja)	-	-	-	ja	ja	
Kühltyp	L	L	L	L	-	-	-	-	L	-	-	L	-	-	-	-	-	W	L	
Heiztyp	L	W	W	L	W	W	W	W	L	W	W	L	W	W	W	W	W	W	L	
Wartungszustand*	3,30	2,20	2,60/ 3,22	3,33/ 3,67	-	-	-	1,50/ 1,63	2,13/ 2,33/ 2,38	-	-	2,22/ 2,33	-	-/ 2,25	-	-	-	1,56/ 1,67	2,33/ 2,43	
P	private Unternehmen				Ö öffentlicher Dienst															
GZ	Großstadt-Zentrum				GV Großstadt-Vorstadt				KS Kleinstadt				LD Ländlich							
lei	leichte Bauweise				mit mittelschwere Bauweise															
au	außen				in innen				kei keine											
K	Klimaanlage				TK Teilklimaanlage				F Fensterlüftung											
M	Mischlüftung																			
DD	Decke-Decke				I Brüstung (Induktion)				BD Boden-Decke				DU unten-Decke							
L	Luft																			
W	Wasser																			
*	ein niedriger Wert kennzeichnet eine insgesamt gut gewartete Anlage, Wertebereich: 1...5, Mittelwert aus verschiedenen Bewertungen des Anlagenzustandes																			

Tabelle 9 Kenndaten der untersuchten Gebäuden und Anlagen.

Der mittlere Verglasungsanteil der Hauptfassaden ist bei den frei belüfteten Gebäuden mit 41% ca. 10 Prozentpunkte geringer als bei den mechanisch belüfteten Gebäuden. Die

Gebäude mit raumluftechnischen Anlagen sind in leichter Bauweise ausgeführt im Gegensatz zu den frei belüfteten Gebäuden, die in mittel schwerer Bauweise erstellt wurden. Weitere Kennwerte der Gebäude und Anlagen zeigt Tabelle 9.

5.2 Stichprobenbeschreibung

Bevor einzelne raumklimabezogene Variablen hinsichtlich ihrer Unterschiede zwischen den Gebäuden oder Anlagenarten untersucht werden, ist es wichtig zu wissen, wie persönliche oder arbeitsbezogene Größen verteilt sind. Zeigten sich hier große Unterschiede, so müsste dies bei der Bewertung der weiteren Untersuchungen mit einbezogen werden. Anhang 2 zeigt im Überblick die wichtigsten soziodemografischen Kennwerte.

Der Anteil der Frauen ist in den einzelnen Gebäuden sehr unterschiedlich (min: 26%; max: 80%). Die Altersstruktur in den Gebäuden ist ebenfalls sehr verschieden. Der Anteil der unter 31-jährigen ist in den Gebäuden 9 und 15 deutlich höher (ca. 40%) als in den Gebäuden 2, 3, 10, 11, 12 mit ca. 27-30%. In den anderen Gebäuden liegt der Anteil unter 20%. Bei Gebäude 9 fällt außerdem der gegenüber den anderen Gebäuden sehr geringe Anteil (17%) an 31-40-jährigen auf. Der Anteil der Frauen an den unter 31-jährigen beträgt 74%. In den Gebäuden 2, 7, 8, 10, 11, 12 und 15 ist der Anteil der Personen mit Abitur oder Fachabitur höher als der Anteil der Personen mit mittlerer Reife bzw. Realschulabschluss.

Anhang 2 zeigt, dass auch bezogen auf die Anlagenart Unterschiede in der soziodemografischen Struktur in den Gebäuden bestehen. Die untersuchten Gebäude mit Klimaanlage besitzen mit 33% einen um 13 Prozentpunkte höheren Anteil an unter 31-jährigen als Gebäude mit ausschließlicher Fensterlüftung. Der Anteil an Frauen ist in den Gebäuden mit Klimaanlage ca. 4% höher als in den fenstergelüfteten Gebäuden. Der Anteil der Personen mit Abitur ist in den klimatisierten Gebäuden mit 34% um 12 Prozentpunkte geringer als in den fenstergelüfteten Gebäuden. Gebäude mit Fensterlüftung oder mit Teilklimaanlage haben zudem einen ca. 18 bzw. 15 Prozentpunkte höheren Anteil an Personen mit höherem Berufsabschluss.

Aus dem ProKlimA-Projekt ist bereits bekannt, dass der Anteil der Befindlichkeitsgestörten in den fenstergelüfteten

Gebäuden mit 28% am geringsten ist. Klimatisierte Gebäuden weisen ein Anteil von 49%, teilklimatisierte von 32% auf.

Bezüglich Arbeitszufriedenheit, Lebenszufriedenheit, arbeitsbezogener Beanspruchung, allgemeiner Beanspruchung und der Arbeitsauslastung bestehen keine deutlichen Mittelwertunterschiede. Auch nach Klassifizierung der Variablen (wie im ProKlimA-Projekt) ergeben sich keine deutlichen Unterschiede zwischen den Anlagenarten. Der Anteil der mit der Arbeit bzw. ihrem Leben Unzufriedenen ist in Gebäuden mit Klimaanlage etwas höher (6-7 Prozentpunkte bzw. 3-4 Prozentpunkte) im Vergleich zu Gebäuden mit Teilklimaanlage oder Fensterlüftung. Der Anteil der Personen mit hoher arbeitsbezogener Beanspruchung ist unbedeutend niedriger (1-2 Prozentpunkte) und der mit hoher Arbeitsauslastung etwas höher (7 Prozentpunkte) in klimatisierten Gebäuden.

Aus Untersuchungen des ProKlimA-Projektes ist auch bekannt, dass Frauen und Personen unter 31 Jahren öfter Befindlichkeitsstörungen berichten als andere Personen. Es kann vermutet werden, dass dies auch auf die Zielgrößen thermisches Empfinden und thermische Behaglichkeit zutrifft. Es muss also sichergestellt werden, dass unterschiedliche Aussagen bzgl. der Raumklimabeurteilung nicht mit einem hohen Frauenanteil oder vielen jungen Personen begründet sind.

5.3 Witterung während der Befragungen

An jedem Befragungstag wurden die Tagesmitteltemperatur der Außenluft und die laufende mittlere Außentemperatur bestimmt. Die laufende mittlere Außentemperatur bestimmt sich nach Abschnitt 4.2.1 aus den gewichteten Tagesmittelwerten des aktuellen Tages und der vergangenen drei Tage. Nach der laufenden mittleren Außentemperatur erfolgte die Einteilung in drei Jahreszeiten. Temperaturen über 12 °C wurden dem Sommer zugeordnet; Temperaturen von 0 °C bis 12 °C kennzeichnen die Übergangszeit und Temperaturen unter 0 °C den Winter. Die absolute und die relative Sonnenscheindauer sind zusätzlich aufgeführt (Tabelle 10).

Zu erkennen ist, dass nur in einem frei belüfteten Gebäude (Gebäude 6) die Personen im Sommer befragt wurden. In allen anderen frei belüfteten Gebäuden wurden die Befragungen in der Übergangszeit durchgeführt. Die mechanisch

belüfteten Gebäude wurden überwiegend im Sommer untersucht. Kein mechanisch belüftetes Gebäude wurde in der Übergangszeit untersucht und nur zwei Gebäude im Winter.

Gebäuden	9	8	7	13	14	11	10	5	3	12	2	15	6	16
Anzahl Angestellter	871	256	261	391	248	159	580	236	203	233	207	348	243	353
Tagesmitteltemperatur [°C]	-8,7	-4,8	7,6	4,4	9,8	7,2	10,8	11,9	10,0	15,2	13,9	19,1	18,0	20,2
laufende mittlere Außentemperatur [°C]	-6,7	-4,0	6,5	6,7	7,2	7,8	9,8	12,6	13,5	14,8	15,2	16,4	17,7	18,2
Sonnenscheindauer [h]	5,9	0,0	0,3	9,3	0,0	8,6	7,2	4,0	1,8	15,2	5,0	11,2	10,3	5,6
relative Sonnenscheindauer [-]	0,60	0,00	0,05	0,90	0,00	0,80	0,65	0,30	0,10	0,95	0,35	0,70	0,80	0,40
Jahreszeit	Winter		Übergangszeit					Sommer						

Tabelle 10 Anzahl der Befragten je Gebäuden und Witterung während der Befragung zum Untersuchungszeitpunkt 1. Grau hinterlegt sind die frei belüfteten Gebäude.

5.4 Beurteilung des Raumklimas

Die Befragung zur Raumklimabeurteilung erfolgte mit dem in Anhang 1 abgebildeten Fragebogen.

5.4.1 Beurteilung des momentanen Raumklimas

Die Analyse der Antworten auf die Frage „Wie beurteilen Sie gerade jetzt das Raumklima?“ weist deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Anlagenart, dem Alter und dem Geschlecht auf. Die zugehörigen Grafiken sind in Anhang 3 dargestellt.

Die Angestellten urteilen in klimatisierten Gebäuden zu ca. 1/3 sehr warm. Dies ist zwar vor dem Hintergrund zu sehen, dass die Messungen in den klimatisierten Gebäuden überwiegend bei höheren Außentemperaturen stattfanden. Allerdings weist das klimatisierte Gebäuden 9 mit der geringsten Außentemperatur den mit 43% höchsten Anteil an Personen auf, die mit sehr warm urteilten. In fenstergelüfteten und auch teilklimatisierten Gebäuden urteilen nur 13% bzw. 12% mit sehr warm. Auch das fenstergelüftete Gebäude 6 bzw. das teilklimatisierte Gebäude 16 mit den höchsten Außentemperaturen hatten nur 15% bzw. 6% mit sehr warm Urteilende. Frauen urteilen mit 15% etwas häufiger mit sehr bzw. eher kalt als Männer mit 8%, aber auch mit 22% etwas häufiger sehr warm als Männer mit 18%. Während Personen über 50 Jahren und Personen unter 31 Jahren zu 24% bzw. 26% mit sehr warm urteilen waren es bei den 31-50jährigen ca. 10 Prozentpunkte weniger.

Thermisches Empfinden:
warm – kalt

Während in den frei belüfteten Gebäuden 20% der Personen die Temperatur als sehr oder eher unbehaglich einstufen waren dies in den teilklimatisierten 34% und in den klimatisierten 54%. Besonders unbehaglich fühlen sich die

Thermische Behaglichkeit:
unbehagliche – behagliche
Temperatur

	<p>Personen in Gebäude 9 (66%). Frauen stufen mit 9 Prozentpunkten die Raumtemperatur etwas häufiger als unbehaglich ein als Männer. Zwar wird die Raumtemperatur von älteren und jüngeren Personen häufiger als sehr warm eingeschätzt als in den anderen Altersklassen. Jedoch empfinden nur die unter 31-jährigen die Raumtemperaturen häufiger als unbehaglich (45%) als die anderen Altersgruppen (31- 33%).</p>
Schwankende – gleichförmige Temperatur	<p>In den Gebäuden mit Klimaanlage beurteilen 51% die Temperatur als sehr oder eher schwankend. Im Vergleich dazu liegt der Anteil bei den Gebäuden mit Fensterlüftung nur bei 26%. Dies verwundert, werden doch raumlufttechnische Anlagen mit dem Ziel eines gleich bleibenden Raumklimas während der Nutzungszeit geplant. 43% der Frauen schätzen gegenüber 32% der Männer die Temperatur als eher schwankend ein. Junge Personen stufen die Temperatur mit 26% ca. 10 Prozentpunkte weniger oft als weder schwankend noch gleichförmig ein als die anderen Altersgruppen.</p>
Starke Luftbewegung (Zugluft) – schwache Luftbewegung (stickig)	<p>Bei Fensterlüftung urteilen nur 8% mit den Kategorien sehr starke Luftbewegung bzw. sehr schwache Luftbewegung. Ist das Gebäude teilklimatisiert, sind es 13% bei Klimatisierung jedoch 28%. Junge Personen beurteilen 2-3mal häufiger als andere Personen die Luftbewegung als sehr schwach. Frauen urteilen etwas häufiger mit sehr schwache bzw. sehr starke Luftbewegung als Männer.</p>
Trockene Luft – feuchte Luft	<p>Obwohl die klimatisierten Gebäude mit Befeuchtung ausgestattet sind, beurteilen 47% der Angestellten die Luft als sehr trocken. In den frei belüfteten und teilklimatisierten Gebäuden urteilen nur 29% mit sehr trocken. In dem klimatisierten Gebäude 9 urteilen fast 60% der Personen mit sehr trocken! Frauen und junge Personen empfinden mit 44% bzw. 47% die Luft fast doppelt so häufig wie Männer bzw. ältere Personen als sehr trocken.</p>
Laut – leise	<p>Fenstergelüftete Räume werden zu 24% als sehr bzw. eher leise eingestuft. Bei den klimatisierten sind es 13% und bei den teilklimatisierten 17%. Auf der anderen Seite werden 55% der Arbeitsplätze in klimatisierten Gebäuden als sehr oder eher laut eingestuft. Bei Fensterlüftung urteilen 38% mit eher oder sehr laut. Auffällige Unterschiede in Abhängigkeit vom Geschlecht und vom Alter treten nicht auf. Die Frage, ob es viele oder wenige störende Geräusche gäbe,</p>

wird vergleichbar beantwortet wie die Frage nach laut oder leise.

Obwohl raumluftechnische Anlagen vor allem auch der Sicherstellung eines ausreichenden Luftwechsels dienen und somit einen positiven Effekt auf die Luftqualität haben sollten, schlägt sich dies nicht in der Einschätzung durch die Personen nieder. 72% der Befragten in klimatisierten Gebäuden empfinden die Luft eher oder sogar sehr verbraucht. In den teilklimatisierten Gebäuden sind dies immer noch 52% während es in den fenstergelüfteten Gebäuden nur 26% sind. Personen unter 31 Jahren stufen zu 63% die Luft als sehr oder eher verbraucht ein. Verglichen mit den anderen Altersgruppen sind dies 15 bis 20 Prozentpunkte mehr. Der Unterschied zwischen Männern (46%) und Frauen (52%) ist mit 6 Prozentpunkten dagegen eher gering.

Verbrauchte – frische Luft

Insgesamt wird das Raumklima zu 23% bei Fensterlüftung, zu 29% bei Teilklimatisierung und zu 54% bei Klimatisierung mit sehr oder eher schlecht bewertet. Junge Angestellte beurteilen das Raumklima insgesamt zu 45% und damit 10-14 Prozentpunkte häufiger als sehr oder eher schlecht als ältere Personen. Auch von Frauen (39%) wird das Raumklima insgesamt häufiger als schlecht eingestuft als von Männern (32%).

Raumklima insgesamt: gut – schlecht

Bei folgenden Fragen nach der Einschätzung des Raumklimas sind die Antworten bezogen auf die Anlagenart und das Alter sehr vergleichbar verteilt:

- schlecht – gut ausgeleuchtet
- dunkel – hell
- blendendes – arbeitsgerechtes Licht
- geringe – hohe Schalldämpfung
- unangenehme – angenehme Gerüche
- übelriechend – wohlriechend
- hohe – geringe Geruchsbelastung

Frauen fühlen sich etwas häufiger durch die Lichtverhältnisse am Arbeitsplatz geblendet als Männer.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Personen in den mechanisch belüfteten Gebäuden stärker bei den eher negativ belegten Kategorien der jeweils 5-stufigen Skala urteilen als Personen in den frei belüfteten Gebäuden. Frauen und Personen unter 31 Jahren beantworten die

meisten Fragen zum Raumklima häufiger negativ oder auf den extremen Seiten der Skala als Männer und ältere Personen. Dies muss bei der Bewertung berücksichtigt werden, da der Anteil von jungen Personen und Frauen in klimatisierten Gebäuden im Mittel höher ist.

5.4.2 Wunsch nach Einflussnahmemöglichkeit

Im Rahmen der Untersuchung wurde erfragt, ob die Personen direkten Einfluss auf das Raumklima wünschen. Insgesamt wünschen sich knapp 85% Einfluss auf das Raumklima nehmen zu können. Bezüglich des Geschlechtes ergeben sich keine Unterschiede. Mit zunehmendem Alter nimmt der Wunsch nach direkter Einflussnahmemöglichkeit auf das Raumklima von 90% auf 58% bei Personen, die älter sind als 60 Jahre ab. Unabhängig von der Art der Anlage und auch unabhängig von der Öffenbarkeit der Fenster ist der Wunsch nach direkter Einflussnahme auf das Raumklima überall gleichermaßen vorhanden (Anhang 3).

5.4.3 Empfundene Einflussnahmemöglichkeit

Es wurde auch die Frage gestellt, ob die Personen Einfluss auf Raumtemperatur, Luftbewegung bzw. Lichtverhältnisse nehmen können. Hier ging es nicht um real im Raum vorhandene Regeleinrichtungen wie z.B. Thermostatventile, sondern um die subjektive Einschätzung der Einflussnahmemöglichkeit durch die einzelnen Personen. 57% bzw. 51% der Befragten geben an, Einfluss auf die Raumtemperatur bzw. Luftbewegung nehmen zu können. Auf das Licht können 69% Einfluss nehmen. Es zeigt sich, dass Frauen sowohl bei der Raumtemperatur, bei der Luftbewegung als auch den Lichtverhältnissen weniger oft angeben, Einfluss nehmen zu können. Auch Personen unter 31 Jahren geben beispielsweise nur zu 45% an, die Raumtemperatur beeinflussen zu können. Im Gegensatz dazu liegt der Anteil bei den 31-40jährigen bzw. den 41-50jährigen bei 60 bzw. 65%.

Von den Personen, die Einfluss auf das Raumklima wünschen (85% aller Befragten), geben in Abhängigkeit von der Anlagenart sehr unterschiedliche Anteile der Personen an, Einfluss nehmen zu können. Bei der Fensterlüftung geben 87% an, Einfluss auf die Raumtemperatur nehmen zu können. Der Anteil in den teilklimatisierten Gebäuden beträgt 46%. Bei klimatisierten Gebäuden ist der Wert mit 36%

sogar noch geringer. Auffallend ist, dass die Einflussnahme-möglichkeit auf die Luftbewegung bei den fenstergelüfteten Gebäuden mit 87% ebenfalls am höchsten ist. Haben klimatisierte Gebäude keine öffenbaren Fenster so geben nur 7% an, auf die Luftbewegung Einfluss nehmen zu können. Sind die Fenster allerdings öffenbar, so steigt der Anteil auf 35%.

Aus den beiden Größen Einfluss auf die Raumtemperatur und Einfluss auf die Luftbewegung wird eine neue Variable gebildet. Der normierte (empfundene) Freiheitsgrad ist Null, wenn eine Person der Meinung ist, sie könnte keinen Einfluss auf das Raumklima nehmen. Beim Wert 1 ist die empfundene Möglichkeit das Raumklima zu beeinflussen maximal.

Bild 18 zeigt den Mittelwert des normierten Freiheitsgrades je Gebäude. Die Gebäude sind nach der Größe des normierten Freiheitsgrades sortiert. Der Mittelwert für frei belüftete Gebäude beträgt 0,87. Bei mechanisch belüfteten Gebäuden wird nur ein Mittelwert von 0,32 erreicht. Eine Ausnahme stellt das Gebäude 8 dar, das als einziges der Gebäude mit raumluftechnischen Anlagen einen Wert von 0,77 ähnlich dem bei Fensterlüftung erreicht. Das Gebäude hat öffenbare Fenster und eine niedrigen Verglasungsanteil in der Fassade von 25%. Die Luftführung erfolgt vom Boden zur Decke. Das Gebäude hat keine Kühlung. Die Beheizung erfolgt über Heizkörper. Die Lüftungsanlagen des Gebäudes erhielten bezüglich ihrer Wartung sehr gute Noten, was auf ein gut funktionierendes Management beim Betreiben der Anlagen hinweisen könnte. Die Gebäude mit dem geringsten Mittelwert des normierten Freiheitsgrades sind die klimatisierten Gebäude 9 und 2. Beide Gebäude haben nicht öffenbare Fenster (Gebäude 2 öberwiegend) und werden öber ein Mischlüftungssystem belüftet und beheizt. Bei Gebäude 2 erfolgt die Zu- und Abluftführung öber die Decke. Gebäude 9 wird in den fensternahen Zonen öber Induktionsgeräte (Brüstung – Decke) belüftet. In den fensterfernen Zonen erfolgt die Zu- und Abluftführung öber die Decke. In Gebäude 12 besitzen zwar 81% der Personen die Möglichkeit auf die Raumtemperatur Einfluss zu nehmen, jedoch nur 12% gaben an, auf die Luftbewegung Einfluss nehmen zu können. Das Gebäude besitzt nicht öffenbare Fenster und ist mit Induktionsgeräten mit bodennah angeordneten Luftauslässen ausgestattet. In mechanisch belüfteten Gebäuden mit Luftheizung betrügt der Mittelwert des normierten Freiheitsgrades 0,23. Wird öber Heizkörper beheizt sind es in diesen Gebäuden bereits 0,51. Sind die-

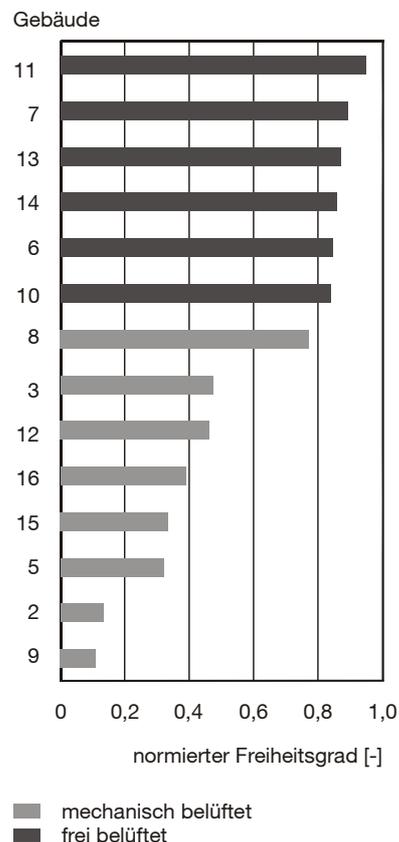


Bild 18 Mittelwert des normierten Freiheitsgrades je Gebäude. Der mittlere normierte Freiheitsgrad ist in frei belüfteten Gebäuden (0,87) signifikant höher als in mechanisch belüfteten Gebäuden (0,32) (Welch-Test: $F = 3361$, $p < 0.001$, $n = 4492$).

Fenster verschlossen beträgt der Mittelwert 0,19 und steigt bei offenen Fenstern auf 0,48 an (siehe Anhang 3).

Zusammenfassend kann hier festgestellt werden, dass Gebäude mit Fensterlüftung dem Wunsch von 85% der Beschäftigten nach direkter Einflussnahmemöglichkeit auf das Raumklima eher entgegenkommen. Es ist aber vorstellbar, dass auch andere Kenngrößen wie z.B. die Anzahl der Personen, die in einem Raum arbeiten, hier eine Rolle spielen. In den fenstergelüfteten Gebäuden dürften im Gegensatz zu den mechanisch belüfteten Gebäuden kleine Bürogrößen vorherrschen. Diese Angaben wurden jedoch nicht erhoben.

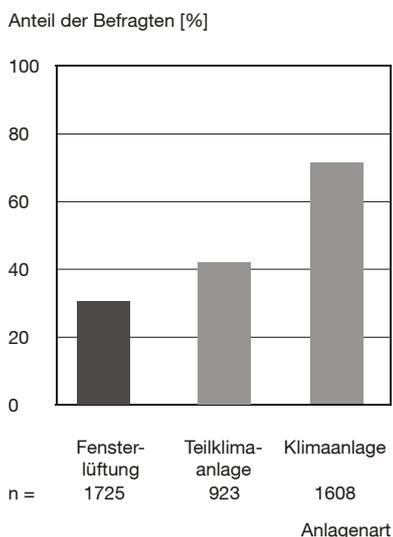


Bild 19 Anteil der Befragten, die das Raumklima für gesundheitsabträglich halten in Abhängigkeit von der Anlagenart. Der Zusammenhang ist signifikant und stark. ($n = 4256$; $\text{Chi}^2 = 569$; $p < 0,001$; $\text{CC}_{\text{Korr}} = 0,49$).

5.4.4 Gesundheitsabträglichkeit des Raumklimas

Mit dem Raumklimafragebogen wurde erfragt, ob die Personen das Raumklima für gesundheitsabträglich halten. Bild 19 zeigt einen recht starken signifikanten Zusammenhang zwischen der Einschätzung des Raumklimas als gesundheitsabträglich und der Anlagenart. Es zeigt sich, dass in den Gebäuden mit Klimaanlage die Meinung vorherrscht (71%), das Raumklima sei gesundheitsabträglich. Bei Fensterlüftung sind nur 31% und bei Gebäuden mit Teilklima-anlage 42% der Befragten dieser Meinung. Junge Personen unter 31 Jahren halten das Raumklima zu 60% für gesundheitsabträglich. Das sind 13 bis 18 Prozentpunkte mehr als in den anderen Altersgruppen. Während bei Männern der Anteil bei nur 39% lag, geben Frauen zu 56% an, das Raumklima für gesundheitsabträglich zu halten. Die gebäudeweise Betrachtung spiegelt die Anlagenart wieder. Ausnahme bildet wieder das teilklimatisierte Gebäude 8, das so geringe Anteile wie bei Fensterlüftung erreicht.

5.4.5 Verbesserungswürdigkeit des Raumklimas

Die Personen machten auch Angaben dazu, ob sie das Raumklima für verbesserungswürdig halten (Bild 20). 88% der Befragten in Gebäuden mit Klimaanlage halten das Raumklima für verbesserungswürdig. Bei teilklimatisierten Gebäuden ist der Anteil 15 Prozentpunkte und bei Fensterlüftung sogar 29 Prozentpunkte geringer. Wurde diese Frage mit ja beantwortet, so bestand für die Befragten die Möglichkeit, anzugeben, inwiefern das Raumklima verbessert werden sollte. Hier waren keine Kategorien oder ähnli-

ches vorgegeben. Es konnte ein freier Text notiert werden (Mehrfachnennungen möglich). In der Auswertung wurden die Aussagen zu thematischen Kategorien zusammengefasst (siehe Anhang 3).

Am häufigsten werden die Themen „mehr Lüften, bessere Luft“ mit 738 Nennungen, „Befeuchtung, weniger trockene Luft“ mit 701 Nennungen und „Temperatur“ mit 594 Nennungen angeführt. Bezogen auf die Anzahl der Befragten nennen bei Fensterlüftung 7% (115), bei Teilklimaanlage 15% (141) und bei Klimaanlage 20% (338) die „Temperatur“ als Grund. Das Thema „mehr Lüften, bessere Luft“ wird mit 30% (505) am häufigsten in den Gebäuden mit Klimaanlage genannt. Bei Fensterlüftung sind es 5% (94) und bei Teilklimaanlagen 14% (139). Das Thema „Befeuchtung, weniger trockene Luft“ führen 17% (295) der Personen in fenstergelüfteten, 18% (172) der Personen in teilklimatisierten und 14% (234) der Personen in klimatisierten Gebäuden an.

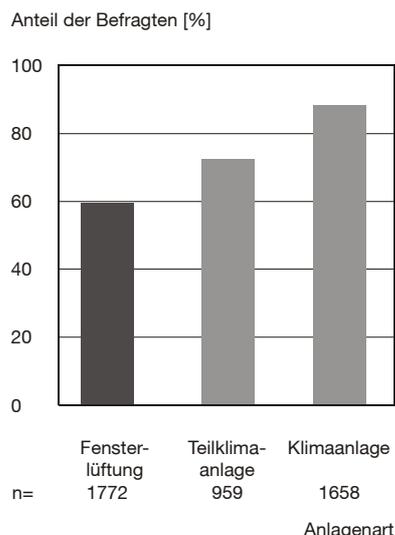


Bild 20 Anteil der Befragten, die das Raumklima für verbesserungswürdig halten in Abhängigkeit von der Anlagenart. Der Zusammenhang ist signifikant und stark. (n = 4389; $\chi^2 = 363$; $p < 0,001$; $CC_{\text{kor}} = 0,39$).

5.4.6 Raumklimaschwankungen im Tagesverlauf

Bei dieser Frage sollten die Personen beurteilen, ob aus ihrer Sicht Schwankungen des Raumklimas im Verlaufe des Tages auftreten und inwiefern sich dabei das Raumklima ändert. Der Zusammenhang mit der Anlagenart (Fensterlüftung, Teilklimaanlage, Klimaanlage) ist schwach (n = 4411; $\chi^2 = 29,6$; $p < 0,001$; $CC_{\text{kor}} = 0,12$). Die Unterschiede in den Anteilen betragen 9 bzw. 6 Prozentpunkte. Die Befragten in klimatisierten Gebäuden geben mit 56% am häufigsten an, dass sich das Raumklima im Laufe eines Tages ändert. Die Befragten hatten die Möglichkeit einen freien Text dafür zu formulieren inwiefern sich das Raumklima aus ihrer Sicht ändert. Die einzelnen Antworten wurden in der Auswertung zu Kategorien zusammengefasst (siehe Anhang 3).

Zwei Antwortkategorien, die inhaltlich sehr stark miteinander zusammenhängen, werden am häufigsten genannt: „Temperaturschwankung“ (621) ganz allgemein und „Witterung, Sonneneinstrahlung“ (649). Von der Gesamtzahl der Nennungen „Temperaturschwankung“ entfallen 103 (6%) auf Gebäude mit Fensterlüftung, 173 (18%) auf teilklimatisierte Gebäude und 337 (20%) auf klimatisierte Gebäude. Das Thema „Witterung, Sonneneinstrahlung“ wird 255-mal (14%) in fenstergelüfteten, 89-mal (9%) in teilklimatisierten

und 277-mal (17%) in klimatisierten Gebäuden genannt. Das Ergebnis überrascht etwas, werden doch mechanische Lüftungsanlagen mit Klimatisierung doch mit dem Ziel eingebaut ein gleichmäßiges Raumklima zu gewährleisten.

5.4.7 Wichtigkeit von Raumklimaparametern

Die Frage nach der Wichtigkeit von Raumklimaparametern wurde auf einer 5-stufigen Skala von nicht wichtig – etwas wichtig – ziemlich wichtig – sehr wichtig – extrem wichtig erhoben. Als extrem oder sehr wichtig werden eingeschätzt:

- Be- und Entlüftung: 74%
- Raumtemperatur: 64%
- Luftfeuchtigkeit: 55%
- Luftbewegung: 41%.

Keiner der Befragten stuft einen der Raumklimaparameter als unwichtig ein. Der Anteil der Personen, die bestimmte Raumklimaparameter als extrem wichtig einschätzen, ändert sich in Abhängigkeit von der Anlagenart. In mechanisch belüfteten Gebäuden schätzt ein ungefähr doppelt so hoher Anteil die Luftfeuchtigkeit und die Luftbewegung als extrem wichtig gegenüber frei belüfteten Gebäuden ein. Bei der Raumtemperatur liegt der Anteil an Personen in mechanisch belüfteten Gebäuden um 7 Prozentpunkte höher als in frei belüfteten Gebäuden. Die Be- und Entlüftung wird am häufigsten als extrem wichtig eingestuft, wobei auch hier der Anteil bei den Gebäuden mit RLT-Anlage 9 Prozentpunkte höher ist. Nur die Geruchsbelastung wird in fenstergelüfteten Räumen etwas häufiger als extrem wichtig eingestuft als in mechanisch belüfteten Räumen (siehe Anhang 3).

Für alle Raumklimaparameter ist der Anteil der Frauen, die extrem wichtig votieren, 4 bis 12 Prozentpunkte höher als der der Männer. Nur bzgl. des Geräuschpegels ist der Anteil ähnlich hoch. Auch die unter 31-jährigen urteilen häufiger extrem wichtig bei den Raumklimaparametern. Nur beim Geräuschpegel zeigt sich wie beim Geschlecht keine Änderung der Häufigkeit in Abhängigkeit vom Alter.

Wird betrachtet, welcher Raumklimaparameter unabhängig von Geschlecht, Alter und Anlagenart am häufigsten als extrem wichtig eingestuft wird, so ist dies die Be- und Entlüftung. Es folgen Raumtemperatur, Gerüche und Beleuchtung.

5.4.8 Zufriedenheit mit Raumklimaparametern

Die Zufriedenheit mit den Raumklimaparametern wurde erfragt mit dem Hinweis, die letzten vier Wochen vor dem Untersuchungstag mit einzubeziehen. Die am häufigsten als extrem wichtig eingestuftem Raumklimaparameter sind auch diejenigen, welche die höchsten Unzufriedenheitsraten aufweisen. Frauen sind mit allen Raumklimaparametern häufiger unzufrieden als Männer. Personen unter 31 Jahren sind etwas häufiger unzufrieden als die anderen Altersgruppen. Dies gilt nicht für den Geräuschpegel. Die Befragten sind in den Gebäuden mit raumlufthechnischen Anlagen mit allen Raumklimaparametern unzufriedener als Personen in Gebäuden mit Fensterlüftung. Davon ausgenommen ist die Geruchsbelastung. Die größten Unterschiede treten bei der Be- und Entlüftung, der Luftfeuchtigkeit, der Raumtemperatur und der Luftbewegung auf.

Bild 21 zeigt den Anteil der mit der Raumtemperatur Zufriedenen je Gebäude. Die Gebäude sind nach dem Anteil der Zufriedenen sortiert. Wie schon bereits beim normierten Freiheitsgrad (Abschnitt 5.4.3) bildet das mechanisch belüftete Gebäude 8 mit sehr hohen Zufriedenheitsraten eine Ausnahme unter den Gebäuden mit raumlufthechnischen Anlagen. Die geringsten Zufriedenheitsanteile weisen die Gebäude 2 und 9 auf. Beide Gebäude weisen auch den geringsten normierten Freiheitsgrad auf. In mechanisch belüfteten Gebäuden mit Luftheizung beträgt der Anteil der Zufriedenen 45%. Wird über Heizkörper beheizt, sind es in diesen Gebäuden 60%. Sind die Fenster verschlossen, beträgt der Anteil 40% und steigt bei offenbaren Fenstern auf 62% an (siehe Anhang 3). Der Anteil der Zufriedenen ist in den frei belüfteten Gebäuden signifikant höher als in den mechanisch belüfteten Gebäuden.

Die Prüfung eines möglichen Zusammenhangs zwischen normiertem Freiheitsgrad (Abschnitt 5.4.3) und der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur (als dichotome Größe: zufrieden – unzufrieden) ergibt einen starken signifikanten Zusammenhang ($n = 4343$, $\text{Chi}^2 = 822$, $p < 0,001$, $\text{CC}_{\text{kor}} = 0,56$).

Da bei der oben ausgewerteten Frage nach der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur auf einen 4-wöchigen Zeitraum Bezug genommen wurde, können die Antworten nicht ohne weiteres in Beziehung gesetzt werden zu den Antworten auf die Frage nach der Beurteilung des momen-

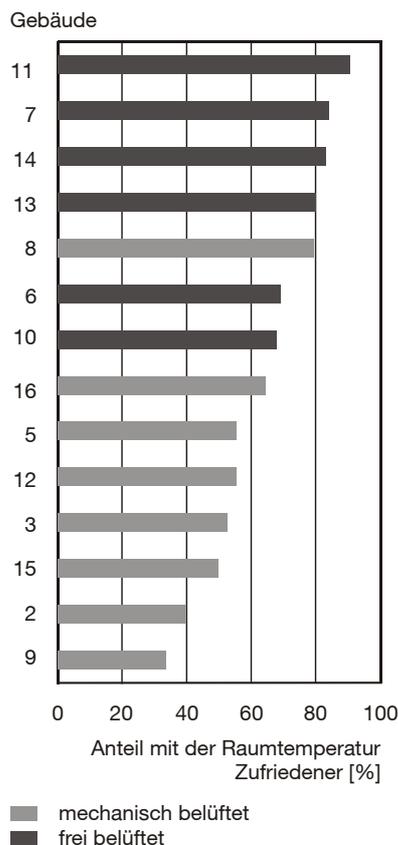


Bild 21 Zufriedenheit mit der Raumtemperatur je Gebäude. Der Anteil der Zufriedenen ist in den frei belüfteten Gebäuden signifikant höher als in den mechanisch belüfteten Gebäuden (Rangtest Wilcoxon, Einseitiger Test $p = 0,025$; Prüfgröße $22 > 16$ kritischer Wert).

tanen Raumklimas in Abschnitt 5.4.1. Es kann also z.B. kein Bezug hergestellt werden zwischen der momentanen Empfindung einer Person „eher kalt“ und ihrer (4-wöchigen) Zufriedenheit mit der Raumtemperatur. Daher wird für weitere Berechnungen ein Indikator benötigt.

Dazu wird auf die Variable unbehagliche – behagliche Raumtemperatur zurückgegriffen. Schwierigkeiten bereitet der zentrale Punkt der 5-stufigen Skala: Ist eine Person, die angibt, die Raumtemperatur weder unbehaglich noch behaglich zu empfinden, zufrieden oder unzufrieden? Tabelle 11 zeigt, dass die überwiegende Mehrheit solcher Person als noch zufrieden eingestuft werden kann. Somit können die Personen, die die Raumtemperatur als sehr oder eher unbehaglich einstufen als mit der Raumtemperatur unzufrieden angesehen werden.

Temperatur- bewertung	Zufriedenheit mit der Raumtemperatur					
	unzufrieden		zufrieden		gesamt	
	n	%	n	%	n	%
sehr unbehaglich	478	93	36	7	514	100
eher unbehaglich	728	70	310	30	1038	100
weder noch	354	22	1264	78	1618	100
eher behaglich	125	13	870	87	995	100
sehr behaglich	13	8	156	92	169	100
gesamt	1698	39	2636	61	4334	100

Tabelle 11 Kreuztabelle zum starken signifikanten Zusammenhang zwischen momentaner Bewertung der Raumtemperatur als unbehaglich – behaglich und der 4-wöchigen Zufriedenheit mit der Raumtemperatur (n = 4334; Chi² = 1612; p < 0,001; C_{kor} = 0,74)

5.5 Beobachteter und vorhergesagter Anteil Unzufriedener

Die folgenden Darstellungen untersuchen auf der Basis von Befragungsdaten aus dem Untersuchungszeitpunkt 1, ob die theoretischen Vorhersagekurven für den Prozentsatz zu erwartender Unzufriedener nach [ISO 7730: 2003; Mayer 1998] die beobachtete Anzahl von Unzufriedenen vorher-sagen können. Der beobachtete Anteil Unzufriedener wird aus der Anzahl Personen ermittelt, die die Raumtemperatur als sehr unbehaglich oder eher unbehaglich eingestuft haben (siehe Abschnitt 5.4.8). Es wird also angenommen, dass diejenigen, die sich thermisch unbehaglich fühlen, auch unzufrieden mit der Raumtemperatur sind. Zur Transformation der 7-stufigen Skala auf eine 5-stufige-Skala siehe Abschnitt 4.4.

Aus der Befragung ergeben sich 1572 Personen, die mit der Raumtemperatur unzufrieden sind. Das sind 36% aller befragten Personen (4413). Die Häufigkeitsverteilung der Unzufriedenen über die Kategorien von warm – kalt zeigt Bild 22. Dargestellt sind auch die Häufigkeitsverteilungen nach Fanger [ISO 7730: 2003] und [Mayer 1998]. Mit der Zahl der Antworten je Kategorie und den Prozentangaben zu den Unzufriedenen von Mayer und Fanger kann eine erwartete Anzahl Unzufriedener ausgerechnet werden. Aus der Vorhersage nach der Methode von Fanger ergibt sich eine gesamte Anzahl Unzufriedener von 2062. Die Erwartung ist also 11 Prozentpunkte höher als der tatsächliche Anteil Unzufriedener. Nach der Methode von Mayer ergibt sich eine erwartete Anzahl Unzufriedener von 2525, das sind 21 Prozentpunkte mehr als der tatsächliche Anteil. Der Chi²-Anpassungstest (Abschnitt 4.5.3) bestätigt, dass die Häufigkeitsverteilungen der beobachteten und der vorhergesagten Werte (Methoden von Fanger und Mayer) über die Antwortkategorien warm – kalt in Bild 22 hochsignifikant ($p < 1 \cdot 10^{-84}$) verschieden sind. Dies bedeutet, dass beide Methoden [ISO 7730: 2003; Mayer 1998] für die Gesamtzahl der Befragten keine gute Vorhersage liefern.

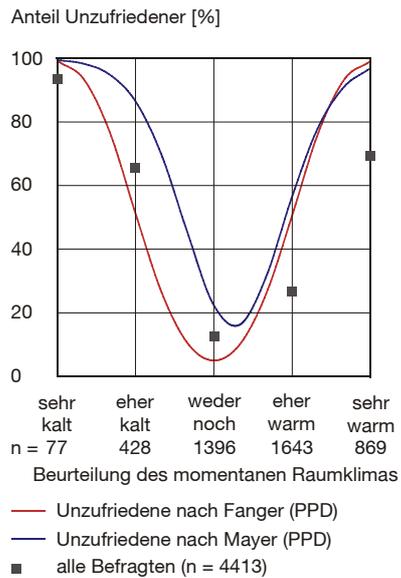


Bild 22 Anteil der mit der Raumtemperatur Unzufriedenen in Abhängigkeit von der Beurteilung des momentanen Raumklimas als sehr kalt – sehr warm. Gesamte Anzahl Befragter. Dargestellt sind auch die Vorhersageverteilungen nach Fanger [ISO 7730: 2003] und [Mayer 1998].

Nachdem gezeigt wurde, dass die Häufigkeitsverteilung aller Unzufriedenen hoch signifikant von den theoretischen Verteilungen von Fanger und Mayer verschieden ist, soll nun untersucht werden, ob eine Aufteilung der Unzufriedenen nach der Anlagenart ein anderes Bild ergibt.

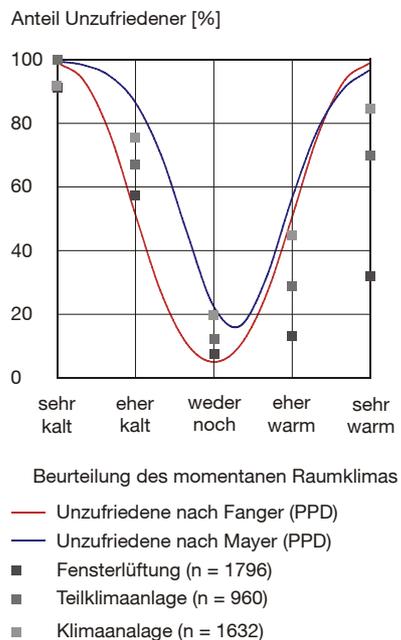


Bild 23 Anteil der mit der Raumtemperatur Unzufriedenen in Abhängigkeit von der Beurteilung des momentanen Raumklimas als sehr kalt – sehr warm und von der Anlagenart. Dargestellt sind auch die Vorhersageverteilungen nach Fanger [ISO 7730: 2003] und [Mayer 1998].

Aus der Befragung ergeben sich bei Fensterlüftung 350 (19%) Unzufriedene. Erwartet werden nach Fanger bzw. Mayer 762 bzw. 966 Unzufriedene. Bei Teilklimatisierung sind tatsächlich 323 (34%), erwartet nach Fanger 391 und erwartet nach Mayer 511 unzufrieden. In klimatisierten Gebäuden beträgt die Anzahl Unzufriedener 878 (54%). Die erwartete Anzahl bei Klimatisierung beträgt nach Fanger 889 und nach Mayer 1028. Die Verteilung der Anteile der Unzufriedenen über die Kategorien von warm – kalt zeigt Bild 23.

Der Chi²-Anpassungstest weist für den Vergleich der tatsächlichen Häufigkeitsverteilung mit den theoretischen Verteilungen von Fanger und Mayer bei Fensterlüftung und Teilklimatisierung eine hochsignifikante ($p < 1 \cdot 10^{-15}$) Verschiedenheit aus. Das bedeutet, dass für diese Arten der Belüftung mit den Methoden von Fanger und Mayer keine

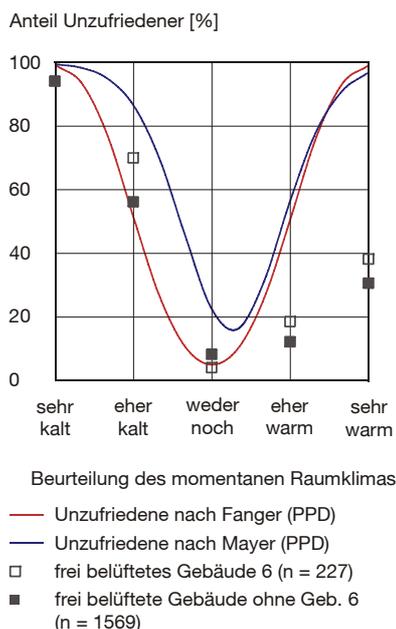


Bild 24 Anteil der mit der Raumtemperatur Unzufriedenen in Abhängigkeit von der Beurteilung des momentanen Raumklimas als sehr kalt – sehr warm für frei belüftete Gebäude und das im Sommer gemessene frei belüftete Gebäude 6.

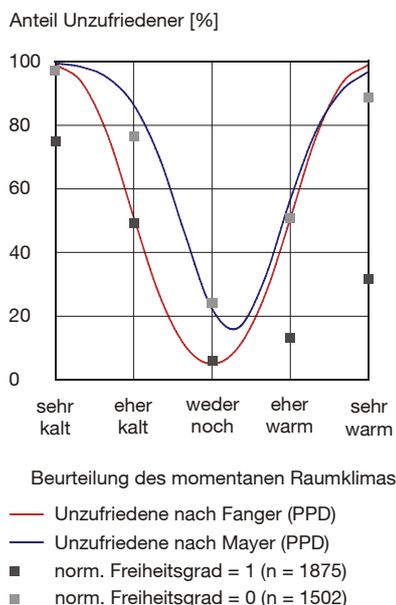


Bild 25 Anteil der mit der Raumtemperatur Unzufriedenen in Abhängigkeit von der Beurteilung des momentanen Raumklimas als sehr kalt – sehr warm und vom normierten Freiheitsgrad. Dargestellt sind auch die Vorhersageverteilungen nach Fanger [ISO 7730: 2003] und [Mayer 1998].

guten Vorhersagen für den zu erwartenden Anteil Unzufriedener gemacht werden können.

Der Chi²-Anpassungstest bei klimatisierten Gebäuden zeigt für die Fanger-Verteilung hochsignifikante Unterschiede ($p < 1 \cdot 10^{-45}$). Für die Mayer-Verteilung sind die Unterschiede zwar noch signifikant mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $p = 0,0001$, verglichen allerdings mit den Wahrscheinlichkeiten der bisher untersuchten Verteilungen von deutlich kleiner 10^{-15} . Dies deutet darauf hin, dass mit der Methode von Mayer bessere Vorhersagen der Anzahl Unzufriedener in klimatisierten Gebäuden gemacht werden können als mit der Methode von Fanger.

Da die Befragungen in den fenstergelüfteten Gebäuden überwiegend in der Übergangszeit durchgeführt wurden, liegt es nahe, die Ursache für die unterschiedliche Zufriedenheit in frei und mechanisch belüfteten Gebäuden in der zum Befragungszeitpunkt herrschenden Jahreszeit zu suchen. Bild 24 zeigt aber, dass die Häufigkeitsverteilung für das im Sommer gemessene Gebäude 6 recht vergleichbar mit der Häufigkeitsverteilung der anderen frei belüfteten Gebäude ist. Die Jahreszeit scheint also nicht von großer Bedeutung zu sein.

Wie in Abschnitt 5.4.3 bereits gezeigt wurde, ist der Anteil der Personen, die angaben auf Lufttemperatur und Raumtemperatur Einfluss nehmen zu können, in mechanisch belüfteten Gebäuden deutlich geringer als in frei belüfteten Gebäuden. Daher wird in einem weiteren Schritt untersucht, ob die Vorhersagegüte der Fanger- oder Mayer-Verteilung für einen normierten Freiheitsgrad von 1 und Null unterschiedlich ist. Für Personen, mit einem normierten Freiheitsgrad 1 ergibt sich eine Anzahl von 300 (16%) Personen, die mit der Raumtemperatur unzufrieden sind. Für Personen mit einem normierten Freiheitsgrad von Null (kein Einfluss möglich) eine Anzahl von 903 (60%) Unzufriedenen.

Die Erwartung liegt für Personen mit einem normierten Freiheitsgrad von 1 nach Fanger bei 774 und nach Mayer bei 973 Unzufriedenen. Der Chi²-Anpassungstest ($p < 1 \cdot 10^{-72}$) zeigt für beide Vorhersageverteilungen, dass sie hoch signifikant von der beobachteten Verteilung abweichen. Für Personen mit einem normierten Freiheitsgrad von 1 kann also mit den beiden Methoden keine gute Vorhersage des Anteils der Unzufriedenen gemacht werden.

Für Personen mit einem normierten Freiheitsgrad von Null sind die erwarteten Werte nach Fanger 843 und nach Mayer 978. Der χ^2 -Anpassungstest ergibt für die Methode nach Fanger wieder eine schlechte Vorhersage (Verteilungen sind mit $p < 1 \cdot 10^{-60}$ hochsignifikant verschieden). Aus der Methode von Mayer resultiert aber, dass die beobachtete Verteilung von der vorhergesagten Verteilung nicht signifikant ($p = 0,11$) abweicht. Dies deutet darauf hin, dass mit der Methode von Mayer für Personen ohne Einfluss gute Vorhersagen gemacht werden können (Bild 25).

Aus dem Vergleich der tatsächlichen Unzufriedenen mit den vorhergesagten Unzufriedenen nach der Methode von Fanger bzw. von Mayer ergibt sich:

- Fangers Methode [ISO 7730: 2003] stellt für keine der untersuchten Gruppen der Befragten eine gute Vorhersage für den zu erwartenden Anteil Unzufriedener dar.
- Mayers Methode [Mayer 1998] scheint für Personen ohne Einflussnahmemöglichkeit auf das Raumklima gute Vorhersagen zu ermöglichen.
- Wenn die Vorhersagegüte der Mayerschen Methode für klimatisierte Gebäuden untersucht wird, so zeigt sich auch hier die beste Vorhersagegüte.
- Klimatisierte Gebäude weisen aus Sicht der Nutzer die geringste Einflussnahmemöglichkeit auf. Insofern zeigen die Ergebnisse bei einer Unterteilung nach Einflussnahmemöglichkeit und nach Klimatisierung eine gute Übereinstimmung.

Die Ergebnisse sollen anhand von weitergehenden Analysen auf Grundlage von Mess- und Befragungsdaten des Untersuchungszeitpunktes 2 erhärtet werden.

5.6 Zusammenhangsanalyse

Mit der Zusammenhangsanalyse auf Basis der Daten des Untersuchungszeitpunktes 1 wird die Stärke des Zusammenhangs von Variablen mit den Zielgrößen thermisches Empfinden (warm – kalt) und thermische Behaglichkeit (unbehaglich – behaglich) ermittelt. Es zeigt sich, dass die Zielgröße thermisches Empfinden (warm – kalt) mit deutlich weniger Variablen mittlere bis starke Zusammenhänge aufweist als die Zielgröße thermische Behaglichkeit (unbehaglich – behaglich). Die statistischen Größen können Anhang 4 entnommen werden.

Hinzuweisen ist auf den Zusammenhang zwischen der thermischen Behaglichkeit (unbehaglich – behaglich) und der Menge störender Geräusche (viele – wenige störende Geräusche), der Variable verbrauchte – frische Luft, der Variable blendendes – arbeitsgerechtes Licht, der Temperaturschwankung und der Luftbewegung.

Für die im Projekt geplante Modellbildung mit Hilfe der logistischen Regression ist es wichtig, dass nicht zwei Größen gleichzeitig in ein Modell aufgenommen werden, die sehr stark miteinander zusammenhängen. Bei der Prüfung des Zusammenhangs wichtiger Einflussgrößen untereinander zeigen folgende Variablen starke Zusammenhänge:

- Gesundheitsabträglichkeit des Raumklimas – Verbesserungswürdigkeit des Raumklimas
- Überempfindlichkeit gegen Wärme – starkes Schwitzen
- Anlagenart – Bauweise
- normierter Freiheitsgrad – Öffnungsmöglichkeit der Fenster
- Anlagenart – und alle anderen Charakterisierungen der Anlagentechnik
- Anlagenart – und alle Variablen, die Witterungsverhältnisse kennzeichnen

Die jeweils zweitgenannte Variable wurde von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Tabelle 12 kennzeichnet die stark zusammenhängenden Raumklimaparameter. So hängen inhaltlich sehr stark miteinander verknüpfte Parameter wie beispielsweise viele – wenige störende Geräusche, geringe – hohe Schalldämpfung sehr stark mit laut – leise zusammen. Diese Werte sind in Tabelle 12 durch eingeklammerte Kreuze gekennzeichnet. Neben den bereits oben genannten Zusammenhängen mit den Zielgrößen hängen stark zusammen (nicht eingeklammerte Kreuze in Tabelle 12):

- verbrauchte – frische Luft und trockene – feuchte Luft
- verbrauchte – frische Luft und starke – schwache Luftbewegung
- verbrauchte – frische Luft und übelriechend – wohlriechend
- schwankende – gleichförmige Temperatur und starke – schwache Luftbewegung.

Die zugehörigen statistischen Größen können Anhang 4 entnommen werden. Die relativ starken Zusammenhänge

zwischen einzelnen inhaltlich zusammenhängenden Variablen zeigen die Notwendigkeit einer Variablenreduktion an. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt erläutert.

	gut – schlecht ausgeleuchtet		unangenehme – angenehme Gerüche																
schlecht – gut ausgeleuchtet																			
warm – kalt		warm – kalt																	
unangenehme – angenehme Gerüche																			
laut – leise				laut – leise															
trockene – feuchte Luft					trockene – feuchte Luft														
viele – wenig störende Geräusche						viele – wenig störende Geräusche													
dunkel – hell	(X)						dunkel – hell												
unbehagliche – behagliche Temperatur		(X)				X													
verbrauchte – frische Luft						X				X									
blendendes – arbeitsgerechtes Licht	X									X									
übelriechend – wohlriechend			(X)							X									
schwankende – gleichförmige Temperatur										X		X							
starke – schwache Luftbewegung										X	X								
hohe – geringe Geruchsbelastung			(X)									(X)							
geringe – hohe Schalldämpfung				(X)		(X)													X

Tabelle 12 Zusammenhänge der Raumklimaparameter untereinander. Nur sehr starke Zusammenhänge sind gekennzeichnet, inhaltlich verbundene Größen sind eingeklammert (Statistische Größen siehe Anhang 4).

5.7 Faktorenanalyse

Alle Raumklimaparameter aus Tabelle 12 wurden einer Faktorenanalyse (Abschnitt 4.5.6) unterzogen. Davon ausgenommen wurden die beiden Zielgrößen thermisches Empfinden (warm – kalt) und thermische Behaglichkeit (unbehagliche – behagliche Temperatur). Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse der Faktoren untereinander zeigen wie auch schon die korrigierten Kontingenzkoeffizienten in Anhang 4 den starken Zusammenhang zwischen inhaltlich verbundenen Größen. Das Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium zeigt mit 0,72 eine gute Eignung der gesamten Stichprobe für eine Faktorenanalyse an. Dies gilt auch für die variablen-spezifischen Kaiser-Meyer-Olkin-Werte (Anhang 5). Obwohl der Screeplot auf drei zu extrahierende Faktoren und das Kaiser-Kriterium auf fünf Faktoren hinweist, wird aus inhaltlichen Gründen eine Zahl von sechs zu extrahierenden Faktoren gewählt. Die sechs Faktoren haben einen Wertebereich von 1 bis 5. In Vorbereitung auf die Regressionsanalyse werden die sechs Faktoren auf zwei bzw. drei Kategorien reduziert.

Folgende neue Faktoren werden gebildet:

- Faktor 1 Akustische Güte:
niedrig – mittelmäßig – hoch
- Faktor 2 Olfaktorische Güte:
niedrig – mittelmäßig – hoch
- Faktor 3 Lichtverhältnisse:
schlecht – mittelmäßig – gut
- Faktor 4 Luftzustand:
verbraucht und trocken – frisch
- Faktor 5 Temperaturschwankung:
vorhanden – nicht vorhanden
- Faktor 6 Blendung:
nicht vorhanden – mittelmäßig – stark

Faktor 2 fasst Variablen zusammen, die Gerüche einstufen. Ein interessantes Ergebnis der Faktorenanalyse ist, dass die geruchsbeschreibenden Variablen, die in Faktor 2 zusammengefasst sind, nicht mit der Variable verbrauchte – frische Luft in einem gemeinsamen Faktor zusammengefasst werden können. Im Rahmen der Arbeit wurden verschiedene Varianten der Faktorenanalyse berechnet, die in der Arbeit nicht dargestellt sind. Bei keiner Variante jedoch ergab sich eine Zusammenfassung der geruchsbeschreibenden Variablen mit der Variable verbrauchte – frische Luft. Dieses Ergebnis überrascht. Wurde doch bisher davon ausgegangen, dass hohe Geruchsbelastung und verbrauchte Luft nahezu gleichbedeutend sind.

Faktor 4 kennzeichnet den Luftzustand. Dabei sind mit der Kategorie „verbraucht und trocken“ Zustände des Raumklimas beschrieben, bei denen die Luft als sehr oder eher trocken und gleichzeitig als nicht frisch eingestuft wurde. Faktor 5 kennzeichnet in der Kategorie „Temperaturschwankung vorhanden“ Zustände des momentanen Raumklimas bei denen die Luftbewegung als nicht schwach eingestuft wurde und die Temperatur als sehr oder eher schwankend angesehen wurde. Faktor 6 entspricht der Variable blendendes – arbeitsgerechtes Licht.

Anhang 5 zeigt die rotierte Faktormatrix, aus der die Zuordnung der Variablen zu den neuen Faktoren entnommen werden kann. Die Kommunalitäten der Variablen zeigen, dass die Varianz aller Variablen durch die gebildeten Faktoren gut erklärt wird. Die berechneten Summenwerte der Faktoren weisen eine hohe Kongruenz mit den geschätzten Faktor-

werten auf. Mit diesen neu gebildeten Faktoren kann nun die weitere Analyse mittels logistischer Regression erfolgen.

5.8 Logistische Regression

Aus Zusammenhangsanalyse und Faktorenanalyse wurden eine Reihe von möglichen Einflussgrößen auf das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit ermittelt. Die ausgewählten Faktoren enthält Tabelle 14 in der ersten Spalte. Es werden logistische Modelle für die folgenden dichotomen Zielgrößen entwickelt:

Zielgrößen thermisches Empfinden:

- nicht kalt – kalt
- nicht sehr warm – sehr warm

Im ersten Modell für das thermische Empfinden werden die Kategorien „sehr kalt“ und „eher kalt“ zu „kalt“ zusammengefasst. Im zweiten Modell wird die Zielgröße ausschließlich mit „sehr warm“ definiert. Auf die Zusammenfassung der Kategorien eher warm und sehr warm wurde verzichtet, da sich in [Mayer 1998] und Abschnitt 5.5 zeigte, dass eine eher warme Umgebung noch als positiv wahrgenommen werden kann. Beim alternativen Zusammenfassen der Kategorien sehr und eher warm wurde erwartet, dass keine eindeutigen Einflussgrößen ermittelt werden können.

Zielgröße thermische Behaglichkeit:

- nicht unbehaglich kalt – unbehaglich kalt
- nicht unbehaglich warm – unbehaglich warm

Die Zielgrößen unbehaglich kalt und unbehaglich warm setzen sich jeweils aus der Kombination der Variablen warm – kalt und unbehagliche – behagliche Temperatur zusammen. Da sich bei ersten Modellbildungsversuchen zeigte, dass gute Modelle nur bei einer getrennten Betrachtung in Abhängigkeit von der Belüftungsart (Stratifizierung) zu erzielen sind, werden für alle oben genannten Zielgrößen jeweils zwei Modelle gebildet:

- für frei belüftete Räume
- für mechanisch belüftete Räume.

Tabelle 13 zeigt die Häufigkeiten in den Kategorien der Zielgrößen in Abhängigkeit von der Art der Belüftung. Bei freier Lüftung sind die Kategorien von kalt, warm, unbehaglich kalt und unbehaglich warm jeweils sehr gering be-

Zielgrößen	Belüftung			
	frei		mechanisch	
	-	%	-	%
nicht kalt	1303	88,5	1891	89,2
kalt	169	11,5	228	10,8
nicht sehr warm	1290	87,6	1598	75,0
sehr warm	182	12,4	521	25,0
nicht unbehaglich kalt	1365	92,8	1944	91,9
unbehaglich kalt	106	7,2	171	8,1
nicht unbehaglich warm	1334	90,7	1400	66,2
unbehaglich warm	134	9,3	715	33,8

Tabelle 13 Häufigkeiten in den Kategorien der Zielgrößen.

setzt. Dies gilt bei auch mechanischer Belüftung für die Kategorien kalt und unbehaglich kalt. Zu berücksichtigen ist bei den folgenden Ausführungen, dass in nur einem frei belüfteten Gebäude die Befragung bei sommerlichen Außentemperaturen (Tagesmitteltemperatur von 18 °C und Sonnenscheindauer von 10 h) durchgeführt wurde. Bei allen anderen Befragungen in frei belüfteten Gebäuden lagen die Tagesmitteltemperaturen unter 12 °C. Dies könnte zur Folge haben, dass die Ermittlung von Einflussgrößen auf die Zielgrößen sehr warm bzw. unbehaglich warm für frei belüftete Räume keine eindeutigen Ergebnisse liefert bzw. die Modellbildung misslingt. In Gebäude 6 urteilten jedoch nur wenig mehr Personen mit unbehaglich warm (12%) als in den anderen frei belüfteten Gebäuden (7 bis 11%) (siehe auch Bild 24). Mit sehr warm urteilten in Gebäude 6 15% der Personen. In den anderen frei belüfteten Gebäuden sind dies 8 bis 17%. Ob ein Votum von sehr warm bzw. unbehaglich warm im Sommer anders zu bewerten ist als in den anderen Jahreszeiten bleibt zu fragen.

5.8.1 Bivariate logistische Modelle

Nach dem in Abschnitt 4.5.7 beschriebenen Vorgehen werden zuerst bivariate Modelle gebildet. Tabelle 14 zeigt die auf Grund des Likelihood-Ratio-Tests ausgewählten Variablen. Jede der Variablen ist für mindestens eine Zielgröße eine potentielle Einflussgröße. Aus inhaltlichen Gründen werden in den Modellen mit der Zielgröße kalt bzw. unbehaglich kalt die Variable Überempfindlichkeit gegen Wärme und in den Modellen mit den Zielgrößen sehr warm bzw. unbehaglich warm die Variable Überempfindlichkeit gegen Kälte weggelassen. Wenn aufgrund des Likelihood-Ratio-Testes modifizierter Sonneneintragskennwert und Verglasungsanteil ausgewählt werden, dann wird der Verglasungsanteil in die Modelle kalt und unbehaglich kalt aufgenommen und der modifizierte Sonneneintragskennwert in die Modelle sehr warm und unbehaglich warm. Ebenso werden aus Gründen der Adjustierung die Variablen Alter und Geschlecht in jedes Modell aufgenommen. In das Startmodell werden alle aus Tabelle 14 hervorgehenden Einflussgrößen in Abhängigkeit von Belüftungsart und Zielgröße aufgenommen.

Variable	Thermisches Empfinden				Thermische Behaglichkeit			
	nicht kalt – kalt		nicht sehr warm – sehr warm		nicht unbehaglich kalt – unb. kalt		nicht unbehaglich warm – unb. warm	
	Belüftung		Belüftung		Belüftung		Belüftung	
	frei	mecha- nisch	frei	mecha- nisch	frei	mecha- nisch	frei	mecha- nisch
Befindlichkeitsstörung (SBS-Fall)	X	X	X	X	X	X	X	X
Überempfindlichkeit gegen Wärme	-	-	X	X	-	-	X	X
Überempfindlichkeit gegen Kälte	X	X	-	-	X	X	-	-
Raumklima gesundheitsabträglich	X	X		X	X	X	X	X
Akustische Güte	X	X		X	X	X	X	X
Olfaktorische Güte		X	X	X		X	X	X
Lichtverhältnisse	X	X	X	X	X	X		X
Luftzustand	X			X	X	X	X	X
Temperaturschwankung	X	X		X	X	X	X	X
Blendung		X		X		X	X	X
Verglasungsanteil	X	X	X		X	X		X
Modifizierter Sonneneintragskennwert	X	X		X	X	X	X	X
Normierter Freiheitsgrad	X	X		X	X	X	X	X

Tabelle 14 : Mit bivariaten Modellen ausgewählte relevante Einflussgrößen auf die Zielgrößen (X) (Auswahl-Kriterium: p-Werte des LR-Tests < 0,25; Statistische Werte siehe Anhang 6.)

5.8.2 Modelle thermisches Empfinden

Ausgehend von den in Abschnitt 5.8.1 ausgewählten potentiellen Einflussgrößen auf die Zielgrößen „kalt“ und „sehr warm“ ergeben sich neben den Adjustierungsvariablen Alter, Geschlecht und Überempfindlichkeit gegen Wärme bzw. Kälte mit dem Likelihood-Quotienten-Test in Abhängigkeit von der Belüftungsart unterschiedliche Einflussgrößen. Die statistischen Kenngrößen zum Test enthält Anhang 7. Für grundsätzliche Erläuterungen zum Verständnis der im Folgenden gezeigten Darstellungen wird auf Abschnitt 4.5.7 verwiesen.

Die Chance die Temperatur als kalt zu empfinden wird sowohl bei freier als auch mechanischer Belüftung durch die Lichtverhältnisse, Temperaturschwankungen, die akustische Güte und den Verglasungsanteil beeinflusst. Der normierte Freiheitsgrad zeigt sich nur bei den frei belüfteten Arbeitsplätzen als Einflussgröße.

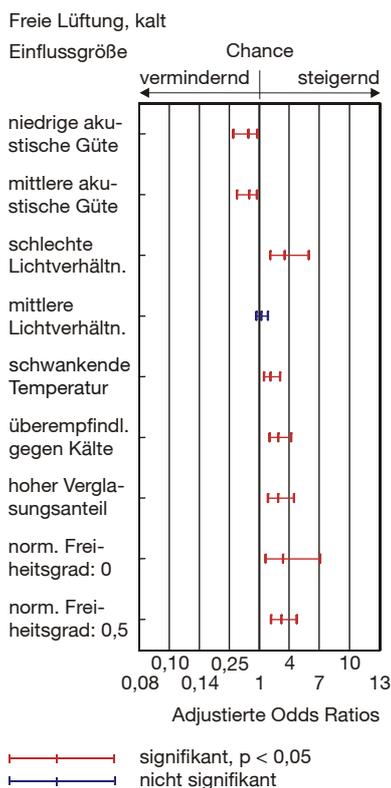


Bild 26 Modell 1 „kalt“ für frei belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, eine Umgebung als kalt zu empfinden. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Befindlichkeitsstörung, Alter und Geschlecht.

Aufgrund der besten statistischen Kennwerte wird für frei belüftete Arbeitsplätze das in Bild 26 dargestellte Modell 1 ausgewählt. Das Bild zeigt die resultierenden Odds Ratios sowie die 95%-Vertrauensintervalle der Einflussgrößen. Schlechte Lichtverhältnisse schlagen sich in einer erhöhten Chance (OR = 3,50) für eine Kalt-Empfindung nieder. Mittlere Lichtverhältnisse erhöhen oder verringern die Chance auf eine Kalt-Empfindung gegenüber guten Lichtverhältnissen nicht. Wer die Temperatur als schwankend einstuft, hat eine 2,1-fache Chance eine Temperatur als kalt zu empfinden. Die Befragten, die angaben überempfindlich auf Kälte zu reagieren, haben eine 2,9-fache Chance sich kalt zu fühlen. Ist der Verglasungsanteil hoch, so ist die Chance 2,9-mal höher. Ein normierter Freiheitsgrad von Null erhöht die Chance für ein Kalt-Empfinden um das 3,3-fache gegenüber einem normierten Freiheitsgrad von 1. Bei einem normierten Freiheitsgrad von 0,5 ist das Risiko für ein Kalt-Empfinden fast genauso hoch. Eine Umgebung mit niedriger oder mittlerer akustischer Güte verringert die Chance sich kalt zu fühlen. Dies ist nicht erklärbar. Wurde doch bisher davon ausgegangen, dass Lärm nur bei sehr hohen Temperaturen zu einer Erhöhung der Unbehaglichkeit von Personen beiträgt. Die Vertrauensintervalle aller Einflussgrößen sind so klein, dass die Odds Ratios als sehr stabil angesehen werden können.

Die statistischen Größen zu Modell 1 enthält Anhang 8. Die erzielten Kenngrößen zeigen, dass das Modell einen guten Gesamtfit darstellt.

Bild 27 zeigt für Modell 2 für mechanisch belüftete Arbeitsplätze die Odds Ratios und die zugehörigen Vertrauensintervalle. Schlechte (OR = 2,9) oder mittelmäßige (OR = 1,5) Lichtverhältnisse schlagen sich als erhöhte Chance nieder eine Umgebung als kalt zu empfinden. Das Odds Ratio für schlechte Lichtverhältnisse ist etwas geringer bei mechanischer Lüftung als bei freier Lüftung. Die Chance einer Kalt-Empfindung ist bei schwankender Temperatur mit 2,8 gegenüber frei belüfteten Räumen etwas höher. Überempfindlichkeit gegen Kälte erzeugt eine 3-fache Chance für eine Kalt-Empfindung. Dieser Wert entspricht dem bei freier Lüftung. Ein hoher Verglasungsanteil erhöht die Chance um das 1,7-fache. Die Einflussstärke ist hier geringer als bei Fensterlüftung. Der Einfluss der akustischen Güte ist nicht signifikant, weist jedoch eher eine Chance vermindernde Wirkungsrichtung wie bei frei belüfteten Räumen auf. Die Vertrauensintervalle sind sehr klein, so dass die Werte der Odds Ratios als recht sicher angesehen werden können.

Anhang 8 enthält für Modell 2 alle Odds Ratios, Vertrauensintervalle und die Kennwerte zur Bewertung der Modellgüte. Die erzielten Kenngrößen zeigen, dass das Modell einen guten Gesamtfit darstellt.

Die Chance eine Umgebung als sehr warm zu empfinden, wird wie beim Kalt-Empfinden bei freier und mechanischer Lüftung durch die Lichtverhältnisse beeinflusst. Bei fenstergelüfteten Räumen spielt die olfaktorische Güte eine Rolle. In Räumen mit raumluftechnischen Anlagen sind der modifizierte Sonneneintragskennwert, der normierte Freiheitsgrad, die Einschätzung des Raumklimas als gesundheitsabträglich, Temperaturschwankung und die akustische Güte weitere Einflussgrößen.

Für frei belüftete Räume zeigt Bild 28 die Odds Ratios und Vertrauensintervalle der Einflussgrößen in Modell 3. Personen, die auf Wärme überempfindlich reagieren, haben eine 2,1-fache Chance gegenüber anderen Personen eine Umgebung als sehr warm zu empfinden. Sind die Lichtverhältnisse im Raum nicht gut, so wirkt sich das auf die Chance für ein Sehr-Warm-Empfinden vermindern aus. Eine niedrige olfaktorische Güte des Raumes erhöht die Chance eines Sehr-Warm-Empfindens um das Doppelte. Eine mittlere olfaktorische Güte vermindert oder erhöht die Chance gegenüber einer hohen olfaktorischen Güte nicht. Die Vertrauensintervalle sind wieder sehr klein. Ausgenommen davon ist das Vertrauensintervall für schlechte Licht-

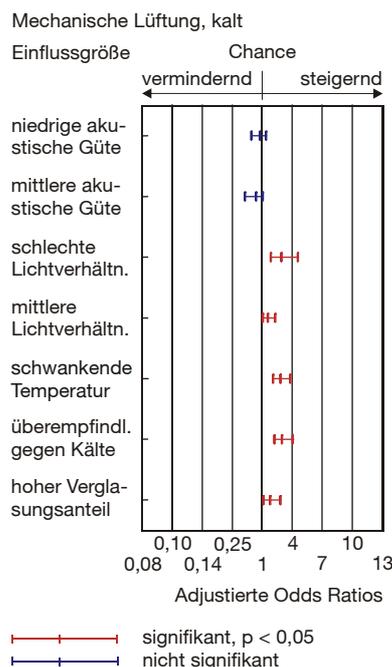


Bild 27 Modell 2 „kalt“ für mechanisch belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, eine Umgebung als kalt zu empfinden. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Alter und Geschlecht.

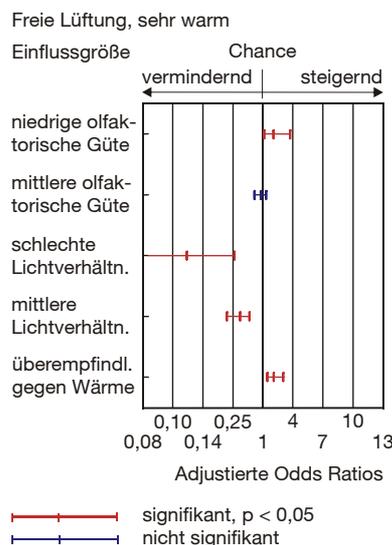


Bild 28 Modell 3 „sehr warm“ für frei belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, eine Umgebung als sehr warm zu empfinden. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Befindlichkeitsstörung, Alter und Geschlecht.

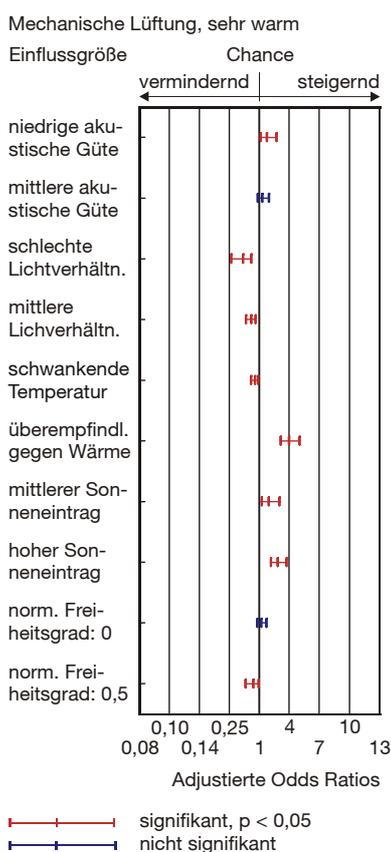


Bild 29 Modell 4 „sehr warm“ für mechanisch belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, eine Umgebung als sehr warm zu empfinden. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Alter, Geschlecht und die Einschätzung des Raumklimas als gesundheitsabträglich.

verhältnisse. Aufgrund einer sehr geringen Personenzahl, die die Umgebung als sehr warm einstuft und gleichzeitig die Lichtverhältnisse als schlecht bewertete, ist das Vertrauensintervall sehr groß. Dies bedeutet, dass der Wert des Odds Ratios von 0,12 als sehr weich anzusehen ist. Das Odds Ratio kann mit weniger als 5% Irrtumswahrscheinlichkeit Werte im Bereich des Vertrauensintervalls von 0,05 bis 0,26 annehmen.

Bei mechanisch belüfteten Gebäuden stellen sich weitaus mehr Variablen als Einflussgrößen dar. Die Odds Ratios und Vertrauensintervalle des Modells 4 zeigt Bild 29. Eine niedrige akustische Güte wirkt sich mit einem Odds Ratio von 1,7 aus. Eine mittlere akustische Güte verändert die Chance für ein Sehr-Warm-Empfinden gegenüber hoher akustischer Güte nicht. Wie bei den frei belüfteten Gebäuden wirken sich auch bei Räumen mit mechanischer Lüftung schlechte oder mittlere Lichtverhältnisse als Chance vermindern auf das Sehr-Warm-Empfinden aus (0,38 bzw. 0,55). Wird die Temperatur als schwankend empfunden, so vermindert sich die Chance mit dem Faktor 0,7. Überempfindlichkeit gegenüber Wärme führt in mechanisch belüfteten Gebäuden zu einem 3,9-fachen Risiko eine Raumtemperatur als sehr warm zu empfinden. Dieses Odds Ratio ist fast doppelt so groß wie das entsprechende bei freier Lüftung. Ein mittlerer bis hoher modifizierter Sonneneintragskennwert wirkt sich – wie erwartet – als Risiko (1,9 bzw. 2,8) für eine starke Erwärmung des betreffenden Arbeitsplatzes aus. Die chancemindernde Wirkung von 0,5 normierten Freiheitsgraden gegenüber einem normierten Freiheitsgrad von 1 ist nicht ohne weiteres nachzuvollziehen. Zumal ein normierter Freiheitsgrad von Null sich nicht signifikant zeigt. Bei Analyse der Häufigkeitsverteilungen von Personen mit dem Urteil „sehr warm“ findet man gegenüber den „nicht sehr warm“ urteilenden Personen einen um 23 Prozentpunkte höheren Anteil von Personen mit einem Freiheitsgrad von Null. Gleichzeitig ist der Anteil der Personen mit 0,5 Freiheitsgraden 15 Prozentpunkte geringer bei einem Urteil „sehr warm“. Im Ergebnis kann hier wohl eher von einem sehr geringen oder gar keinem Einfluss der Größe ausgegangen werden. Anhang 8 enthält für Modell 3 und 4 alle Odds Ratios, Vertrauensintervalle und die Kennwerte zur Bewertung der Modellgüte. Die erzielten Kenngrößen zeigen, dass die Modelle einen guten Gesamtfit darstellen.

Während sich die Modelle für das Kalt-Empfinden für frei und mechanisch belüftete Gebäude nicht wesentlich unterscheiden, so zeigen sich Unterschiede bei den Modellen für das Sehr-Warm-Empfinden. Das Modell für mechanische belüftete Arbeitsplätze enthält deutlich mehr Einflussgrößen. Es sei aber nochmals auf die bereits oben erläuterte Anmerkung hingewiesen, dass die Mehrzahl der frei belüfteten Gebäude nicht bei sommerlichen Außentemperaturen untersucht wurde. Die entwickelten logistischen Modelle für das thermische Empfinden werden mit den Daten des Untersuchungszeitpunktes 2 verifiziert.

5.8.3 Modelle thermische Behaglichkeit

Neben den Adjustierungsvariablen Alter, Geschlecht und Überempfindlichkeit gegen Wärme bzw. Kälte ergeben sich mit dem Likelihood-Quotienten-Test für die Modelle „unbehaglich kalt“ und „unbehaglich warm“ abhängig von der Belüftungsart unterschiedliche Einflussvariablen. Die statistischen Kenngrößen zeigt Anhang 7. Für grundsätzliche Erläuterungen zum Verständnis der Darstellungen sei nochmals auf Abschnitt 4.5.7 verwiesen.

Im Likelihood-Quotienten-Test zeigen sich sowohl bei freier als auch mechanischer Belüftung die Größen Lichtverhältnisse, Temperaturschwankung und Verglasungsanteil als Einflussgrößen auf die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen. Die Variable normierter Freiheitsgrad zeigt sich nur bei den frei belüfteten Arbeitsplätzen als Einflussgröße. Bei mechanischer Belüftung werden die olfaktorische Güte eines Arbeitsplatzes und die Bewertung des Luftzustandes im LQ-Test signifikant.

Bild 30 zeigt für Modell 5 die resultierenden Odds Ratios. Die Befragten, die angaben überempfindlich auf Kälte zu reagieren, haben ein 3,6-faches Risiko sich unbehaglich kalt zu fühlen. Gegenüber dem Modell „kalt“ ist das Odds Ratio hier höher. Wie auch schon im Modell „kalt“ schlagen sich schlechte Lichtverhältnisse in einem erhöhten Risiko nieder, das allerdings etwas geringer ausfällt als beim Modell „kalt“. Mittlere Lichtverhältnisse verändern wie im Modell „kalt“ die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen gegenüber guten Lichtverhältnissen nicht. Die durch Temperaturschwankung erhöhte Chance einer Unbehaglichkeit ist im Vergleich zum Kalt-Modell gleich geblieben. Auch ein normierter Freiheitsgrad von kleiner 1 und ein hoher Verglasungsanteil wirken sich wieder als Risiko aus. Insgesamt ist festzu-

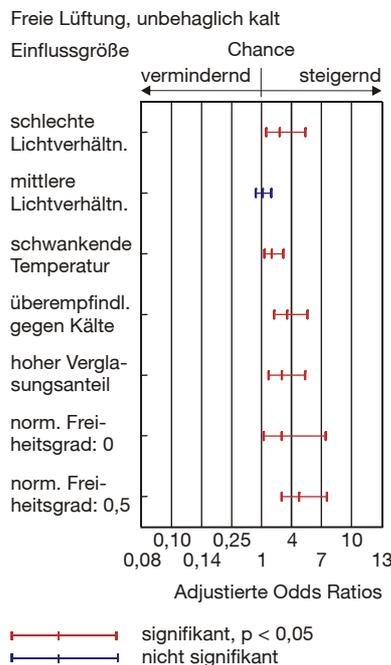


Bild 30 Modell 5 „unbehaglich kalt“ für frei belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, sich unbehaglich kalt zu fühlen. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Alter, Geschlecht und die Einschätzung des Raumklimas als gesundheitsabträglich.

Als Einflussgrößen auf die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen, zeigt sich im Likelihood-Quotienten-Test nur die akustische Güte als für beide Belüftungsarten zutreffende Einflussgröße. Bei freier Lüftung sind die olfaktorische Güte und die Temperaturschwankung Einflussgrößen. Bei mechanischer Lüftung werden weitaus mehr Einflussgrößen signifikant: Gesundheitsabträglichkeit des Raumklimas, Luftzustand, Blendung, modifizierter Sonneneintragskennwert und normierter Freiheitsgrad.

Für frei belüftete Räume stellt Bild 32 die Odds Ratios und Vertrauensintervalle für die Einflussgrößen in Modell 7 dar. Eine niedrige akustische Güte erhöht die Chance der Unbehaglichkeit aufgrund von Wärme 2,1-fach. Eine mittlere akustische Güte wirkt sich gegenüber einer hohen akustischen Güte nicht aus. Eine 7-fache bzw. 2,7-fache Chance besteht bei niedriger bzw. mittlerer olfaktorischer Güte des Raumes, die sich im Gegensatz zum Sehr-Warm-Modell als signifikante Einflussgröße zeigt. Allerdings ist das Vertrauensintervall bei niedriger olfaktorischer Güte sehr groß (2,31 – 17,6). Die Temperaturschwankung weist ein Odds Ratio von 1,8 auf. Personen, die auf Wärme überempfindlich reagieren, haben eine 3,2-fache Chance gegenüber anderen Personen sich unbehaglich warm zu fühlen.

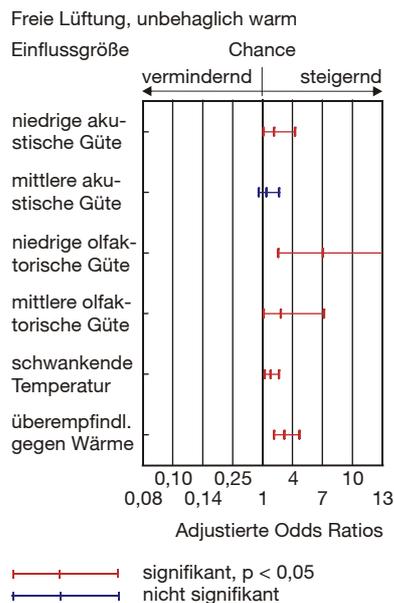


Bild 32 Modell 7 „unbehaglich warm“ für frei belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, sich unbehaglich warm zu fühlen. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Befindlichkeitsstörung, Alter und Geschlecht.

6. Ergebnisse zum Untersuchungszeitpunkt 2

6.1 Stichprobenbeschreibung

Zum Untersuchungszeitpunkt 2 wurde eine Auswahl der bereits zum Untersuchungszeitpunkt 1 befragten Personen erneut befragt und das momentane Raumklima messtechnisch erfasst. Da die Personen zum Untersuchungszeitpunkt 2 so ausgewählt wurden, dass ca. 50% der Befragten in allen Gebäuden Befindlichkeitsstörungen aufwiesen und 50% der Befragten nicht, handelt es sich um keine zufällige Stichprobe. Dieses kann die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Population beeinflussen. Tabelle 15 zeigt die Anzahl der Befragten je Gebäude.

Zum Untersuchungszeitpunkt 2 ist der Anteil der Frauen unter den Befragten im Mittel 5 Prozentpunkte höher. In den fenstergelüfteten Gebäuden (+6 Prozentpunkte) und teilklimatisierten Gebäuden (+8 Prozentpunkte) wurden nun anteilig mehr Frauen befragt als zum Untersuchungszeitpunkt 1. In den klimatisierten Gebäuden sind es nur 3 Prozentpunkte mehr. Der Anteil der Befindlichkeitsgestörten sollte entsprechend der Auswahl eigentlich bei 50% liegen. Jedoch äußerten die Personen nicht mehr so viele Symptome für Befindlichkeitsstörungen, so dass der Anteil gegenüber Untersuchungszeitpunkt 1 im Mittel (37%) gleich geblieben ist. Durch die Auswahl ist der Anteil der Befindlichkeitsgestörten Personen in den frei belüfteten Räumen nun 5 Prozentpunkte und in den teilklimatisierten Räumen 3 Prozentpunkte höher. In den klimatisierten Gebäuden verringert sich der Anteil der Befindlichkeitsgestörten um 4 Prozentpunkte. Die Altersstruktur ist im Mittel erhalten geblieben. In den teilklimatisierten Gebäuden ist der Anteil der unter 31jährigen nun 5 Prozentpunkte höher. Dafür ist in gleichem Maße der Anteil 31-40jährigen gesunken. In den Gebäuden selbst haben sich durch die Auswahl das Geschlechterverhältnis und die Altersstruktur teilweise sehr verschoben. Anhang 9 enthält die soziodemografischen Angaben.

6.2 Witterung zum Zeitpunkt von Messung und Befragung

Für jeden Messtag wurde die Tagesmitteltemperatur der Außenluft und eine so genannte laufende mittlere Außentemperatur bestimmt. Die laufende mittlere Außen-

temperatur eines Messtages bestimmt sich nach Abschnitt 4.2.1 aus den gewichteten Tagesmittelwerten des aktuellen Tages und der vergangenen drei Tage. In Tabelle 15 ist wiederum das Messtage-Mittel dieser Temperaturen für jedes Gebäude dargestellt. Nach dem Messtage-Mittel der laufenden Außentemperatur erfolgt die Einteilung in drei Jahreszeiten. Temperaturen über 12 °C werden dem Sommer zugeordnet; Temperaturen von 0 °C bis 12 °C kennzeichnen die Übergangszeit und Temperaturen unter 0 °C den Winter. In Tabelle 15 ist auch der Wert der Monatsmitteltemperatur aufgeführt.

Gebäude	6	8	7	10	11	13	9	5	16	14	2	15	12	3
Anzahl Angestellter	109	108	117	100	96	107	124	118	113	105	108	110	86	96
Monatsmitteltemperatur [°C]	-1,1	-0,9	-1,3	2,5	5,3	3,2	8,7	4,7	12,9	10,5	12,1	16,8	20,9	19,0
Messtage-Mittel der laufenden Außentemperatur [°C]	-3,5	-1,4	0,7	1,0	5,0	5,4	5,8	8,1	10,5	10,6	15,6	17,8	19,4	21,0
Jahreszeit	Winter		Übergangszeit						Sommer					

Tabelle 15 Anzahl der Befragten und Witterung während Befragung und Messung je Gebäude zum Untersuchungszeitpunkt 2. Grau hinterlegt sind die Gebäude mit ausschließlicher Fensterlüftung.

Zu erkennen ist, dass in keinem der frei belüfteten Gebäude die Untersuchungen im Sommer durchgeführt wurden. In einem der frei belüfteten Gebäude wurden die Befragungen und Messungen im Winter durchgeführt, in allen anderen frei belüfteten Gebäuden in der Übergangszeit. Von den mechanisch belüfteten Gebäuden wurden vier im Sommer untersucht. Drei mechanisch belüftete Gebäude wurden in der Übergangszeit und nur ein Gebäude im Winter untersucht.

	Jahreszeit		
	Winter	Übergangszeit	Sommer
n	157	740	453
Mittelwert	0,70	0,67	0,50
Standardabweichung	0,121	0,134	0,149
Varianzanalyse	F = 241,7 p < 0,001		
Kontraste (t-Test, p-Wert, Effektstärke)	t = -1,97 p = 0,049 d = 0,18		
		t = -20,65 p < 0,001 d = 1,21	
	t = -15,17 p < 0,001 d = 1,36		

Tabelle 16 Mittelwerte der Bekleidungs-dämmung in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Die Bekleidungs-dämmwerte sind ohne den Einfluss eines Stuhles angegeben. Aufgeführt sind auch die Ergebnisse der Varianzanalyse.

6.3 Einordnung gemessener Raumklimaparameter

6.3.1 Aktivitätsgrad und Bekleidungs-dämmung

Die ermittelten Aktivitätsgrade kennzeichnen fast ausschließlich klassische Bürotätigkeiten. 99,5% der Werte wurden mit 70 bis 90 W/m² (1,2 bis 1,55 met) angegeben. Die anderen Aktivitätsgrade lagen zwischen 100 und 135 W/m² (1,7 bis 2,3 met).

Alle Bekleidungs-dämmwerte liegen im Bereich von 0,23 clo bis 1,14 clo. Der Mittelwert beträgt 0,62 clo. Tabelle 17 zeigt die Mittelwerte der Bekleidungs-dämmung in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Die Varianzanalyse (Abschnitt 4.5.4) zeigt, dass sich die Mittelwerte signifikant unterscheiden. Mit Hilfe von Kontrasten wird bestimmt, zwischen welchen Kategorien die Mittelwertunterschiede liegen. Mit der Effektstärke wird die Größe der Unterschiede bewertet. Die Clo-

Werte von Winter und Übergangszeit unterscheiden sich zwar gerade noch signifikant. Die Effektstärke liegt jedoch mit 0,18 unterhalb von 0,2. Damit kann der Effekt als unbedeutend eingestuft werden. Die signifikanten Unterschiede zwischen den Clo-Werten von Sommer (0,50 clo) und Übergangszeit (0,67 clo) bzw. Winter (0,70 clo) sind dagegen als sehr stark einzustufen. In [Stoops 2001] werden für den Sommer in Frankreich Werte von 0,6 clo und in Großbritannien von 0,65 clo berichtet. Im Winter und der Übergangszeit werden Werte von 0,7 clo für Frankreich und 0,75 clo für Großbritannien angegeben.

Die Bekleidungsdämmung wurde auch in Abhängigkeit vom Geschlecht untersucht. Der Unterschied zwischen der Bekleidungsdämmung von Männern und Frauen im Sommer ist signifikant und als ein mittlerer Effekt einzustufen. Im Winter sind die Unterschiede zwar auch signifikant aber als eher schwach einzustufen. Frauen haben vor allem im Sommer eine geringere Bekleidungsdämmung.

Wird zu den beobachteten Bekleidungsdämmwerten ein Dämmwert für einen Bürostuhl von 0,15 clo addiert (Abschnitt 4.2.4), so ergeben sich im Mittel für die Übergangszeit und den Winter 0,81 clo für Frauen bzw. 0,85 clo für Männer. Diese Werte liegen im unteren Bereich des in [DIN EN 13779: 2005] angegebenen üblichen Bereiches für Clo-Werte im Winter. Der dort angegebene Standardwert für die Auslegung beträgt 1,0 clo.

Im Sommer ergeben sich unter Berücksichtigung der zusätzlichen Dämmung durch einen Bürostuhl Dämmwerte für Frauen von 0,63 clo und von 0,70 clo für Männer. Diese Werte liegen im oberen Bereich des in [DIN EN 13779: 2005] angegebenen üblichen Bereiches. Der Standardwert für die Auslegung von 0,5 clo stimmt recht genau mit den beobachteten Bekleidungsdämmwerten ohne Berücksichtigung eines Stuhles überein.

6.3.2 Operative Temperatur

Die operative Temperatur ist eine Klimasummengröße aus Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur. Sie bestimmt sich bei geringen Luftgeschwindigkeiten aus dem Mittelwert der beiden Temperaturgrößen. Bild 34 zeigt die aus gemessener Lufttemperatur und gemessener mittlerer Strahlungstemperatur ermittelten operativen Temperaturen

	Jahreszeit	
	Winter und Übergangszeit	Sommer
Frauen		
n	503	301
Mittelwert	0,66	0,48
Standardabweichung	0,130	0,154
Männer		
n	382	138
Mittelwert	0,70	0,55
Standardabweichung	0,133	0,119
Varianzanalyse, Effektstärke	F = 19,9 p < 0,001 d = 0,30	Welch = 32,6 p < 0,001 d = 0,53

Tabelle 17 Mittelwerte der Bekleidungs-dämmung in Abhängigkeit vom Geschlecht. Die Bekleidungs-dämmwerte sind ohne den Einfluss eines Stuhles angegeben.

je Gebäude als Boxplotdiagramm (Erläuterung siehe Abschnitt 4.5.1). Die Gebäude sind aufsteigend nach dem Messtage-Mittel der laufenden Außentemperatur geordnet. Eingezeichnet sind auch die empfohlenen Bereiche nach [DIN EN ISO 7730: 1995]. Die dortigen Empfehlungen werden getrennt für die Heiz- und für die Kühlperiode gegeben. In der Übergangszeit findet in Bürogebäuden Heizen und Kühlen oft im Wechsel statt. Für Gebäude, die in der Übergangszeit gemessen wurden, sind daher sowohl der empfohlene Bereich für den Sommer und für den Winter eingetragen.

Aus Bild 34 ist zu erkennen, dass der Großteil der ermittelten Temperaturen im zulässigen Bereich liegt. In Gebäude 8 lagen 14 % der Messwerte außerhalb des Winter-Temperaturbereiches von 20 bis 24 °C. In Gebäude 7 wurden 19% der Raumtemperaturen im Bereich von 24 bis 26 °C gemessen. In Gebäude 10 waren 16% der Arbeitsplätze kälter als empfohlen. In Gebäude 11 bzw. Gebäude 13 lagen bei einer laufenden mittleren Außentemperatur von ca. 5 °C 13% bzw. 12% der Werte zwischen 24 und 26 °C. In Gebäude 9 wurde bei 5,8 °C laufender mittlerer Außentemperatur eine Raumtemperatur von 24 °C in 65% der Fälle überschritten. 5% der Fälle überschritten sogar 26 °C. In Gebäude 16 lagen 24% der Raumtemperaturen zwischen 24 und 26 °C. In Gebäude 3 waren bei einer laufenden mittleren Außentemperatur von 21 °C 45% der Arbeitsplätze wärmer als empfohlen. Die Temperaturen in den anderen Gebäuden lagen nahezu vollständig innerhalb der empfohlenen Bereiche. Zu berücksichtigen ist, dass die Temperaturmessungen in einer Höhe von 1,1 m durchgeführt wurden, also in Kopfhöhe einer sitzenden Person (siehe Abschnitt 4.1.2). Dies dürfte bei Mischlüftungssystemen hinreichend genaue Ergebnisse liefern. Bei Fensterlüftung oder Quellluftsystemen kann sich aber unter Umständen ein Temperaturgradient ausbilden. Die operativen Temperaturen wären dann in Knöchelhöhe (0,1 m) und Unterleibshöhe (0,6 m) systematisch geringer.

Ein Vergleich der Messwerte mit der seit Mai 2005 nicht mehr gültigen DIN 1946-2 ist eigentlich nicht zulässig, da die Bezugstemperatur der DIN 1946-2, die momentane Außentemperatur nicht vorlag. Wenn die momentane Außentemperatur durch die Tagesmitteltemperatur ersetzt wird, dann ergibt sich die Zuordnung zu den zulässigen Bereichen der DIN 1946-2 wie in Tabelle 18. Dargestellt ist auch jeweils der Anteil der Personen, die die Raumtemperatur als behaglich bzw. unbehaglich einschätzten.

Operative Raumtemperatur [°C]

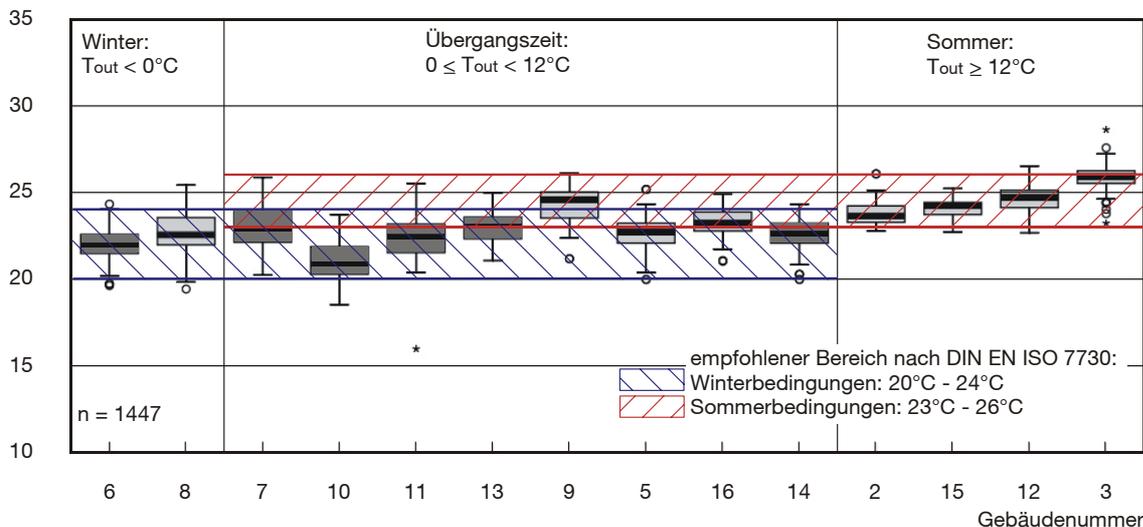


Bild 34 Boxplot-Darstellung der operativen Raumtemperatur ermittelt aus den gemessenen Luft- und mittleren Strahlungstemperaturen für jedes Gebäude sowie der Vergleich mit empfohlenen Temperaturbereichen nach [DIN EN ISO 7730: 1995]. Die Gebäude sind aufsteigend nach dem Messtage-Mittel der laufenden Außentemperatur geordnet. Dunkelgrau hinterlegt sind die frei belüfteten Gebäude.

Belüftung	Raumtemperatur	Anzahl	Häufigkeiten in Bereichen operativer Temperaturen nach DIN 1946-2 nach Bild 3					Gesamt
			unterhalb zulässig	Quelllüftung	empfohlen	kurzfristig zulässig	oberhalb zulässig	
frei	behaglich	n	14	165	300	7	2	488
		%	74	81	81	88	100	81
	unbehaglich	n	5	38	70	1	0	114
		%	26	19	19	13	0	19
mechanisch	behaglich	n	1	50	381	38	28	498
		%	50	85	63	40	55	61
	unbehaglich	n	1	9	223	57	23	313
		%	50	15	37	60	45	39
Gesamt		n	21	262	974	103	53	1413

Tabelle 18 Zuordnung der gemessenen operativen Raumtemperaturen zu den zulässigen Bereichen der DIN 1946-2. Als Bezugstemperatur wurde jedoch die Tagesmitteltemperatur anstatt der momentanen Außentemperatur verwendet. Letztere lag nicht vor.

In frei belüfteten Gebäuden geben nur 19% an die Raumtemperatur als unbehaglich zu empfinden. In mechanisch belüfteten Gebäuden waren es 39%. In frei belüfteten Gebäuden liegen an nur 19 Arbeitsplätzen die Raumtemperaturen unterhalb der zulässigen Bereiche und an nur 2 Arbeitsplätzen oberhalb der zulässigen Bereiche. An nur 8 Arbeitsplätzen liegt die Raumtemperatur zwischen 25 und 26 °C, dem kurzfristig zulässigen Bereich.

Zwei Arbeitsplätze in den mechanisch belüfteten Gebäuden weisen Raumtemperaturen unterhalb der zulässigen Bereiche auf. 51 Arbeitsplätze hatten Temperaturen oberhalb der zulässigen Bereiche. Temperaturen zwischen 25 und 26 °C wurden an 95 Arbeitsplätzen gemessen. In den zulässigen

Bereichen beträgt der Anteil der Personen, die die Raumtemperatur als unbehaglich einstufen, in frei belüfteten Gebäuden 13% bis 19% und in mechanisch belüfteten Gebäuden 15% bis 60%.

6.3.3 Vorhergesagtes Mittleres Votum nach Fanger

Bei der Analyse der operativen Raumtemperatur wie in Bild 34 können jedoch der Bekleidungsgrad und der Aktivitätsgrad nicht berücksichtigt werden. Dies wird möglich, durch Bestimmung des Predicted Mean Vote (PMV), dem vorhergesagten mittleren Votum für das thermische Empfinden. Das PMV wird für jede Person aus den Messwerten berechnet. Bild 35 zeigt die in den Gebäuden aufgetretenen PMV-Werte. Eingezeichnet sind auch die empfohlenen PMV-Bereiche für die drei Kategorien nach [ISO 7730: 2003].

Vorhergesagtes mittleres Votum (PMV) nach ISO 7730 [-]

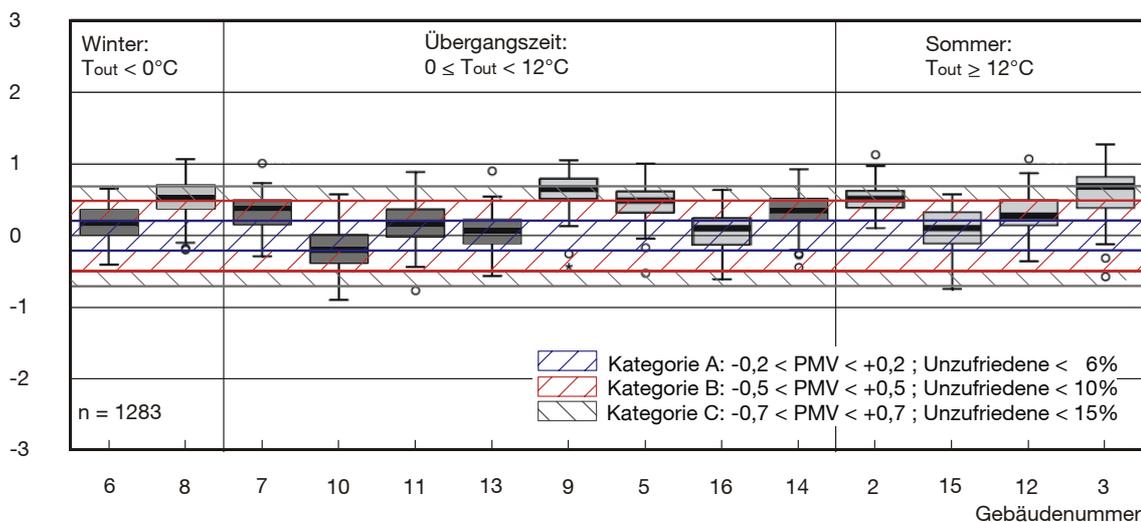


Bild 35 Boxplot-Darstellung des vorhergesagten mittleren Votums (PMV) für jedes Gebäude sowie der Vergleich mit empfohlenen Bereichen nach [ISO 7730: 2003]. Die Gebäude sind aufsteigend nach dem Messtage-Mittel der laufenden Außentemperatur geordnet. Dunkelgrau hinterlegt sind die frei belüfteten Gebäude.

Nur bei den Gebäuden 13, 16 und 15 liegt ein großer Teil (57%, 48% bzw. 40%) der PMV-Werte innerhalb der Kategorie A, die einen sehr engen zulässigen Bereich besitzt. Liegen die Werte in diesem Bereich, so ist nach [ISO 7730: 2003] mit weniger als 6% Unzufriedenen zu rechnen. In Gebäude 8, 9 und 3 liegen sehr viele PMV-Werte sogar außerhalb der Kategorie C. Zu erkennen ist auch, dass – ausgenommen Gebäude 6, 10, 13, 16 und 15 – ein größerer Anteil der PMV-Werte den empfohlenen Bereich der Kategorien A,

B oder C auf der Warm-Empfindungsseite überschreitet. Die PMV-Mittelwerte aller Gebäude haben daher auch ein positives Vorzeichen. Dies bedeutet, dass die Gebäude nach Fanger im Mittel als eher warm einzustufen waren. Gebäude 10 hat als einziges Gebäude einen negativen PMV-Mittelwert. (Anhang 10).

6.3.4 Vorhergesagtes Mittleres Votum nach Mayer

Bild 36 stellt die aus Messwerten ermittelten PMV-Werte dem Ansatz von [Mayer 1998] gegenüber. Mayer legte sein Optimum-PMV auf ein PMV von +0,4 (dort ist mit dem geringsten Anteil Unzufriedener zu rechnen: 16%; siehe Abschnitt 2.3.3). Um mit den empfohlenen Bereichen der Kategorien A, B und C nach [ISO 7730: 2003] vergleichen zu können, werden die drei unten dargestellten Bereiche (+0,2 bis +0,6; -0,1 bis +0,9 und -0,3 bis +1,1) in ihrer Breite wie die Kategorien A, B und C nach ISO 7730 festgelegt.

Zu erkennen ist, dass ein Teil der PMV-Werte in frei belüfteten Gebäuden und in Gebäude 15 und 16 nun unterhalb des weitesten Bereiches (angelehnt an Kategorie C der ISO 7730) liegt. Nur noch Gebäude 3 überschreitet die festgelegten Bereiche auf der Warm-Seite.

Vorhergesagtes mittleres Votum (PMV) nach ISO 7730; Anteil Unzufriedener nach Mayer [-]

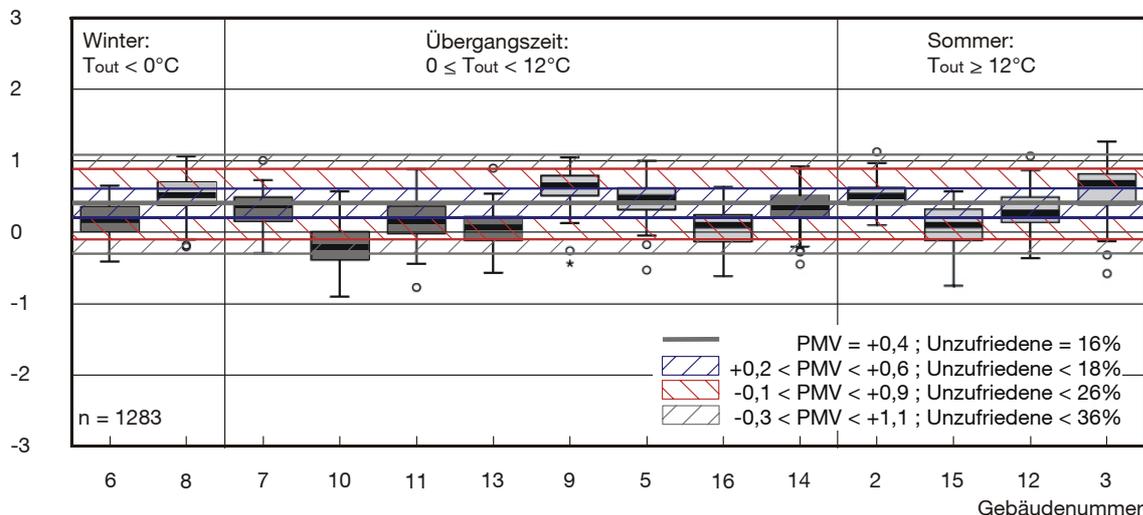
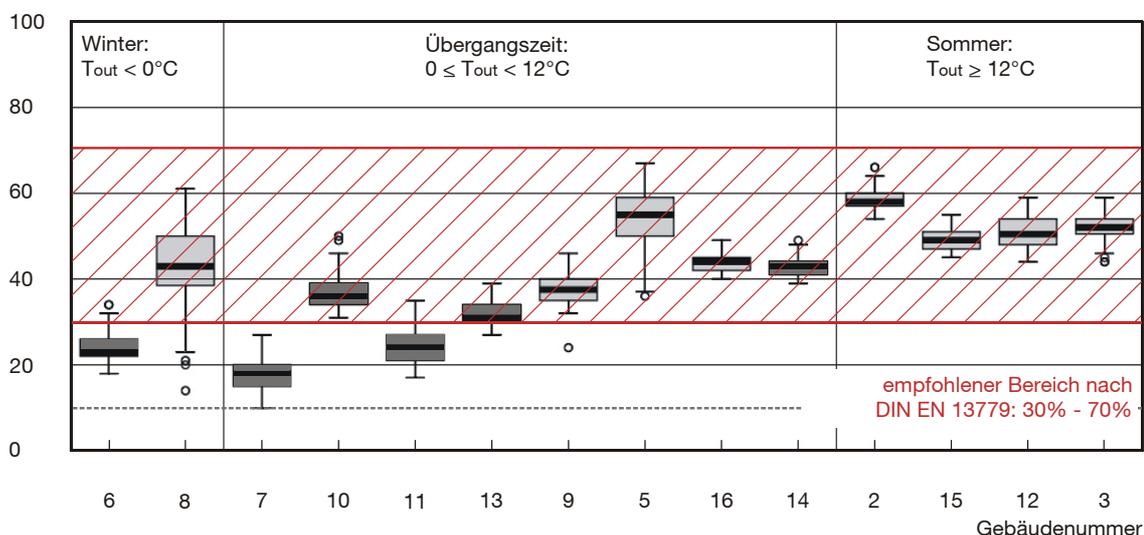


Bild 36 Boxplot-Darstellung des vorhergesagten mittleren Votums (PMV) für jedes Gebäude sowie der Vergleich mit dem Ansatz von [Mayer 1998]. Die Bereichsbreiten wurden in Anlehnung an [ISO 7730: 2003] festgelegt. Die Gebäude sind aufsteigend nach dem Messtage-Mittel der laufenden Außentemperatur geordnet. Dunkelgrau hinterlegt sind die frei belüfteten Gebäude.

6.3.5 Relative Luftfeuchte

Die [DIN EN 13779: 2005] empfiehlt als zulässigen Bereich für die relative Luftfeuchte Werte zwischen 30 und 70%. Die Messwerte in den frei belüfteten Gebäuden 6, 7, 11 liegen deutlich unterhalb von 30 % (Bild 37). In Gebäude 7 werden sogar 10% relative Feuchte erreicht. Trotzdem spiegelt sich dies nicht in der Bewertung durch die Befragten wider (unterer Teil von Bild 37). Der dort abzulesende Mittelwert liegt für alle Gebäude bei ca. 2. Dies bedeutet, dass die Luftfeuchte durch die Personen im Mittel mit eher trocken

Relative Luftfeuchte [%]



Bewertung durch Personen

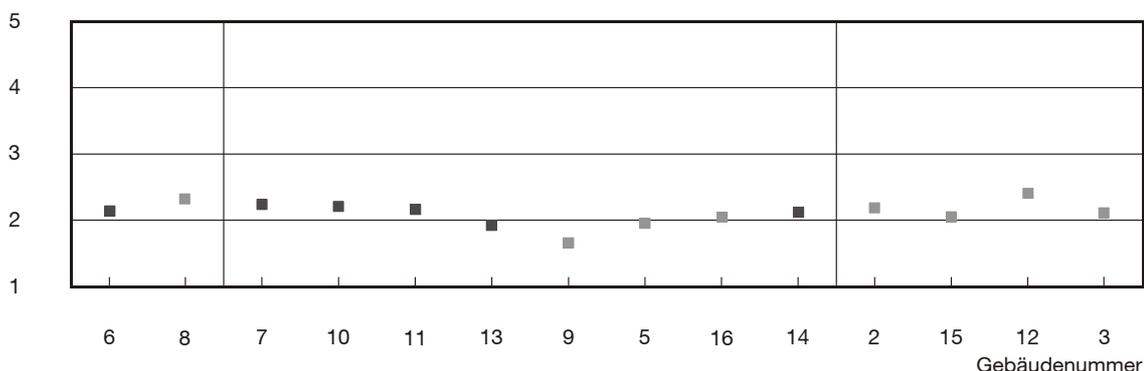


Bild 37 Boxplot-Darstellung der gemessenen relativen Luftfeuchten für jedes Gebäude im oberen Teil des Bildes sowie der Mittelwert der aus der Befragung ermittelten Beurteilung der Raumluftfeuchte durch die Personen im unteren Teil des Bildes. Die Bewertung durch die Personen erfolgte auf einer 5-stufigen Skala mit 1 = sehr trocken, 2 = eher trocken, 3 = weder trocken noch feucht, 4 = eher feucht und 5 = sehr feucht. Die Gebäude sind aufsteigend nach dem Messtage-Mittel der laufenden Außentemperatur geordnet. Dunkelgrau gekennzeichnet sind die frei belüfteten Gebäude.

beurteilt wird. Dies trifft allerdings auch auf die Gebäude 5 und 2 zu, in denen die gemessene Luftfeuchte im Mittel bei 55-60% lag. Der Vergleich der Messwerte mit den Befragungen bestätigt, dass der Mensch kein Sensorium für die Luftfeuchte besitzt.

6.3.6 Luftgeschwindigkeit

Die im ProKlimA-Projekt gemessenen mittleren Luftgeschwindigkeiten zeigt Tabelle 19. Die gemessenen Werte liegen nahezu vollständig unterhalb einer Grenze von 0,13 m/s. Zu berücksichtigen ist, dass die mittleren Luftgeschwindigkeiten in einer Höhe von 1,1 m ermittelt wurden, also in Kopfhöhe einer sitzenden Person (siehe Abschnitt 4.1.2). In Abhängigkeit vom Belüftungssystem können sich höhere Luftgeschwindigkeiten vor allem im Knöchelbereich (0,1 m) von Personen ergeben. Daher wurde an dieser Stelle auf eine Bewertung des Zugluftrisikos verzichtet.

Belüftung	Anzahl	Mittlere Luftgeschwindigkeit [m/s]					Gesamt
		$v \leq 0,10$	$0,10 < v \leq 0,13$	$0,13 < v \leq 0,16$	$0,16 < v \leq 0,20$	$v > 0,20$	
frei	n	493	4	4	5	0	506
	%	97,4	0,8	0,8	1,0	0	100
mechanisch	n	764	48	9	1	3	825
	%	92,6	5,8	1,1	0,1	0,4	100
Gesamt	n	1257	52	13	6	3	1331

Tabelle 19 Mittlere Luftgeschwindigkeiten an den Arbeitsplätzen in Abhängigkeit von der Belüftungsart. Die mittlere Luftgeschwindigkeit wurde in einer Höhe von 1,1 m ermittelt.

6.4 Beurteilung des Raumklimas

Die Ergebnisse der Befragung zum Raumklima sollen nur im Vergleich zu den Resultaten des Untersuchungszeitpunktes 1 in Abschnitt 5.4 gezeigt werden. Eine Darstellung der Befragungsergebnisse aus Untersuchungszeitpunkt 2 erfolgt hier nicht im Detail, da die Stichprobe nicht zufällig erhoben wurde. Die Häufigkeitsverteilung der Antworten zum thermischen Empfinden (warm – kalt) zeigt für Fensterlüftung und Teilklimatisierung einen vergleichbaren Verlauf wie zum Untersuchungszeitpunkt 1. Bei klimatisierten Gebäuden ist der Anteil der „sehr warm“ Urteilenden gegenüber Untersuchungszeitpunkt 1 deutlich gesunken, der Anteil ist dennoch höher als bei den anderen Belüftungsarten. Für die thermische Behaglichkeit (unbehaglich – behagliche Temperatur) ergibt sich ein ähnlicher Effekt. Die Häufigkeitsverteilungen bei Fensterlüftung und Teilklimatisierung sind vergleichbar denen zum Untersuchungszeitpunkt 1. In den fenstergelüfteten Gebäuden geben 19% der Befragten an, die Raumtemperatur sehr oder eher unbehag-

lich zu empfinden. In Gebäuden mit Teilklimaanlage beträgt der Anteil dagegen 32%. In den Gebäuden mit Klimaanlage bewerteten 44% ihre thermische Umgebung mit sehr oder eher unbehaglich. Zum Untersuchungszeitpunkt 1 sind es bei freier Lüftung 20%, bei Teilklimaanlage 34% und bei Klimaanlage 54%. In klimatisierten Gebäuden ist der Anteil derjenigen, die die Temperatur als sehr oder eher unbehaglich einstufen gesunken, aber anteilig immer noch höher als bei Fensterlüftung oder Teilklimatisierung.

Auch bei den Größen

- Schwankende – gleichförmige Temperatur
- starke – schwache Luftbewegung
- trockene – feuchte Luft
- verbrauchte – frische Luft
- laut – leise auf

sind die Häufigkeitsverteilungen bei Fensterlüftung und Teilklimatisierung vergleichbar denen zum Untersuchungszeitpunkt 1. Der Verlauf der Häufigkeitsverteilungen der klimatisierten Gebäude hat sich dem Verlauf der Verteilung bei teilklimatisierten Gebäuden angenähert. Dementsprechend wird das Raumklima insgesamt von Personen in klimatisierten Gebäuden nun weniger schlecht eingestuft. Allerdings bleibt der deutliche Unterschied, dass fenstergelüftete Gebäude bei allen oben angeführten Raumklimaparametern besser beurteilt werden, aber zum Untersuchungszeitpunkt 2 erhalten.

6.5 Verifizierung der logistischen Modelle

Die in den Abschnitten 5.8.2 bzw. 5.8.3 auf Basis der Daten des Untersuchungszeitpunktes 1 entwickelten logistischen Modelle für das thermische Empfinden bzw. die thermische Behaglichkeit werden nun anhand der Daten des Untersuchungszeitpunktes 2 verifiziert. Da im Untersuchungszeitpunkt 2 die Fragen nach der persönlichen Einschätzung der Einflussnahmemöglichkeit, aus der in Untersuchungszeitpunkt 1 der normierte Freiheitsgrad gebildet wurde, nicht erneut erhoben wurde, werden die Daten aus Untersuchungszeitpunkt 1 verwendet. Es kann angenommen werden, dass eine Übertragung möglich ist, ändern sich doch die wahren Verhältnisse an einem Arbeitsplatz (wirkliche Einflussnahmemöglichkeiten durch Sonnenschutz, Thermostatventile etc.) nicht. Allerdings zeigt die Analyse der Raumklimabeurtei-

lungen zum Untersuchungszeitpunkt 2 in Abschnitt 6.4, dass die Urteile gerade in den Gebäuden mit Klimaanlage etwas weniger extrem und weniger negativ ausfallen als zum Untersuchungszeitpunkt 1. Es wäre also möglich, dass sich die Ausprägung des normierten Freiheitsgrades ebenfalls geändert hätte.

In einem nächsten Schritt wird jedes Modell daraufhin untersucht, ob eine Adjustierung auf die gemessenen bzw. bestimmten Größen wie Bekleidungsdämmung, Metabolismus, operative Temperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte die Einflussgrößen der gefundenen Modelle in ihrer Ausprägung verändert.

6.5.1 Modelle thermisches Empfinden

In Bild 38 ist das Ergebnis der Verifizierung des Modells 1 für Kalt-Empfinden in frei belüfteten Gebäuden abgebildet. Die Modellkennwerte (Anhang 11) sind als gut einzustufen. Daraus kann geschlossen werden, dass das Modell das Kalt-Empfinden bei freier Lüftung recht gut abbildet. Die Wirkungsrichtung der Einflussgrößen ist gegenüber Untersuchungszeitpunkt 1 gleich geblieben. In der Verifizierung von Modell 1 werden allerdings aufgrund zu geringer Häufigkeiten die Kategorien mittlere Lichtverhältnisse und gute Lichtverhältnisse als Referenzgröße im Gegensatz zu schlechten Lichtverhältnissen zusammengefasst. Auch die Kategorien kein normierter Freiheitsgrad und normierter Freiheitsgrad von 0,5 werden zusammengefasst. Da die zusammengefassten Kategorien jeweils die gleiche Wirkungsrichtung aufweisen, bereitet dies keine Probleme. Die Vertrauensintervalle sind aufgrund einer geringeren Anzahl an Befragten größer geworden. Die Einflussgrößen niedrige bzw. mittlere akustische Güte und Verglasungsanteil sind nicht mehr signifikant.

Werden die gemessenen bzw. bestimmten Größen Metabolismus, Bekleidungsdämmung, operative Temperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit als Adjustierungsgrößen ins Modell genommen, ändert sich Ausprägung der Odds Ratios nur unwesentlich. Die statistischen Größen des Modells zeigen auch, dass sich die Güte des Modells dadurch nicht verbessert (Anhang 12).

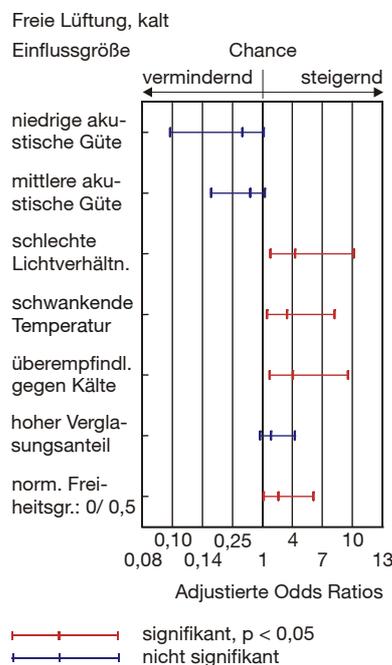


Bild 38 Ergebnis der Verifizierung für Modell 1 „kalt“ für frei belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, eine Umgebung als kalt zu empfinden. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Befindlichkeitsstörung, Alter und Geschlecht.

Die Adjustierung auf die raumklimatischen Messwerte bewirkt, dass die Einflussgröße niedrige olfaktorische Güte nun Signifikanz (OR = 2,64) erreicht. Das Odds Ratio für den Einfluss der schlechten Lichtverhältnisse wird kleiner und damit noch stärker Chance vermindern (Anhang 12).

Die Verifizierung von Modell 4, das für mechanisch belüftete Gebäude die Chance modelliert, eine thermische Umgebung als sehr warm einzustufen, ist mit Daten des Untersuchungszeitpunktes 2 erfolgreich (Anhang 11). Die Ausprägung der Odds Ratios der Einflussgrößen bleibt überwiegend erhalten. Die OR der Größen niedrige und mittlere akustische Güte sind gegenüber Untersuchungszeitpunkt 1 sehr groß. Dies liegt ebenso wie die sehr weiten Vertrauensintervalle in der geringen Häufigkeit von Personen mit einem „sehr warm“ Urteil in der Bezugskategorie „hohe akustische Güte“ begründet. Die Einflussgröße Temperaturschwankung zeigt sich mit den Daten des Untersuchungszeitpunktes 2 nicht signifikant. Ebenso der normierte Freiheitsgrad. Die Odds Ratios für den normierten Freiheitsgrad waren schon im Untersuchungszeitpunkt 1 nicht erklärbar. Auch dort wurde schon vermutet, dass in Wirklichkeit kein Einfluss dieser Größe auf die Zielgröße besteht. Dies scheint sich nun zu bestätigen.

Nach Adjustierung des Modells auf die raumklimatischen Messgrößen ist das Odds Ratio für den Einfluss des Sonneneintragskennwertes nicht mehr signifikant (Anhang 12). Dies ist nicht überraschend, da ein hoher Sonneneintragskennwert, die Raumtemperatur beeinflusst. Im Modell ohne gemessene operative Temperatur hat der Sonneneintragskennwert die Funktion einer hohen Raumtemperatur übernommen.

6.5.2 Modelle thermische Behaglichkeit

Bild 42 gibt das Ergebnis der Verifizierung von Modell 5 „unbehaglich kalt“ für frei belüftete Räume wieder. Insgesamt äußerten nur 19 Personen Unbehaglichkeit wegen Kalt-Empfinden. Aufgrund der geringen Häufigkeiten wird die Referenzkategorie gute Lichtverhältnisse mit der Kategorie mittlere Lichtverhältnisse zusammengefasst. Aus dem gleichen Grund werden auch die Größe kein normierter

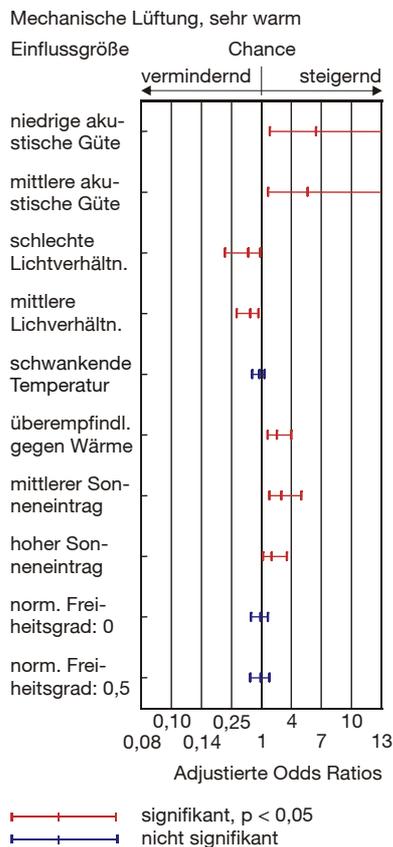


Bild 41 Ergebnis der Verifizierung für Modell 4 „sehr warm“ für mechanisch belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, eine Umgebung als sehr warm zu empfinden. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Alter, Geschlecht und die Einschätzung des Raumklimas als gesundheitsabträglich.

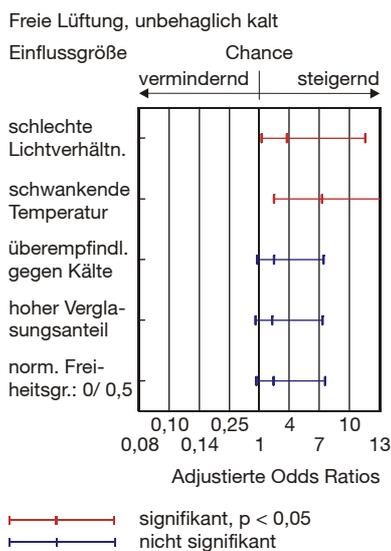


Bild 42 Ergebnis der Verifizierung für Modell 5 „unbehaglich kalt“ für frei belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, sich unbehaglich kalt zu fühlen. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Alter, Geschlecht und die Einschätzung des Raumklimas als gesundheitsabträglich.

Freiheitsgrad und normierter Freiheitsgrad von 0 zusammengefasst. Die Vertrauensintervalle aller Einflussgrößen sind aufgrund der geringen Häufigkeiten sehr groß. Die Einflussgrößen Überempfindlichkeit gegenüber Kälte, hoher Verglasungsanteil und normierter Freiheitsgrad (0 und 0,5) zeigen sich aufgrund der geringen Besetzung auch nicht signifikant. Allerdings ist die Wirkungsrichtung dieser Größen tendenziell die gleiche geblieben. Die Tests der Modellgüte zeigen an, dass das Modell eine gute Beschreibung dafür liefert, sich unbehaglich kalt zu fühlen (Anhang 11).

Die Adjustierung auf die raumklimatischen Messwerte lässt das Odds Ratio für den Einfluss einer schwankenden Temperatur etwas steigen. Die Odds Ratios der anderen Einflussgrößen verändern sich nicht (Anhang 12).

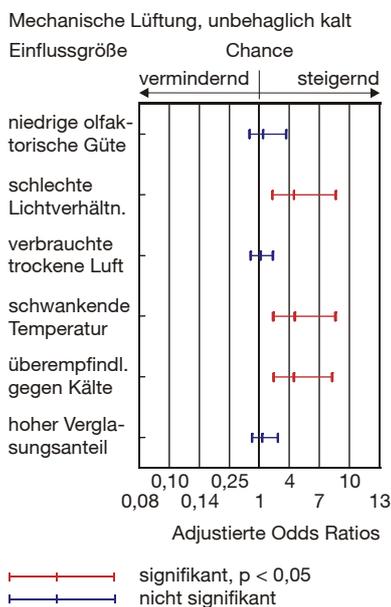


Bild 43 Ergebnis der Verifizierung für Modell 6 „unbehaglich kalt“ für mechanisch belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, sich unbehaglich kalt zu fühlen. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Alter und Geschlecht.

Für mechanisch belüftete Räume zeigt Bild 43 die Verifizierung des Modells 6 unbehaglich kalt mit Daten des Untersuchungszeitpunktes 2. Die Größen mittlere und hohe olfaktorische Güte sowie gute und mittlere Lichtverhältnisse werden zusammengefasst. Eine niedrige olfaktorische Güte stellt sich in der Verifizierung nicht als eine Erhöhung der Chance dar, sich unbehaglich kalt zu fühlen. Dies entspricht auch eher der bisherigen Vermutung, nach der eine schlechte olfaktorische Güte eher mit einem Zu-Warm-Empfinden einhergeht. Es bestätigt sich auch, dass die Einstufung des Luftzustandes als verbraucht und trocken keinen direkten Einfluss auf die Unbehaglichkeit aufgrund von Kälte hat. Temperaturschwankung und Überempfindlichkeit gegenüber Kälte zeigen sich beide wieder signifikant mit vergleichbaren Odds Ratios wie in Untersuchungszeitpunkt 1, allerdings mit größeren Vertrauensintervallen. Der Verglasungsanteil hat keinen signifikanten Einfluss auf die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen. Die statistischen Größen zur Bewertung der Modellgüte in Anhang 11 zeigen recht gute Ergebnisse.

Auch bei mechanisch belüfteten Gebäuden verändern sich die Odds Ratios der Einflussgrößen durch die Adjustierung auf die raumklimatischen Messgrößen nur unwesentlich (Anhang 12).

Bild 44 zeigt die Odds Ratios der Verifizierung für Modell 7 für frei belüftete Räume. Zusammengefasst werden aufgrund zu geringer Häufigkeiten hohe und mittlere akustische Güte sowie hohe und mittlere olfaktorische Güte. Nur eine Einflussgröße hat ein signifikantes Odds Ratio. Die anderen Odds Ratios zeigen tendenziell die gleiche Wirkungsrichtung an wie zum Untersuchungszeitpunkt 1. Allerdings liefern die Bewertungskriterien der Modellgüte unbefriedigende Ergebnisse (Anhang 11). Die Klassifizierung nach Hosmer-Lemeshow ergibt zwar einen guten Wert, jedoch das Nagelkerke R^2 und die Klassifikationstabelle liefern nicht akzeptable Werte. Es muss vermutet werden, dass es mindestens einen anderen Einflussfaktor gibt, der nicht im Modell enthalten ist und vermutlich auch innerhalb des Untersuchungszeitpunktes 1 nicht erhoben wurde. Auch eine Adjustierung auf die Messgrößen verbessert das Modell nicht. Die Odds Ratios der Einflussgrößen werden nur geringfügig verändert.

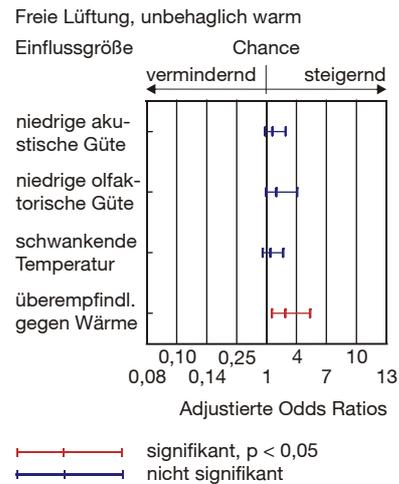
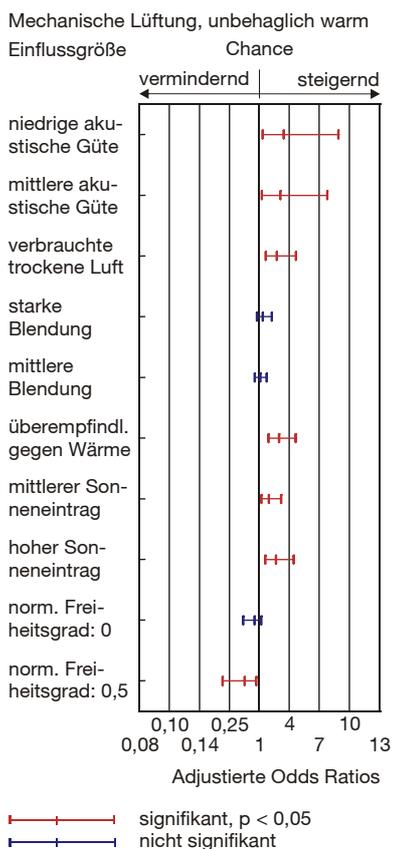


Bild 44 Ergebnis der Verifizierung für Modell 7 „unbehaglich warm“ für frei belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, sich unbehaglich warm zu fühlen. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Befindlichkeitsstörung, Alter und Geschlecht.

Mit dem Modell 8, das die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen für mechanisch belüftete Räume abbilden soll, wurden dagegen gute Verifizierungsergebnisse erzielt (Anhang 11). Niedrige und mittlere akustische Güte stellen mit etwas höheren Odds Ratios und größeren Vertrauensintervallen als zum Untersuchungszeitpunkt 1 wieder eine Erhöhung der Chance dar, sich unbehaglich warm zu fühlen. Gleiches gilt für eine Einstufung der Luft als verbraucht und trocken. Blendungseffekte haben dagegen nun keine signifikanten Odds Ratios. Diese Größe hat entweder keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen. Überempfindlichkeit gegenüber Wärme und ein hoher bzw. mittlerer Sonneneintrag stellen ein Risiko dar. Der normierte Freiheitsgrad hat in der Verifizierung eine andere Wirkungsrichtung als zum Untersuchungszeitpunkt 1. Bereits oben wurde aber darauf hingewiesen, dass der normierte Freiheitsgrad vom Untersuchungszeitpunkt 1 auf den Untersuchungszeitpunkt 2 übertragen wurde. Dies könnte eine Ursache für die aufgetretenen Effekte sein.

Wie beim Modell „sehr warm“ für mechanische belüftete Räume bewirkt der Einfluss der Adjustierung auf die Messgrößen, dass der Einfluss eines mittleren bzw. hohen Sonneneintragskennwertes nicht mehr signifikant wird. Der Einfluss der schlechten und mittleren akustischen Güte wird



etwas verstärkt und die Chance erhöhende Wirkung einer verbrauchten und trockenen Luft wird etwas geringer.

Die Verifizierung der mit den Daten aus Untersuchungszeitpunkt 1 entwickelten Modelle mit Daten des Untersuchungszeitpunktes 2 ist erfolgreich. Für die Modelle sehr warm und unbehaglich warm bei Fensterlüftung bestätigt sich im Untersuchungszeitpunkt 2 die unzureichende Modellgüte, die auch schon zum Untersuchungszeitpunkt 1 festgestellt wurde. Hier muss es andere, nicht erfasste Einflussfaktoren geben. Der normierte Freiheitsgrad zeigt sich in der Verifizierung teilweise schwierig interpretierbar. In einigen Modellen bestätigt sich seine Wirkungsrichtung in anderen Modellen verändert sich die Wirkungsrichtung. Damit konnte in gewissem Umfang allerdings vorher gerechnet werden, da der normierte Freiheitsgrad eine Variable aus dem Untersuchungszeitpunkt 1 ist. Leider war aufgrund des Designs von Untersuchungszeitpunkt 2 keine andere Lösung möglich. Im Grundsatz bestätigen sich die Ergebnisse aus Abschnitt 5.8.

Bild 45 Ergebnis der Verifizierung für Modell 8 „unbehaglich warm“ für mechanisch belüftete Räume. Die Odds Ratios der dargestellten Einflussgrößen stellen die Erhöhung oder Verringerung der Chance dar, sich unbehaglich warm zu fühlen. Dargestellt sind auch die Vertrauensintervalle. Adjustiert auf Alter, Geschlecht und die Einschätzung des Raumklimas als gesundheitsabträglich.

6.6 Beobachtete und vorhergesagte optimale Raumtemperaturen

Im Folgenden werden jeweils für freie und mechanische Lüftung miteinander verglichen:

- die aus den Messwerten ermittelten operativen Temperaturen, bei denen die Befragten angegeben hatten sich behaglich zu fühlen,

mit

- den nach verschiedenen Vorhersagemethoden ermittelten optimalen operativen Raumtemperaturen (Abschnitt 4.3) für die gleichen Personen.

Zunächst werden für jede Person und jede Vorhersagemethode die Differenzen der vorhergesagten optimalen und der gemessenen Temperaturen gebildet. Bild 46 und Bild 47 zeigen die Häufigkeiten, mit denen diese Differenzen auftreten. Die Überprüfung erfolgt mit einem t-Test für gepaarte Stichproben (Abschnitt 4.5.4). Die statistischen Kenngrößen enthält Anhang 13.

Für frei belüftete Räume zeigt der t-Test, dass die Mittelwerte der gemessenen operativen Temperatur und der optimalen operativen Temperaturen nach [ISO 7730: 2003], [Mayer 1998], [Boerstra et al. 2003; van Hoof, Hensen 2005] signifikant (alle $p < 0,001$) verschieden sind. Die Vorhersage nach [ASHRAE 2004; de Dear, Brager 2002] liefert dagegen im Mittel eine gute Vorhersage für frei belüftete Räume. Aus Bild 46 ist ersichtlich, dass bei Anwendung der Methode nach [ASHRAE 2004; de Dear, Brager 2002] der Mittelwert der Differenzen nahezu Null ist und damit die beste Vorhersage liefert.

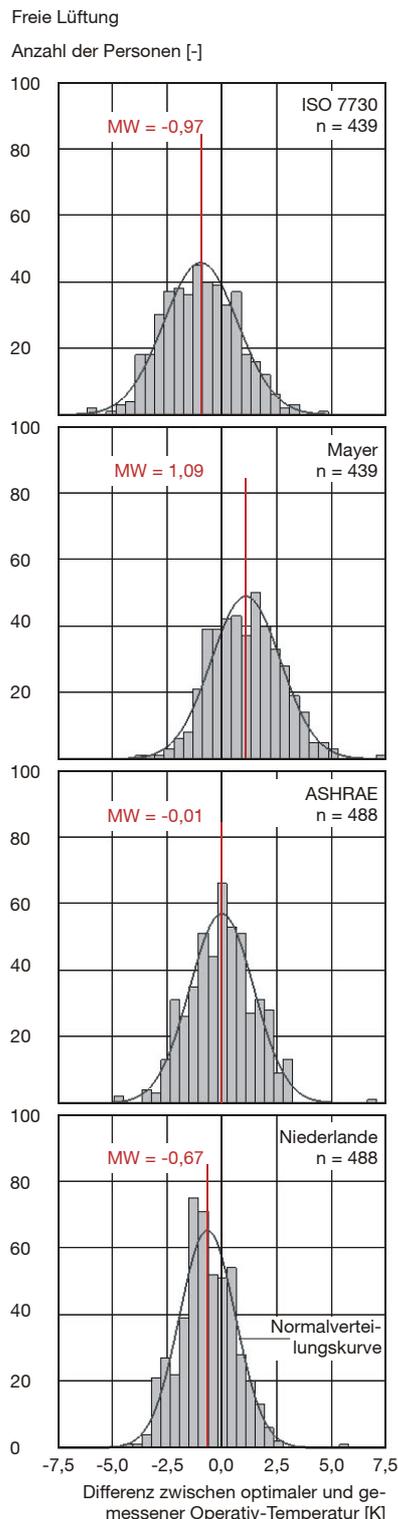
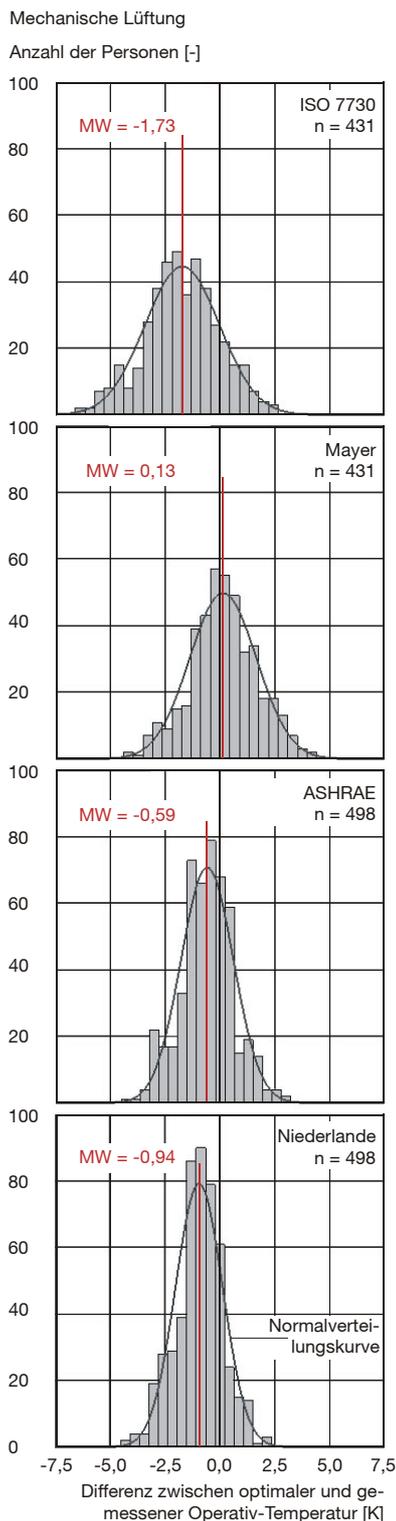


Bild 46 Häufigkeitsverteilung der Differenzen zwischen optimaler operativer Temperatur und gemessener operativer Temperatur für frei belüftete Arbeitsplätze. Die optimalen Temperaturen wurden nach [ISO 7730: 2003], [Mayer 1998], [ASHRAE 2004; de Dear, Brager 2002] und [Boerstra et al. 2003; van Hoof, Hensen 2005] bestimmt.



Für mechanisch belüftete Gebäude zeigt Bild 47 die Häufigkeitsverteilungen der Differenzen zwischen optimaler und gemessener Operativ-Temperatur sowie den Mittelwert der Differenzen. Mit dem t-Test ergibt sich, dass die Mittelwerte der optimalen Temperaturen nach [ISO 7730: 2003], [ASHRAE 2004; de Dear, Brager 2002], [Boerstra et al. 2003; van Hoof, Hensen 2005] sich signifikant (alle $p < 0,001$) von dem Mittelwert der operativen gemessenen Temperatur unterscheiden. Die mit [Mayer 1998] bestimmte optimale operative Temperatur weicht im Mittel zwar signifikant ($p = 0,077$) vom Mittelwert der Ist-Temperatur ab, erreicht aber fast das vorher festgelegte Signifikanzniveau von 0,10. Dies deutet darauf hin, dass mit der Methode nach [Mayer 1998] im Vergleich zu den anderen Methoden für mechanisch belüftete Gebäude recht gute Vorhersagen gemacht werden können.

Bild 47 Häufigkeitsverteilung der Differenzen zwischen optimaler operativer Temperatur und gemessener operativer Temperatur für mechanisch belüftete Arbeitsplätze. Die optimalen Temperaturen wurden nach [ISO 7730: 2003], [Mayer 1998], [ASHRAE 2004; de Dear, Brager 2002] und [Boerstra et al. 2003; van Hoof, Hensen 2005] bestimmt.

6.7 Bandbreite der gemessenen Temperaturen

Zum Vergleich der Bandbreiten der gemessenen operativen Temperaturen in frei belüfteten und mechanisch belüfteten Gebäuden wurde ein Test auf Varianzhomogenität nach Levene (Abschnitt 4.5.4) durchgeführt. Für den Test wurden nur die aufgetretenen gemessenen Operativ-Temperaturen an den Arbeitsplätzen herangezogen, an denen die Personen die Raumtemperatur als behaglich einstufen. Die aufgetretenen Varianzen der Temperaturen von behaglich urteilenden Personen sind in frei belüfteten und mechanisch belüfteten Räumen gleich. Es kann also kein Unterschied im Spektrum der als behaglich empfundenen Temperaturen festgestellt werden (Statistische Kenngrößen in Anhang 14).

Es wurde auch untersucht, ob zwischen den Personen, die die Raumtemperatur als unbehaglich einstufen und denen, die behaglich urteilten, Unterschiede in der operativen Temperatur zu finden sind. Die Untersuchung erfolgt getrennt nach der Belüftungsart.

Es zeigt sich, dass die aufgetretenen Varianzen bei freier Lüftung für behaglich und unbehaglich urteilende Personen gleich sind. Die aufgetretene Temperaturbandbreite ist also bei beiden Personengruppen gleich. Eine Überprüfung der Mittelwerte zeigt ebenfalls, dass keine Unterschiede bestehen. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Personen, die die Raumtemperatur bei freier Lüftung als unbehaglich einstufen (19%), entweder einen von der Mehrheit der Personen abweichenden Temperaturbereich bevorzugen oder andere Einflussgrößen für die Unbehaglichkeit verantwortlich sind.

Für mechanisch belüftete Arbeitsplätze sind die Varianzen ebenfalls gleich. Die Mittelwerte jedoch sind unterschiedlich. Der Mittelwert der Operativ-Temperatur der Personen, die die Raumtemperatur als behaglich einschätzten, beträgt 23,6 °C. Der Mittelwert für die Personen, die die Raumtemperatur unbehaglich empfanden, ist mit 24,1 °C etwas höher. Die 95%-Vertrauensintervalle für die Mittelwerte überschneiden sich nicht:

- Behagliche Raumtemperatur: 23,5 °C – 23,7 °C.
- Unbehagliche Raumtemperatur: 24,0 °C – 24,3 °C.

Die Personen, die sich in mechanisch belüfteten Räumen unbehaglich fühlten, haben im Mittel eine höhere Raumtemperatur als die Personen, die sich behaglich fühlen. Für die Personen, die sich unbehaglich fühlten (39%), könnte sich also ein Teil der Personen unbehaglich aufgrund von zu hoher Temperatur fühlen. Die statistischen Größen zeigt Anhang 13.

7. Verifizierung der Hypothesen und Diskussion

Im Folgenden sollen die vorgestellten Ergebnisse vor dem Hintergrund der in Abschnitt 3 aufgestellten Hypothesen diskutiert werden. Dazu werden den einzelnen Abschnitten die Hypothesen vorangestellt, anschließend anhand der Untersuchungsergebnisse diskutiert und mit Ergebnissen anderer Studien verglichen.

7.1 Zufriedenheit

Hypothese: Personen in frei belüfteten Räumen sind zufriedener mit ihrem thermischen Raumklima als Personen in mechanisch belüfteten Umgebungen.

An den Daten des Untersuchungszeitpunktes 1 zeigt sich, dass in den frei belüfteten Gebäuden 20% der Personen die Temperatur als sehr oder eher unbehaglich einstufen. In den teilklimatisierten bzw. klimatisierten Gebäuden sind es mit 34% bzw. 54% deutlich mehr (Abschnitt 5.4.1). Die Daten des Untersuchungszeitpunktes 2 bestätigen diese Werte. Dort äußerten sich in fenstergelüfteten 19%, in teilklimatisierten 32% und in klimatisierten Gebäuden 44% unbehaglich (Abschnitt 6.4). Dass die Zufriedenheit mit der Raumtemperatur in den fenstergelüfteten Gebäuden signifikant höher ist, konnte in Bild 21 gezeigt werden (Abschnitt 5.4.8).

Werden die Unzufriedenheitsraten in den Kategorien von sehr kalt bis sehr warm betrachtet, so erreichen die fenstergelüfteten Gebäude deutlich niedrigere Unzufriedenheitsraten vor allem in den Kategorien eher warm (13% Unzufriedene) und sehr warm (32% Unzufriedene) gegenüber den mechanisch belüfteten Arbeitsplätzen (eher warm: 38% Unzufriedene, sehr warm: 82% Unzufriedene). In nur einem frei belüfteten Gebäude wurde die Befragung im Sommer durchgeführt (Untersuchungszeitpunkt 1). Deshalb bestand die Frage, ob diese Unterschiede auf die Jahreszeit der Befragung zurückgeführt werden können. Der Vergleich der Unzufriedenheitsraten im frei belüfteten Gebäude 6, wo die Befragung im Sommer durchgeführt wurde, mit den Unzufriedenheitsraten in den übrigen frei belüfteten Gebäuden in Bild 25 zeigt keine andere Tendenz. Die Unzufriedenheitsraten in den Kategorien eher warm und sehr warm waren vergleichbar gering (Abschnitt 5.5).

Die operativen Temperaturen zum Untersuchungszeitpunkt 2, die zum großen Teil innerhalb der empfohlenen Bereiche lagen, erklären die vorhandenen Unterschiede in der Zufriedenheit zwischen frei und mechanisch belüfteten Gebäuden nicht (Abschnitt 6.3.2). Dieser Effekt ist auch schon in [de Dear et al. 1997] beschrieben worden.

Bezogen auf die vorliegenden Ergebnisse könnte zutreffender als in der Hypothese gesagt werden: Personen in frei belüfteten Räumen sind bei vergleichbaren thermischen Bedingungen zufriedener mit ihrem thermischen Raumklima als Personen in klimatisierten Umgebungen.

7.2 Nicht-thermische Einflussgrößen

Hypothese: Unterschiede in der thermischen Behaglichkeit von Nutzern in frei belüfteten Räumen und Nutzern in mechanisch belüfteten Räumen sind mit einer Reihe von nicht-thermischen Einflussfaktoren zu begründen (z.B. anlagentechnische und bauliche Größen, die Einflussmöglichkeit der Nutzer oder psychosoziale Größen).

7.2.1 Bauliche und anlagentechnische Größen

Bauliche und anlagentechnische Größen zeigen in der Zusammenhangsanalyse in Abschnitt 5.6 jeweils signifikante starke Zusammenhänge sowohl mit dem thermischen Empfinden als auch mit der thermischen Behaglichkeit. Allerdings weisen die anlagentechnischen Größen sehr starke Zusammenhänge mit der Anlagenart (Art der Belüftung) selbst und untereinander auf, so dass hier eine weitere Differenzierung im Rahmen der logistischen Regressionsanalyse nicht möglich ist. Nur die Art der Belüftung – frei oder mechanisch – wurde im Rahmen der logistischen Regression als Unterscheidungsmerkmal für die Modelle (Stratifizierung) verwendet. Die in Abhängigkeit von der Belüftungsart entwickelten logistischen Modelle weisen unterschiedliche Einflussfaktoren auf. Weitere Unterschiede bzgl. der Belüftungsart wurden bereits in Abschnitt 7.1 diskutiert.

Der normierte Freiheitsgrad, das heißt die empfundene Einflussmöglichkeit auf das thermische Raumklima (Abschnitt 5.4.3) weist in der Zusammenhangsanalyse einen sehr starken Zusammenhang mit den Zielgrößen auf. Die Einflüsse dieser Größe wurden innerhalb der logistischen Regression weiter untersucht.

Ein geringer normierter Freiheitsgrad erhöht in frei belüfteten Gebäuden die Chance sich kalt oder unbehaglich kalt zu fühlen (OR: 3 bis 4,5). Ein Einfluss für mechanisch belüftete Gebäude kann nicht gezeigt werden. Allerdings wurde in Abschnitt 5.4.8 bereits auf den starken Zusammenhang zwischen dem normierten Freiheitsgrad und der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur (bezogen auf vier Wochen) hingewiesen.

In den Modellen für das Sehr-Warm-Empfinden bzw. für die Unbehaglichkeit aufgrund von Wärme in mechanisch belüfteten Gebäuden ist der normierte Freiheitsgrad eine Einflussgröße. Die Wirkungsrichtung des normierten Freiheitsgrades (0 und 0,5) ändert sich aber in den Modellen und bei der Verifizierung an Daten des Untersuchungszeitpunktes 2. Eine Analyse der Daten macht die Ergebnisse zwar nachvollziehbar, bietet aber keine plausible Erklärung der Effekte. Auf den starken Zusammenhang zwischen dem normierten Freiheitsgrad und der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur wurde bereits oben verwiesen. In [Raja et al. 2001] wird auf den Zusammenhang zwischen dem Öffnen der Fenster und dem Behaglichkeitsvotum in frei belüfteten Gebäuden hingewiesen. Weitergehende Untersuchungen scheinen jedoch angebracht.

Ein hoher Verglasungsanteil erhöht die Chance sich kalt oder unbehaglich kalt zu fühlen mit einem Odds Ratio von 2 bis 3. Die Ursache könnte hier in hohen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) von Verglasungen in älteren Gebäuden liegen. Leider wurden die U-Werte der Verglasungen nicht erfasst. Der Verglasungsanteil zeigt sich in der Modellverifizierung an Daten des Untersuchungszeitpunktes 2 nicht mehr signifikant.

Ein mittlerer bis hoher modifizierter Sonneneintragskennwert erhöht in mechanisch belüfteten Gebäuden die Chance sich sehr warm oder unbehaglich warm zu fühlen mit einem Odds Ratio von 2 bis 3. Diese Größe verliert aber ihren Einfluss, wenn das Modell auf die gemessene operative Temperatur adjustiert wird. Damit übernimmt die Größe hoher bis mittlerer Sonneneintragskennwert in den Modellen ohne Messdaten anscheinend eine Ersatzfunktion für die operative Temperatur. Dies entspricht der Erwartung.

7.2.2 Psychosoziale Einflussgrößen

Für psychosoziale Größen wie Arbeitszufriedenheit, arbeitsbezogene Beanspruchung, allgemeine Beanspruchung, Arbeitssättigung und Lebenszufriedenheit konnten keine starken Zusammenhänge im Rahmen der Zusammenhangsanalyse ermittelt werden (Abschnitt 5.6). Auch für die Ausbildung wurden nur schwache Zusammenhänge erkannt. Dies steht im Gegensatz zu [Cena, de Dear 1998], die einen starken signifikanten Zusammenhang zwischen Arbeitszufriedenheit und Zufriedenheit mit der Raumtemperatur zeigten.

7.2.3 Raumklimatische Einflussgrößen bei kalt empfundener Umgebung

Die Ergebnisse der logistischen Regression in Abschnitt 5.8 und die Verifizierung in Abschnitt 6.5 ergeben eine Reihe raumklimatischer Einflussgrößen auf die Zielgrößen Kalt-Empfinden und Unbehaglichkeit aufgrund von Kalt-Empfinden. Unabhängig von der Belüftungsart nehmen folgende signifikante Größen Einfluss:

- schlechte Lichtverhältnisse
- Temperaturschwankungen

Der Einfluss schlechter Lichtverhältnisse erhöht die Chance sich kalt oder unbehaglich kalt zu fühlen mit einem Odds Ratio von 2,8 bis 3,5. Dies könnte ein Ausdruck für einen tiefer im Raum gelegenen Arbeitsplatz sein. Die Analyse der Daten zur der Lage des Arbeitsplatzes und der Einstufung der Lichtverhältnisse zeigt aber für frei belüftete Arbeitsplätze keinen Zusammenhang und für mechanisch belüftete Arbeitsplätze nur einen schwachen Zusammenhang. Die Lichtverhältnisse könnten aber auch ein Ausdruck der herrschenden Witterungsverhältnisse sein und sich damit auf die Grundstimmung auswirken. Ein möglicher Zusammenhang zwischen relativer Sonnenscheindauer und Lichtverhältnissen zeigt sich aber nicht signifikant. Eine statistisch auf der Grundlage der vorliegenden Daten nachvollziehbare Erklärung konnte nicht gefunden werden.

Der Einfluss der Temperaturschwankung ist bereits bekannt. Unter diesem Begriff wurden Aussagen zusammengefasst, die die Raumtemperatur als schwankend oder die Luftbewegung als nicht schwach einstufen (Abschnitt 5.7). Vor dem Hintergrund einer kalten Umgebung sind hier vor allem Zugserscheinungen zu sehen. Diese Effekte sind bereits be-

kannt und auch in Normenwerke aufgenommen [ISO 7730: 2003]. Allerdings beziehen sich die dort gemachten Angaben auf Personen, die sich in einem thermisch neutralen Zustand befinden. Temperaturschwankungen erhöhen die Chance sich kalt oder unbehaglich kalt zu fühlen mit einem Odds Ratio von 2 für frei belüftete Räume bis 3,5 für mechanisch belüftete Räume.

Die akustische Güte hat unabhängig von der Belüftungsart Einfluss auf das Kalt-Empfinden, allerdings nicht auf die Unbehaglichkeit aufgrund von Kalt-Empfinden.

In mechanisch belüfteten Gebäuden wurden als weitere Einflussgrößen auf die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen die Bewertung des Luftzustandes als verbraucht und trocken (OR nicht signifikant) und eine mittlere bis geringe olfaktorische Güte (OR: 3 bis 4) ermittelt. Beide Größen sind in der Modellverifizierung nicht signifikant. Aufgrund früherer Untersuchungen wird allgemein davon ausgegangen, dass hohe Geruchsbelastungen nur in warmen Umgebungen die Unbehaglichkeit erhöhen. In welchem Maße diese beiden Größen eine Bedeutung haben und was die Ursachen dieser Einschätzung durch die Befragten auf messtechnischer Ebene bedeutet, sollte weiter untersucht werden.

Auch bei Adjustierung auf die Messgrößen (operative Temperatur, Luftgeschwindigkeit usw.) bleibt die Wirkung der gefundenen raumklimatischen Einflussgrößen bei kalt empfundener Umgebung grundsätzlich erhalten.

7.2.4 Raumklimatische Einflussgrößen bei warm empfundener Umgebung

Die Ergebnisse der logistischen Regression in Abschnitt 5.8 und die Verifizierung der logistischen Modelle in Abschnitt 6.5 ergeben einige raumklimatische Einflussgrößen auf die Zielgrößen Sehr-Warm-Empfinden und Unbehaglichkeit aufgrund von Warm-Empfinden. Keine der gefundenen Einflussgrößen ist in allen vier Modellen („sehr warm“ und „unbehaglich warm“ für frei bzw. mechanisch belüftete Räume) vorhanden. Allerdings ist die Güte der Modelle für frei belüftete Räume nicht hoch.

Ein niedrige akustische Güte erhöht die Chance in mechanisch belüfteten Räumen sich sehr warm oder unbehaglich warm zu fühlen mit einem Odds Ratio von 1,7 bis 2,2. In frei

belüfteten Räumen gilt dies nur für die Chance sich unbehaglich warm (OR = 2,1) zu fühlen. In einer experimentellen Studie fanden [Clausen et al. 1993] heraus, dass ein Temperaturanstieg um 1 K den gleichen Effekt auf die allgemeine Behaglichkeit hat wie ein Lautstärkeanstieg von etwa 4 dB(A). Zur Auswirkung der Kombination dieser Effekte gibt es bisher keine Untersuchungen. [Witterseh et al. 2002] stellten keinen signifikanten Effekt von Lärm auf das thermische Empfinden und die thermische Akzeptanz bei steigender Temperatur fest.

Schlechte bis mittlere Lichtverhältnisse verringern die Chance einer Sehr-Warm-Empfindung sowohl in frei belüfteten (OR: 0,12 bis 0,31) als auch in mechanisch belüfteten (OR: 0,41 bis 0,57) Räumen. In den Modellen „unbehaglich warm“ sind die Lichtverhältnisse jedoch keine Einflussgröße.

In frei belüfteten Gebäuden ist die olfaktorische Güte als einzige übereinstimmende Größe in den Modellen „sehr warm“ und „unbehaglich warm“ enthalten. Eine schlechte olfaktorische Güte erhöht die Chance sich sehr warm zu fühlen mit einem OR = 2 und die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen mit OR = 7. Eine mittlere olfaktorische Güte wirkt nur auf die Unbehaglichkeit Chance erhöhend (OR = 2,8). In der bereits oben erwähnten Untersuchung fanden [Clausen et al. 1993], dass eine Erhöhung der Temperatur um 1 K die gleichen Auswirkungen auf die allgemeine Behaglichkeit hat wie eine Verschlechterung der empfundenen Luftqualität um 2,4 decipol.

Die Chance thermischer Unbehaglichkeit in mechanisch belüfteten Gebäuden wird durch die Einschätzung des Luftzustandes als verbraucht und trocken (OR = 2,3) und durch Blendungseffekte (OR = 1,4) erhöht. [Fang et al. 1999] zeigten, dass die Akzeptanz der eingeatmeten Luft sowohl mit steigender Luftfeuchte als auch mit steigender Temperatur sinkt. Die Akzeptanz der Luft ist dabei linear abhängig von der Enthalpie der Luft. Dies scheint dem Namen der Einflussgröße „verbrauchte und trockene Luft“ in dieser Arbeit zu widersprechen. Dazu muss aber beachtet werden, dass der Mensch die Luftfeuchte im Bereich üblicher relativer Feuchten in Bürogebäuden nicht unmittelbar wahrnehmen kann (Bild 37). Fanger gibt dazu in [Fanger 2000] einen Erklärungsansatz. Seiner Meinung nach empfinden die Menschen es als angenehm, mit jedem Atemzug eine Kühlung des Atmungstraktes zu erzielen. Dadurch werde ein Frischegefühl erzeugt, das als angenehm emp-

funden wird. Findet die angemessene Kühlung nicht statt, so kann die Luft als unakzeptabel, abgestanden oder stickig empfunden werden. Diese Aussage steht in Übereinstimmung zur Referenzgröße „frische Luft“ gegenüber „verbraucht und trocken“ in dieser Arbeit. [Witterseh et al. 2002] fanden keinen signifikanten Effekt der Temperatur auf die empfundene Feuchte, aber die Luft wurde bei höheren Temperaturen als stickiger empfunden.

Für frei belüftete Gebäude sind die Aussagen zum Warm-Empfinden bzw. zur Einschätzung als unbehaglich warm als vorläufig zu betrachten, da eine schlechte Modellgüte auf andere nicht erfasste Einflussfaktoren schließen lässt. Weitere Untersuchungen vor allem im Sommer scheinen hier erforderlich zu sein. Bei Adjustierung auf die raumklimatischen Messgrößen (operative Temperatur, Luftgeschwindigkeit usw.) bleibt die Wirkung der gefundenen Einflussgrößen bei warm empfundener Umgebung grundsätzlich erhalten.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse kann die Hypothese insofern bestätigt werden, als dass nicht-thermische Einflussfaktoren die Unterschiede im Behaglichkeitsempfinden von Nutzern in frei und mechanisch belüfteten Räumen verursachen können. Ein geschlossenes Bild der Haupt-Einflussgrößen könnte sich nach weitergehenden Untersuchungen an neu zu erhebenden Daten ergeben.

7.3 Unterschiede zwischen thermischem Empfinden und thermischer Behaglichkeit

Hypothese: Die Belüftungsart bestimmt das Spektrum der Einflussgrößen der thermischen Behaglichkeit, nicht jedoch des thermischen Empfindens.

Aus den Ergebnissen, die in Abschnitt 7.2 diskutiert wurden, lassen sich auch die Schlüsse für die Beantwortung dieser Hypothese ziehen. Für die Kalt-Empfindungsseite weisen die Modelle für thermisches Empfinden für beide Belüftungsarten große Übereinstimmungen auf. Die beiden Modelle unterscheiden sich nur durch die Variable normierter Freiheitsgrad im Modell für frei belüftete Räume. Auch die Odds Ratios der Einflussgrößen liegen in gleicher Größenordnung. Das thermische Empfinden wird in kalter Umgebung also in frei und mechanisch belüfteten Gebäuden von den gleichen Einflussfaktoren beeinflusst.

Die Modelle für die thermische Behaglichkeit in kalt empfundener Umgebung weisen dagegen in Abhängigkeit von der Belüftungsart Unterschiede auf. In mechanisch belüfteten Räumen enthält das Modell zwei weitere Einflussgrößen, von denen jedoch nur der Einfluss einer niedrigen bis mittleren olfaktorischen Güte signifikant war. Es könnte daher sein, dass es bei den Einflussgrößen für die thermische Behaglichkeit auf der Kalt-Seite wirkliche Unterschiede zwischen den beiden Belüftungsarten gibt. Dies sollte jedoch noch weitergehend untersucht werden.

Auf der Warm-Empfindungsseite weisen die Modelle für thermisches Empfinden für frei und mechanisch belüftete Gebäude nur eine übereinstimmende Größe auf: schlechte Lichtverhältnisse. Allerdings ist die Modellgüte für frei belüftete Räume auch gering. Es kann also nicht abschließend gesagt werden, ob das thermische Empfinden bei freier und mechanischer Lüftung durch die gleichen Größen beeinflusst wird. Aufgrund der Modellgüte für frei belüftete Räume kann diese Aussage leider auch nicht für die thermische Behaglichkeit gemacht werden. Einzige übereinstimmende Größe in den Modellen für freie und mechanische Lüftung ist hier die akustische Güte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Das thermische Empfinden auf der Kalt-Seite wird unabhängig von der Belüftungsart durch die gleichen Einflussfaktoren bestimmt. Auf der Sehr-Warm-Seite kann aufgrund der Daten keine Aussage getroffen werden. In der Tendenz ist das Empfinden eher unterschiedlich.
- Die thermische Behaglichkeit weist in Abhängigkeit von der Belüftungsart auf der Kalt-Seite Unterschiede hinsichtlich der Einflussgrößen auf. Auf der Warm-Seite könnten ebenfalls Unterschiede bestehen.
- Eine abschließende Beantwortung der Hypothese kann aufgrund der Daten nicht erfolgen.

Auf den Unterschied zwischen thermischem Empfinden und thermischer Behaglichkeit wird in [Oseland 1994] verwiesen. Danach hat thermischer Komfort zwei Aspekte. Den physischen Aspekt (thermisches Empfinden), der die Eigenschaften der umgebenden Umwelt betrifft; wogegen der psychologische Aspekt (thermische Behaglichkeit) die Verbindung zur Umwelt und den emotionalen Effekten herstellt.

Bei mechanischer Lüftung können auf Grundlage der Ergebnisse Unterschiede im thermischen Empfinden und der thermischen Behaglichkeit festgestellt werden. Auf der Warm-Seite gibt es neben den drei übereinstimmenden Einflussfaktoren akustische Güte, modifizierter Sonneneintragskennwert und normierter Freiheitsgrad je zwei sich unterscheidende Einflussgrößen. Die Chance eines Sehr-Warm-Empfindens wird durch schlechte Lichtverhältnisse und Temperaturschwankungen gesenkt. Da diese beiden Größen nur im Modell für thermisches Empfinden enthalten sind, kann angenommen werden, dass sie nur Effekte beschreiben, die die Temperatur direkt beeinflussen. Die Chance thermischer Unbehaglichkeit wird dagegen durch die Einschätzung des Luftzustandes als verbraucht und trocken und Blendungseffekte erhöht.

Auf der Kalt-Seite gibt es bei mechanischer Lüftung in den Modellen für das thermischen Empfinden bzw. die Behaglichkeit ebenfalls drei übereinstimmende Größen und eine bzw. zwei sich unterscheidende Einflussgrößen, von denen jedoch nur die niedrige olfaktorische Güte signifikant wurde. Weitergehende Untersuchungen sind hier erforderlich. Bei freier Lüftung scheinen die Modelle für thermisches Empfinden und Behaglichkeit auf der Kalt-Seite übereinzustimmen. Einen Unterschied zwischen thermischen Empfinden und thermischer Behaglichkeit legen auch die in Abschnitt 7.5 präsentierten Ergebnisse nahe.

7.4 Bandbreite der operativen Temperaturen

Hypothese: Nutzer in frei belüfteten Räumen akzeptieren eine größere Bandbreite der Temperaturen als Nutzer in mechanisch belüfteten Räumen.

Mit der vorliegenden Arbeit kann aufgrund des begrenzten Datenmaterials diese Hypothese nicht bestätigt werden. Die gemessenen Temperaturen an Arbeitsplätzen, an denen sich die Personen behaglich fühlten, weisen in frei und mechanisch belüfteten Gebäuden die gleiche Varianz auf (Abschnitt 6.7) und deuten so auf eine gleiche Temperaturbandbreite hin. Allerdings kann gesagt werden, dass bei vergleichbaren Temperaturbandbreiten in frei und mechanisch belüfteten Gebäuden die Nutzer in frei belüfteten Gebäuden zufriedener sind (Abschnitt 7.1).

Für den Sommer setzen sowohl die niederländische Richtlinie (Abschnitt 2.3.5) als auch die ASHRAE-Studie (Abschnitt 2.3.4) unterschiedliche Temperaturbandbreiten für frei und mechanisch belüftete Gebäude an. Im Winter gelten nach der niederländischen Richtlinie in frei belüfteten Gebäuden die gleichen Temperaturbandbreiten wie in mechanisch belüfteten Gebäuden. Die Messungen zu der vorliegenden Untersuchung wurden in den frei belüfteten Gebäuden im Winter und in der Übergangszeit durchgeführt. Für diese Jahreszeiten zeigen sich gleiche Temperaturbandbreiten in frei und mechanisch belüfteten Gebäuden. Das entspricht der niederländischen Richtlinie für den Winter.

Es kann vermutet werden, dass zukünftig durchzuführende Untersuchungen auf Basis von ganzjährig erhobenen Daten durchaus Unterschiede zeigen können. Die Hypothese sollte dabei neu formuliert werden: Nutzer in frei belüfteten Räumen akzeptieren bei sommerlichen Außentemperaturen eine größere Bandbreite der Temperaturen als Nutzer in mechanisch belüfteten Räumen.

7.5 Gültigkeit von Vorhersagemethoden

Hypothese: Der Zusammenhang von vorhergesagtem mittlerem Votum (PMV) und vorhergesagtem Prozentsatz Unzufriedener (PPD) nach Fanger gilt nicht für frei belüftete Räume.

Ausgehend von dieser Hypothese wurde nicht nur der Zusammenhang von PMV und PPD nach Fanger überprüft. Auf der Grundlage von Befragungen wurde in Abschnitt 5.5 der beobachtete und vorhergesagte Anteil Unzufriedener verglichen. Dabei wurden der Zusammenhang zwischen PMV und PPD von Fanger (siehe Abschnitt 2.2.3) und der von Mayer modifizierte Zusammenhang (siehe Abschnitt 2.3.3) von PMV und PPD als Vorhersagemethoden für den zu erwartenden Anteil Unzufriedener verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Methode nach Fanger für frei belüftete Gebäude keine gute Vorhersage des zu erwartenden Anteils Unzufriedener ergibt. Überraschend ist, dass auch für mechanisch belüftete Gebäude keine gute Vorhersage des Anteils Unzufriedener mit dem Fangerschen Ansatz möglich ist. Mit dem modifizierten Ansatz nach Mayer kann jedoch für Personen mit einem normierten Freiheitsgrad von Null eine gute Übereinstimmung von Beobachtung und Vorhersage erzielt werden. Für mechanisch belüftete Ge-

bäude zeigt daher auch der Ansatz von Mayer die beste Übereinstimmung. Keine der genannten Methoden ist für frei belüftete Gebäude geeignet.

In Abschnitt 6.6 wurden vier Ansätze zur Vorhersage der optimalen Raumtemperaturen für jede Person verglichen. Dabei wurde die optimale Raumtemperatur nach dem Fangerschen Ansatz für ein PMV von Null und nach dem Mayerschen Ansatz für ein PMV von 0,4 ermittelt. Die optimale Raumtemperatur wurde auch nach den Untersuchungen von ASHRAE (Abschnitt 2.3.4) und einer Niederländischen Richtlinie (Abschnitt 2.3.5) in Abhängigkeit von der mittleren monatlichen bzw. der laufenden mittleren Außentemperatur bestimmt. Für Personen, die angaben sich behaglich zu fühlen, erzielt für mechanisch belüftete Gebäude der Ansatz nach Mayer die beste Übereinstimmung. Für frei belüftete Gebäude ist dies der ASHRAE-Ansatz. Die Ergebnisse zeigen, dass thermische Neutralität, also ein $PMV = 0$, nicht bedeutet, dass die Person sich auch behaglich fühlt. Die gemessenen Temperaturen von Personen, die sich behaglich fühlten, zeigen eher, dass die Personen sich im Gegensatz zur optimalen Temperatur nach dem Ansatz von Fanger bei etwas höheren Temperaturen wohl fühlen.

Auch [Brager et al. 1994] schreiben, dass thermische Neutralität nicht notwendigerweise ideal für eine größere Gruppe von Menschen ist. Die Bevorzugung nicht-neutraler thermischer Zustände hängt vermutlich mit der Jahreszeit zusammen. In einer in [Brager et al. 1994] zitierten Studie von McIntyre im Winter in Großbritannien bevorzugten 16% der mit „neutral“ urteilenden Personen eine wärmere Umgebung. Untersuchungen in Kalifornien von Brager deuten eher darauf hin, dass es 10 bis 15% der Befragten lieber kühler hätten.

In [Astolfi et al. 2003] wurde aus Untersuchungen an italienischen weiterführenden Schulen ein Trend zur Akzeptanz wärmerer Umgebungen erkannt. Der Anteil der Unzufriedenen als Summe derjenigen, die es lieber wärmer bzw. lieber kälter hätten, ergibt ein Minimum von ca. 20% bei einem „Mean Vote“ von ca. 0,3 auf einer Skala von -3 bis +3.

Die Hypothese, dass der Zusammenhang von vorhergesagtem mittlerem Votum (PMV) und vorhergesagtem Prozentsatz Unzufriedener (PPD) nach Fanger nicht für frei belüftete Räume gilt, kann mit der vorliegenden Arbeit bestätigt werden.

8. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zufriedenheit von Personen mit ihrer thermischen Umgebung in frei belüfteten Gebäuden signifikant höher ist als in mechanisch belüfteten Gebäuden.

Die Untersuchung möglicher nicht-thermischer Einflussgrößen zeigt in der vorliegenden Arbeit vor allem den Einfluss der wahrgenommenen Eigenschaften anderer Raumklimagrößen. In weiteren Felduntersuchungen sollte geklärt werden, wie die Wahrnehmung von Raumklimaparametern der Personen sich in Messwerten ausdrückt. Welche physikalischen Zustände der Luft also z.B. hinter einer Bewertung des Luftzustandes als verbraucht und trocken zu finden sind. Wertvolle erste Untersuchungen sind dabei bereits in Klimakammern durchgeführt worden [Fang et al. 1998; Fanger 2000]. Experimentelle Untersuchungen in Klimakammern sollten dabei unbedingt durch Untersuchungen in realen Gebäuden ergänzt werden, da nur so der Kontext „Büroarbeit“ in einem realistischen Umfeld gegeben ist, und nur so die Praxisrelevanz von Ergebnissen aus Klimakammern bewertet werden kann.

In dieser Arbeit wird zwar die Beeinflussung des thermischen Empfindens und der thermischen Behaglichkeit durch die Wahrnehmung anderer raumklimatischer Einflussgrößen gezeigt. Jedoch sollte ergänzend untersucht werden, ob die Summe verschiedener Einflüsse die Chance von Unbehaglichkeit weiter erhöht oder sich Effekte gegenseitig aufheben. Dazu gibt es bisher kaum Untersuchungen, weder in Klimakammern noch im Feld.

Die international und nun auch in Deutschland anzuwendende Planungsmethode [DIN EN 13779: 2005 in Verbindung mit DIN EN ISO 7730: 1994] für raumlufttechnische Anlagen, der das Fangersche PMV-Modell zugrunde liegt, scheint sowohl für die Vorhersage des Raumtemperatur-Optimums nicht ideal zu sein, als auch den Anteil der zu erwartenden Unzufriedenen nicht ausreichend vorherzusagen. Auch für freie Lüftung scheint diese Methode ungeeignet zu sein. Daher sind für freie und mechanische Lüftung andere Planungsmethoden erforderlich.

Für mechanisch belüftete Gebäude hat sich das Modell nach Mayer als ein guter Ansatz gezeigt, das eine Modifi-

kation des Zusammenhangs zwischen PMV und PPD darstellt. Die Verschiebung des PMV-Optimums und damit der optimalen Temperaturen in den Warm-Bereich wird von einzelnen Untersuchungen innerhalb Europas bestätigt. Bei frei belüfteten Gebäuden liefert die Methode nach ASHRAE gute Vorhersagen für die optimale Raumtemperatur. Die Messungen und Befragungen in frei belüfteten Gebäuden zum Untersuchungszeitpunkt 2 wurden aber nicht bei hohen Außentemperaturen erhoben. Daher sollte eine weitere Überprüfung des Modells bei sommerlichen Temperaturen erfolgen. Der Ansatz des ASHRAE Modells ist einfach, ähnlich dem Ansatz der seit Mai 2005 nicht mehr gültigen DIN 1946-2 und wäre in der Praxis relativ einfach umzusetzen. Überraschend ist, dass das Niederländische Modell, das auch auf den ASHRAE Untersuchungen beruht, keine gute Vorhersage für frei belüftete Räume lieferte. Eine weitere Überprüfung scheint hier angebracht. Der ASHRAE-Ansatz sollte für Praxisanwendungen auch um zulässige Überschreitungszeiten ergänzt werden.

Messungen bei sommerlichen Außentemperaturen könnten es ermöglichen, die in der Literatur genannten Unterschiede bei den akzeptierten Temperaturbandbreiten zwischen frei belüfteten und mechanisch belüfteten Gebäuden zu überprüfen. Analysen in der vorliegenden Arbeit zeigen keine signifikanten Unterschiede während der Heizperiode. Empfehlenswert wären zu verschiedenen Jahreszeiten im Jahr wiederholte Messungen und Befragungen in den gleichen Gebäuden. Zu klären ist bei freier Lüftung zusätzlich, wie sich das Lüften über Fenster, das zum kurzfristigen Absinken der Temperatur bei Stoßlüftung oder zu einem ausgeprägten Temperaturgradienten bei Dauerlüftung führen kann, auf die thermische Behaglichkeit von Personen auswirkt.

Zukünftige Befragungen sollten neben der Frage nach dem thermischen Empfinden auf einer 7-stufigen Skala und der Frage nach der Behaglichkeit auch eine Frage zur Präferenz beinhalten. Mit der Frage „Hätten Sie es lieber wärmer, kälter oder bevorzugen Sie keine Änderung?“ kann die Ursache für thermische Unbehaglichkeit von Personen besser interpretiert werden. Da es für große Gruppen von Personen keine 100prozentige Zufriedenheit geben wird, sollte zusätzlich nach der „Akzeptanz einer thermischen Umgebung“ gefragt werden.

Für die vorliegende Arbeit bestand der Wunsch, auch den Einfluss verschiedener Ausführungsformen (z.B. Anordnung der Lufteinlässe) der Lüftungsanlagen darzustellen. Dies war jedoch wegen der starken Verknüpfung verschiedener Merkmale der Lüftungsanlagen in den untersuchten Gebäuden nicht möglich. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Der Einfluss der empfundenen Beeinflussungsmöglichkeit (normierter Freiheitsgrad) der Nutzer zeigt zwar einen sehr starken signifikanten Zusammenhang mit der Zufriedenheit der Gebäudenutzer. Dieser starke Einfluss kann aber mit den entwickelten logistischen Modellen nur bedingt abgebildet werden. In weitergehenden Studien sollte daher Wert auf eine differenzierte Befragung zu dieser Größe gelegt werden. Der in der Arbeit definierte normierte Freiheitsgrad ist bei mechanisch belüfteten Gebäuden deutlich niedriger als bei frei belüfteten Gebäuden.

Keine Aussage kann bisher dazu gemacht werden, wie sich die seit einigen Jahren häufig angewendeten thermoaktiven Bauteilsysteme auf die thermische Behaglichkeit der Nutzer auswirken, da die zur Verfügung stehenden Daten kein solches Gebäude umfassten. Gebäude mit thermoaktiven Bauteilsystemen werden auch häufig frei belüftet. Zu klären ist, ob sich solche Gebäude im Sommer wie frei belüftete Gebäude oder wie mechanisch belüftete (und konventionell gekühlte) Gebäude auf die thermische Behaglichkeit der Nutzer auswirken. Untersuchungen zur Nutzerakzeptanz sind hier erforderlich.

Ein wichtiges Ziel weiterführender Studien sollte auch die Untersuchung von Ausführungs- und Gestaltungsformen von raumluftechnischen Anlagen in Bürogebäuden und deren Wahrnehmung durch die Nutzer sein. Wie also raumluftechnische Anlagen so gestaltet werden können, dass ähnliche Zufriedenheitsraten erzielt werden können wie bei frei belüfteten Gebäuden.

Da sich fehlende Planungssicherheit bei Architekten und Investoren als ein Hindernis für die Planung von frei belüfteten Bürogebäuden erweist (Abschnitt 1.1), ist in weitergehenden Forschungsansätzen auch die Notwendigkeit von adäquaten Planungsrichtlinien oder Normen für diese Art der Belüftung zu berücksichtigen.

9. Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es, mögliche Unterschiede in der thermischen Behaglichkeit von Personen in frei und mechanisch belüfteten Gebäuden zu erkennen. Deshalb wurde untersucht, ob bisherige Methoden zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit, die für mechanische Lüftung entwickelt wurden, auch für freie Lüftung gelten. Mögliche nicht-thermische Einflussgrößen auf das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit sollten erkannt werden.

Dazu wurden Daten aus 14 Bürogebäuden in Deutschland aus dem ProKlimA-Projekt [Bischof et al. 2003] ausgewertet, die zu zwei verschiedenen Untersuchungszeitpunkten erhoben wurden. Die Daten des Untersuchungszeitpunktes 1 basieren auf Befragungen von ca. 4500 Personen. Zum Untersuchungszeitpunkt 2 wurden ca. 1500 Personen erneut befragt. Zusätzlich wurden an ihren Arbeitsplätzen u.a. raumklimatische Messgrößen erfasst.

Aus der Analyse der Literatur wurden vier bedeutende Methoden zur Bewertung und Vorhersage der thermischen Behaglichkeit ermittelt. Auf der einen Seite wird der Ansatz von Fanger sowie eine Modifizierung dieses Modells von Mayer betrachtet. Beide Modelle ermitteln die Behaglichkeit von Personen unter Einbeziehung von Bekleidungs-dämmung, Aktivitätsgrad, Raumtemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte. Auf der anderen Seite stehen zwei Ansätze – eine niederländische Richtlinie und ein Ansatz aus einer ASHRAE Studie, die für typische Büroaktivitäten anzuwenden sind. Dort wird ein optimaler Raumtemperaturbereich in Abhängigkeit von der mittleren Außentemperatur errechnet. Nach einer Analyse des Standes der Forschung wurden zusätzliche Kenndaten der untersuchten Gebäude des ProKlimA-Projektes nachträglich erhoben. Mit Hilfe verschiedener statistischer Methoden erfolgte die Auswertung der Befragungs- und Messdaten.

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass sich die Beurteilung des Raumklimas in Abhängigkeit von der Art der Belüftung unterscheidet. Personen in Gebäuden mit mechanischer Lüftung beurteilen ihr thermisches Empfinden (warm – kalt), ihre thermische Behaglichkeit (unbehagliche – behagliche Temperatur) sowie die Luftfeuchtigkeit, die Temperaturschwankung über den Tag und die Luftbewegung schlech-

ter bzw. in den extremeren Kategorien als Personen in Gebäuden mit freier Lüftung. Während in den frei belüfteten Gebäuden 20% das Raumklima als unbehaglich einstufen, sind es in den teilklimatisierten Gebäuden 34% und in den klimatisierten Gebäuden 54%. Die Befragungsergebnisse zeigen auch, dass die Nutzer frei belüfteter Gebäude signifikant zufriedener mit ihrem thermischen Raumklima sind als die Personen in mechanisch belüfteten Gebäuden.

Der Wunsch nach Einflussnahme auf das Raumklima ist unabhängig von der Anlagenart gleichermaßen stark ausgeprägt. Das Empfinden, Einfluss auf das thermische Raumklima nehmen zu können, ist jedoch stark abhängig von der Art der Belüftung. Dazu wurde ein normierter Freiheitsgrad gebildet, der angibt, wie hoch die Personen ihren Einfluss einschätzen. Der normierte Freiheitsgrad in frei belüfteten Gebäuden ist signifikant höher als in mechanisch belüfteten Gebäuden. Personen in frei belüfteten Gebäuden haben also eher das Gefühl, das Raumklima beeinflussen zu können. Der Zusammenhang zwischen der Zufriedenheit mit der Raumtemperatur und dem normierten Freiheitsgrad erweist sich als stark.

Im Rahmen der Arbeit wurde der Einfluss weiterer nicht-thermischer Größen untersucht. Dazu gehören bauliche und anlagentechnische Größen aber auch nicht-thermische Parameter des Raumklimas. Im Rahmen der Arbeit wurde der Einfluss der Beurteilung dieser Raumklimaparameter auf die Zielgrößen thermisches Empfinden und thermische Behaglichkeit untersucht. Dazu wurden statistische Modelle auf Grundlage der Befragungsdaten von Untersuchungszeitpunkt 1 entwickelt. Diese wurden an den Befragungsdaten des Untersuchungszeitpunktes 2 verifiziert.

Die Chance, dass Personen eine Umgebung als kalt oder unbehaglich kalt empfinden, wird unabhängig von der Art der Belüftung durch schlechte Lichtverhältnisse und eine als schwankend empfundene Temperatur erhöht. Der Begriff Temperaturschwankung umfasst dabei Luftbewegungen, die nicht als schwach empfunden werden, wie auch eine als schwankend empfundene Temperatur selbst. Weitere Einflussgrößen, die sich jedoch nur bei einer Belüftungsart signifikant zeigen oder in der Modellverifizierung nicht mehr signifikant sind, sind ein hoher Verglasungsanteil, ein geringer normierter Freiheitsgrad, die Bewertung des Luftzustandes als verbraucht und trocken, eine geringe olfaktorische Güte sowie eine geringe akustische Güte. Der Ein-

fluss dieser Größen sollte zukünftig noch näher untersucht werden.

Das thermische Kalt-Empfinden wird für beide Belüftungsarten durch die gleichen Größen beeinflusst. Die thermische Behaglichkeit von Personen aufgrund von kalter Umgebung weist eher auf Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Gebäuden hin.

Auf der Warm-Seite weisen die Modelle für das thermische Empfinden bzw. die thermische Behaglichkeit in Abhängigkeit von der Belüftungsart unterschiedliche Einflussgrößen auf. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass die Datenbasis für freie Lüftung keine eindeutigen Aussagen zulässt. Hier sind also noch weitere Untersuchungen erforderlich. Bei mechanischer Lüftung unterscheiden sich die Modelle für thermisches Empfinden und thermische Behaglichkeit. Zukünftige Untersuchungen sollten daher zwischen beiden Begriffen besser differenzieren.

Als Einflussgröße auf die Chance von Personen, sich sehr warm oder unbehaglich warm zu fühlen, zeigt sich eine niedrige akustische Güte. Schlechte bis mittlere Lichtverhältnisse vermindern die Chance einer Sehr-Warm-Empfindung. In frei belüfteten Gebäuden zeigt sich eine niedrige olfaktorische Güte als Risiko. Die Chance thermischer Unbehaglichkeit wird in mechanisch belüfteten Gebäuden durch die Einschätzung des Luftzustandes als verbraucht und trocken und durch Blendungseffekte erhöht.

In zukünftigen Untersuchungen sollte geklärt werden, wie die genannten Einflussgrößen, die ja die Wahrnehmung von Raumklimaparametern durch Personen wiedergeben, mit physikalischen Messwerten zusammenhängen.

Die in der Literatur erwähnte Toleranz von Personen in frei belüfteten Gebäuden gegenüber einer größeren Bandbreite der Temperatur kann auf Basis der verwendeten Daten nicht bestätigt werden. Die in dieser Arbeit gefundenen Temperaturbandbreiten für Personen, die sich behaglich fühlten, sind unabhängig von der Art der Belüftung. Allerdings beziehen sich die in der Literatur gefundenen Werte für Gebäude mit Fensterlüftung auf die heizfreie Zeit. Die Mess- und Befragungsdaten zum Untersuchungszeitpunkt 2 wurden in frei belüfteten Gebäuden jedoch in der Heizperiode erhoben. Daher sind hier weiterführende Untersuchungen in der heizfreien Zeit erforderlich.

Es wurde auch untersucht, ob der aus der Befragung ermittelte Anteil Unzufriedener mit dem PMV-PPD-Modell von Fanger vorausgesagt werden kann. Für die gesamte Stichprobe kann mit Fangers Modell keine gute Vorhersage gemacht werden. Auch nachdem die Stichprobe nach der Art der Belüftung bzw. nach dem normierten Freiheitsgrad (Möglichkeit der Einflussnahme) aufgeteilt wurde, ergibt sich keine deutlich verbesserte Vorhersagequalität.

Die Anwendung des modifizierten PMV-PPD-Modells nach Mayer zeigt jedoch für Personen ohne Einflussnahmemöglichkeit eine sehr gute Übereinstimmung der vorhergesagten und beobachteten Anteile Unzufriedener. In Gebäuden mit Klimaanlage stimmen Vorhersage und Beobachtung recht gut überein. Für freie Lüftung aber ergeben sich für diese Methode Abweichungen zwischen Beobachtung und Vorhersage.

Mit einem weiteren Untersuchungsansatz wurde geprüft, ob die in der Literaturanalyse gefundenen vier Vorhersagemethoden die Temperaturen, bei denen sich die Personen behaglich fühlten, im Mittel vorhersagen können. Der Ansatz nach Mayer erzielt für Personen in mechanisch belüfteten Gebäuden die beste Übereinstimmung. Für frei belüftete Gebäude ist dies der ASHRAE-Ansatz.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl für freie als auch für mechanische Lüftung neue, bisher in Deutschland und Europa nicht genormte Modelle zur Bewertung von Behaglichkeit in Räumen erforderlich sind. Damit könnte für mechanisch belüftete Gebäude die Planung verbessert werden. Für frei belüftete Gebäude könnte eine größere Planungssicherheit bei Architekten und Investoren erreicht werden.

10. Literatur

- [Aggerholm 1998] Aggerholm, S.: Perceived barriers to natural ventilation in offices. Proceedings 19th annual AIVC Conference, Oslo, September 1998, 398-406.
- [Andreß et al. 1997] Andreß, H.-J.; Hagenaaars, J. A.; Kühnel, S.: Analyse von Tabellen und kategorialen Daten. Log-lineare Modelle, latente Klassenanalyse, logistische Regression und GSK-Ansatz. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1997.
- [ArbStättV 2004] Verordnung über Arbeitsstätten ArbStättV, BGBl 2004, 2179.
- [ASHRAE 2004] ASHRAE Standard 55-2004: Thermal environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, ASHRAE, 2004.
- [ASR 6 2001] Arbeitsstättenrichtlinie ASR 6 – Raumtemperaturen: Zu §6 Abs. 1 und 3 der Arbeitsstättenverordnung. Ausgabe Mai 2001.
- [Astolfi et al. 2003] Astolfi, A.; Mutani, G.; Pellegrino, A.; Filippi, M.: Objective and subjective assessment of environmental global comfort in Italian high school classrooms. Proceedings, CISBAT Lausanne 2003, 165-172.
- [Backhaus et al. 2003] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. 10. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [Bauer 2003] Bauer, W.: Innovative Bürolösungen für erfolgreiche Unternehmen. Vortrag auf dem Forum: Bürodesign – Attraktive, behagliche, performante Büros. Fraunhofer Office Innovation Center Stuttgart, Sept. 2003.
- [Bischof et al. 2002] Bischof, W.; Brasche, S.; Kruppa, B.; Bullinger, M.: Do Building-Related Complaints Reflect Expectations? Proceedings Indoor Air, 2002, 461-465.
- [Bischof et al. 2003] Bischof W.; Bullinger-Naber, M.; Kruppa, B.; Schwab, R.; Müller, B.H.: Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden – Ergebnisse des ProKlimA-Projektes. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003.
- [Boerstra et al. 2003] Boerstra, A.C.; Raue, A.K.; Kurvers, S.K.; van der Linden, A.C., Hogeling, J.J.N.M.; de Dear, R.: A new dutch adaptive thermal comfort guideline. Proceedings Healthy Buildings 2003, und ergänzende Informationen des Autors 2003.
- [Brager et al. 1994] Brager, G.S.; Fountain, M.; Benton, C.C.; Arens, E.A.; Baumann, F.S.: A comparison of methods for assessing thermal sensation and acceptability in the field. Proceedings Conference at Building Research Establishment: Thermal comfort: Past, Present, Future. London 1994, 17-38.

- [CCI.Print 2004] CCI.Print: Warnung vor der Gewährleistungsfalle! Ein Jahr 26 °C-Urteil. Diagramme für die „Überzeugungsarbeit beim Bauherrn“. CCI.Print, 8, 2004, S. 18-20.
- [CEN 1998] CEN-Bericht CR 1752: Auslegungskriterien für Innenräume. Europäisches Komitee für Normung Zentralsekretariat Brüssel. 1998.
- [Cena, de Dear 1998] Cena, K., de Dear, R.: Field study of occupant comfort and office thermal environments in a hot-arid climate. Final report ASHRAE RP-921, 1998.
- [Clausen et al. 1993] Clausen, G.; Carrick, L.; Fanger, P.O.; Kim, S.W.; Poulsen, T.; Rindel, J.H.: A comparative study of discomfort caused by indoor air pollution, thermal load and noise. Indoor Air, 1993, 3, 255-262,
- [de Dear 1994] de Dear, R.: Outdoor climate influences on indoor thermal comfort requirements. Proceedings Conference at Building Research Establishment: Thermal comfort: Past, Present, Future. London 1994, 106-132.
- [de Dear et al. 1997] de Dear, R., Brager, G., Cooper, D.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference – Final report. ASHRAE RP-884, 1997.
- [de Dear, Brager 1998] de Dear, R., Brager, G.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. ASHRAE Trans. 1998, 104, 1, 145-167.
- [de Dear, Brager 2002] de Dear, R.; Brager, G.S.: Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. Energy and Buildings, 34 (2002), 6, 549-561.
- [Deutscher Wetterdienst] Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Wetterkarte, Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes, 1995 – 1998.
- [DIN 1946-2: 1994] DIN 1946-2: Raumluftechnik: Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI- Lüftungsregeln), Beuth Verlag, Berlin, 1994. Ersetzt durch [DIN EN 13779: 2005]
- [DIN 4108-2: 2003] DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Mindestanforderungen an der Wärmeschutz. Beuth-Verlag, Berlin, Jul. 2003.
- [DIN EN 13779: 2005] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden. Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlagen; Deutsche Fassung EN 13779: 2004. Beuth, Mai 2005.
- [DIN EN ISO 7730: 1995] DIN EN ISO 7730: Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. Beuth, Berlin, Sep. 1995.

- [DIN EN ISO 8996: 2005] DIN EN ISO 8996 Ergonomie der thermischen Umgebung – Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes. Beuth-Verlag, Berlin, Jan. 2005
- [DIN V 18599-4: 2005] DIN V 18599-4: Energetische Bewertung von Gebäuden. Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung. Beuth-Verlag, Berlin, Jul. 2005
- [EN ISO 10551: 2002] EN ISO 10551: Ergonomie des Umgebungsklimas – Beurteilung des Einflusses des Umgebungsklimas unter Anwendung subjektiver Bewertungsskalen (ISO 10551: 1995), Deutsche Fassung, 2001. Beuth, Berlin, Jan. 2002.
- [Energierreferat Frankfurt 2002] Energierreferat der Stadt Frankfurt am Main: Energiecontrolling in Bürogebäuden. Ein Benchmarkprozess für Betreiber von Bürogebäuden. Frankfurt (Main) 2002.
- [EnEV 2004] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV). 16. November 2001 BGBl. I 3085, geändert durch Art. 296 der Verordnung vom 25. November 2003, BGBl. I, 2304, 2341.
- [Fang et al. 1998] Fang, L.; Clausen, G.; Fanger, P.O.: Impact of temperature and humidity on perception of indoor air quality during immediate and longer whole-body exposures. *Indoor Air* 1998, 8, 276-284.
- [Fanger 1982] Fanger, P.O.: *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar Florida 1982.
- [Fanger 2000] Fanger, P.O.: Menschliche Anforderungen an zukünftig zu klimatisierende Umgebungen. *KI* 2000, 3, 114-119.
- [Fanger, Toftum 2002] Fanger, P.O.; Toftum, J.: Prediction of thermal sensation in non-air-conditioned buildings in warm climates. *Proceedings Indoor Air 2002*, 92-97.
- [Fitzner 2003] Fitzner, K.: Wandlung der Lüftungskonzepte von Büros durch verringerte thermische Lasten. *gi Gesundheitsingenieur*, 124 (2003), 5, 223-231.
- [Gebhardt 2004] Gebhardt, H.: persönliche Auskunft 2004.
- [Hartwig et al. 2003] Hartwig, H.; Hellwig, R.; Giertlová, Z.; Marghescu, A.; Ehlers, M.: *Dezentrale Fassadenlüftungstechnik. Abschlussbericht. Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e.V., Heft L199. Frankfurt (Main) 2003.*

- [Hauser 1989] Hauser, Gerd: Vergleichsmessungen de Innenklimas. Beeinflussung der Sauerstoff- und Kohlendioxid-Konzentrationen der Raumluft durch die Grüne Solar-Architektur. HLH 40 (1989), Heft 1, 7-12.
- [Hausladen et al. 2004] Hausladen, G.; Hellwig, R. T., Nowak, W.; Schramek, E.-R.; Grothmann, T.: 26 °C – falsch verstandener Arbeitsschutz? Bauphysik 24 (2004), 4, 197-204.
- [Hellwig 2004] Hellwig, R. T.: Natürlich behaglich. Natürliche Lüftung und Behaglichkeit – Gegensätze? gi 124 (2004), Heft 5, 237-244.
- [Hellwig 2005] Hellwig, R. T.: Komfortforschung. In: Voss, K. et al. (Hrsg.): Bürogebäude mit Zukunft. Konzepte – Analysen – Erfahrungen. TÜV-Verlag, Köln, 2005.
- [Hettinger 1970] Hettinger, Th.: Angewandte Ergonomie. Arbeitsphysiologische und arbeitsmedizinische Probleme in der Betriebspraxis. 1. Aufl., Bartmann Verlag, Frechen, 1970.
- [Hettinger et al. 1976] Hettinger, Th.; Kaminsky, G.; Schmale H.: Ergonomie am Arbeitsplatz. Daten zur menschengerechten Gestaltung der Arbeit. Friedrich Kiehl Verlag, Ludwigshafen, 1976.
- [Hosmer, Lemeshow 2000] Hosmer, D.W.; Lemeshow, S.: Applied Logistic Regression. 2nd ed. Wiley & Sons Inc. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2000.
- [ISO 7730: 2003] Draft ISO/DIS 7730: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort. 2003.
- [Kreienbrock, Schach, 2000] Kreienbrock, L.; Schach, S.: Epidemiologische Methoden. Spektrum, Akad. Verlag, 2000.
- [Kruppa 2004] Kruppa, B.: persönliche Auskunft, 2004.
- [Kruppa et al. 2002] Kruppa, B.; Bischof, W.; Bullinger-Naber, M.: Positive und negative Wirkungen raumluftechnischer Anlagen auf Befindlichkeit, Leistungsfähigkeit und Gesundheit. gi Gesundheitsingenieur, 123 (2002), 2, 88-95.
- [LASI 1999] Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI) (Hrsg.): Kenngrößen zur Beurteilung raumklimatischer Grundparameter. 1999.
- [Leaman, Bordass 1999] Leaman, A.; Bordass, B.: Productivity in buildings: the 'killer' variable. Building Research & Information 27 (1999), 1, 4-19.
- [Mayer 1994] Mayer, E.: Zulässige Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Turbulenzgrad und Raumtemperatur in klimatisierten Räumen. Abschlussbericht. Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e.V., 3/1/73/94. Frankfurt (Main) 1994.

- [Mayer 1998] Mayer, E.: Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig? KI Luft- und Kältetechnik 1998, 12, 575-577.
- [Mayer 2005] Mayer, E.: persönliche Auskunft, 2005.
- [Mayer, Schwab 1990] Mayer, E.; Schwab, R.: Untersuchung der physikalischen Ursachen von Zugluft. gi Gesundheitsingenieur, 111 (1990), 1, 17-30.
- [Mayer, Schwab 2004] Mayer, E.; Schwab, R.: Hybride Lüftungsverfahren für die bedarfsgerechte Lüftung von Bürogebäuden. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Projektträger Jülich, Statusbericht Energieoptimiertes Bauen, Freiburg 2004, 159-166.
- [McCartney, Humphreys 2002] McCartney, K.J.; Humphreys, M.A.: Thermal comfort and productivity. Proceedings Indoor Air 2002, 822-827.
- [McCullough et al. 1994] McCullough, E. A.; Olesen, B. W.; Hong, S.: Thermal insulation provided by chairs. ASHRAE Transactions, Vol. 100 (1994), 1, 795-802.
- [Morgan et al. 2002] Morgan, C.A.; de Dear, R.; Brager, G.: Climate, clothing and adaptation in the built environment. Proceedings Indoor Air 2002, 98-103.
- [Nachtigall, Wirtz 2002-1] Wirtz, M.; Nachtigall, Ch.: Deskriptive Statistik. Statistische Methoden für Psychologen. Teil 1. 2. erw. Aufl., Juventa, Weinheim, München, 2002.
- [Nachtigall, Wirtz 2002-2] Nachtigall, Ch.; Wirtz, M.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Inferenzstatistik. Statistische Methoden für Psychologen. Teil 2. 2. erw. Aufl., Juventa, Weinheim, München, 2002.
- [Nicol, McCartney 2000] Nicol, F.; McCartney, K.: Smart controls and thermal comfort project. Final report. Oxford Brooks University School of Architecture. 2000.
- [OLG Köln 1991] OLG Köln, Urteil vom 28.10.1991. AZ: 2U 185/90.
- [Oseland 1995] Oseland, N. A.: Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes. Energy and Buildings 23 (1995), 2, 105-115.
- [Raja et al. 2001] Raja, I.A.; Nicol, J.F.; McCartney, K.J.; Humphreys, M.A.: Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. Energy and Buildings 33 (2001), 235-244.
- [Recknagel 1944] Gehrenbeck, K.; Sprenger, E.: Recknagel's Kalender für Gesundheits- und Wärmetechnik. Oldenbourg-Verlag, 1944, 252-253.
- [Sachs 1999] Sachs, L.: Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. 9. überarb. Aufl.; Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1999.

- [Schrader et al. 1983] Schrader, G.; Bischof, W.; Horn, H.: Mentale Leistung unter variierten Raumklimabedingungen. Stadt- und Gebäude-technik, 37 (1983), 7, 212-214.
- [Spitzer et al. 1982] Spitzer, H.; Hettinger, Th.; Kaminsky, G.: Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit. 6. überarb. Aufl. Beuth, Berlin, Köln, 1982.
- [SPSS 2003] SPSS Inc.: Statistical Packages for the Social Sciences SPSS 12.0G für Windows. Version 12.0.1, Nov 2003.
- [Stoops 2001] Stoops, J. L.: The physical environment and occupant thermal perceptions in office buildings. An evaluation of sampled data from five european countries. Dissertation, Chalmers University of Technology, 2001.
- [TGL 32603/01 1980] TGL 32603/01: Arbeitshygiene. Mikroklima in Arbeitsräumen. Begriffe, Werte für optimale und zulässige mikroklimatische Bedingungen. DDR-Standard, 1980.
- [TGL O-1946-2 1963] TGL O-1946-2: Lüftungstechnische Anlagen. Lüftung von Versammlungsräumen. DDR-Standard, 1963.
- [van Hoof, Hensen 2005] van Hoof, J.; Hensen, J.: Nieuwe Nederlandse comfort-normen nader bekeken. TVVL Magazine 2005, 1, 6-13.
- [Wildeboer, Fitzner 2002] Wildeboer, J.; Fitzner, K.: Einfluss verschiedener Fensterhöhen auf die Behaglichkeit. HLH, Bd. 53 (2002), 7, 45-46.
- [Wilson, Hedge 1987] Wilson, S.; Hedge, A.: The Office Survey. London, Buildings Use Studies. 1987 zitiert in [Leaman, Bordass 1999].
- [Witterseh et al. 2002] Witterseh, T.; Wyon, D.P.; Clausen, G.: The effects of moderate heat stress and open-plan office noise distraction on office work. Proceedings Indoor Air 2002, 1084-1089.
- [Witthauer et al. 1993] Witthauer, J.; Horn, H.; Bischof, W.: Raumluftqualität. Belastung, Bewertung, Beeinflussung. C.F. Müller, Karlsruhe, 1993.
- [Wouters et al. 1999] Wouters, P.; Heijmans, N.; Delmotte, C.; Vandaele, L.: Classification of hybrid ventilation concepts. IEA Annex 35 Hybrid ventilation in new and retrofitted office buildings. HybVent Forum '99, Sydney, 1999.
- [Wyon 1986] Wyon, D.P.: The effects of indoor climate on productivity and performance. VVS & energi; Organ för VVS-Tekniska Föreningen, 3, (1986), 59-65.
- [Wyon et al. 1981] Wyon, D.P.; Andersen, I.; Lundquist, G.R.: The effects of moderate heat stress on mental performance. Chapter 16 in: Cena, K.; Clark, J. A. (Ed.) Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, 1981.

- [Zeidler 2001] Zeidler, O.: Grenzen der thermischen Last bei Fensterlüftung in Bürogebäuden. KI Luft- und Kältetechnik, 2001, 7, 314-320.
- [Zeidler et al. 2004] Zeidler, O.; Finke, U.; Fitzner, K.: Fensterlüftung in Bürogebäuden. DBZ, 2004, 10, 72-76.

Anhang

Anhang 1	Fragebogenmodul Raumklima
Anhang 2	Stichprobenbeschreibung Untersuchungszeitpunkt 1
Anhang 3	Raumklimabeurteilung Untersuchungszeitpunkt 1
Anhang 4	Zusammenhangsanalyse
Anhang 5	Faktorenanalyse
Anhang 6	Logistische Regressionsmodelle, bivariat, Untersuchungszeitpunkt 1
Anhang 7	Logistische Regressionsmodelle, multivariat, Untersuchungszeitpunkt 1, Likelihood-Quotienten-Test
Anhang 8	Logistische Regressionsmodelle für die Zielgrößen, multivariat, Untersuchungszeitpunkt 1
Anhang 9	Stichprobenbeschreibung Untersuchungszeitpunkt 2
Anhang 10	Messwerte Untersuchungszeitpunkt 2
Anhang 11	Logistische Regressionsmodelle, multivariat, Untersuchungszeitpunkt 2, Modellverifizierung
Anhang 12	Logistische Regressionsmodelle, multivariat, Untersuchungszeitpunkt 2, Adjustierung auf Messwerte
Anhang 13	Beobachtete und vorhergesagte Raumtemperaturen
Anhang 14	Überprüfung der Temperaturbandbreite

Anhang 1 Fragebogenmodul Raumklima

Zum Untersuchungszeitpunkt 1 wurden alle Fragen gestellt. Zum Untersuchungszeitpunkt 2 entfielen die in grau gezeigten Fragen.

Raumklima										
I. Wie beurteilen Sie gerade jetzt das Raumklima an Ihrem Arbeitsplatz?										
	sehr	eher	weder noch	eher	sehr					
	1	2	3	4	5					
1. gut ausgeleuchtet	<input type="radio"/>	schlecht ausgeleuchtet								
2. warm	<input type="radio"/>	kalt								
3. unangenehme Gerüche	<input type="radio"/>	angenehme Gerüche								
4. laut	<input type="radio"/>	leise								
5. trockene Luft	<input type="radio"/>	feuchte Luft								
6. viele störende Geräusche	<input type="radio"/>	wenig störende Geräusche								
7. hell	<input type="radio"/>	dunkel								
8. unbehagliche Temperatur	<input type="radio"/>	behagliche Temperatur								
9. frische Luft	<input type="radio"/>	verbrauchte Luft								
10. blendendes Licht	<input type="radio"/>	arbeitsgerechtes Licht								
11. wohlriechend	<input type="radio"/>	übelriechend								
12. schwankende Temperatur	<input type="radio"/>	gleichförmige Temperatur								
13. starke Luftbewegung (Zugluft)	<input type="radio"/>	schwache Luftbewegung (stickig)								
14. hohe Geruchsbelastung	<input type="radio"/>	geringe Geruchsbelastung								
15. geringe Schalldämpfung	<input type="radio"/>	hohe Schalldämpfung								
16. insgesamt ... schlecht	<input type="radio"/>	insgesamt ... gut								
						Ja 1				
						Nein 2				
17. Können Sie auf die Raumtemperatur Einfluss nehmen?	<input type="radio"/>									
18. Können Sie auf die Luftbewegung (z.B. Zugluft) Einfluss nehmen?	<input type="radio"/>									
19. Können Sie auf die Lichtverhältnisse Einfluß nehmen?	<input type="radio"/>									
20. Wünschen Sie selbst direkten Einfluß auf das	<input type="radio"/>									
21. Halten Sie das Raumklima für verbesserungswürdig?	<input type="radio"/>									
22. Wenn ja, inwiefern?	<input type="radio"/>									
23. Halten Sie das Raumklima für gesundheitsabträglich?	<input type="radio"/>									
24. Ändert sich das Raumklima im Laufe des Tages?	<input type="radio"/>									
25. Wenn ja, inwiefern?	<input type="radio"/>									
II. Bitte kreuzen Sie für jeden Punkt an wie wichtig er für Ihr Wohlbefinden ist und wie zufrieden Sie derzeit damit sind. Denken Sie an die letzten vier Wochen.										
	nicht wichtig	etwas wichtig	ziemliche wichtig	sehr wichtig	extrem wichtig	unzufrieden	eher unzufrieden	eher zufrieden	ziemlich zufrieden	sehr zufrieden
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1. Beleuchtungsverhältnisse	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
2. Luftfeuchtigkeit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
3. Be- und Entlüftung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
4. Raumtemperatur	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
5. Geräuschpegel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
6. Luftbewegung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
7. Geruchsbelastung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
8. Wenn vorhanden: Klimaanlage	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					

Anhang 2 Stichprobenbeschreibung Untersuchungszeitpunkt 1

Anteil von Frauen und Männern, Anteil der Altersgruppen und Anteil Befindlichkeitsgestörter je Gebäude. Die frei belüfteten Gebäude sind grau hinterlegt.

Gebäude	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
n gesamt	207	201	229	240	259	254	867	576	157	231	387	242	317	346	
Frauen [%]	67	80	37	60	26	26	67	51	57	43	74	79	57	37	
Männer [%]	33	20	63	40	74	74	33	49	43	57	26	21	43	63	
Alter [%]	< 31	30	29	14	15	14	13	41	27	28	29	20	9	40	20
	31 - 40	35	30	37	32	35	36	17	32	32	29	39	37	37	40
	41 - 50	17	22	25	25	35	34	21	27	26	25	29	40	13	32
	> 51	18	19	24	27	16	16	21	14	15	18	13	14	10	8
Befindlichkeitsgestörte (SBS) [%]	47	55	43	29	22	22	55	33	27	32	28	21	40	34	

Soziodemografische Größen und Größen zur Beschreibung der Arbeitssituation nach Anlagenart

Anlagenart	Fensterlüftung		Teilklimaanlage		Klimaanlage		Gesamt		
	n	%	n	%	n	%	n	%	
Frauen	1048	57	415	43	1028	61	2491	56	
Männer	781	43	552	57	662	39	1995	44	
Alter	< 31	367	20	246	25	549	33	1162	26
	31 - 40	625	34	363	38	424	25	1412	31
	41 - 50	549	30	245	25	361	21	1155	26
	> 51	290	16	113	12	351	21	754	17
befindlichkeitsgestört*	504	28	323	32	810	49	1637	37	
nicht befindlichkeitsgestört*	1311	72	672	68	835	51	2818	63	
Schulabschluss	Hauptschule	202	11	154	16	420	25	776	17
	Realschule	783	43	350	37	691	41	1824	41
	Gymnasium	825	46	453	47	563	34	1841	41
Berufsabschluss	kein Abschluss	22	1	41	4	83	5	146	3
	Lehre	740	41	387	41	901	56	2028	47
	Meister	388	22	187	20	172	11	747	17
	Hochschule	649	36	324	35	466	29	1439	33
Arbeitszufriedenheit	unzufrieden	378	21	199	22	456	28	1033	24
	zufrieden	1393	79	724	78	1156	72	3273	76
Lebenszufriedenheit	unzufrieden	365	21	184	20	389	24	938	22
	zufrieden	1409	79	724	80	1202	76	3335	78
arbeitsbezogene Beanspruchung	niedrig	1550	85	822	86	1464	87	3836	86
	hoch	270	15	129	14	210	13	609	14
allgemeine Beanspruchung	niedrig	1425	79	772	82	1282	77	3479	79
	hoch	386	21	175	18	380	23	941	21
Arbeitsauslastung	niedrig	1398	78	740	78	1168	71	3306	75
	hoch	405	22	207	22	487	29	1099	25

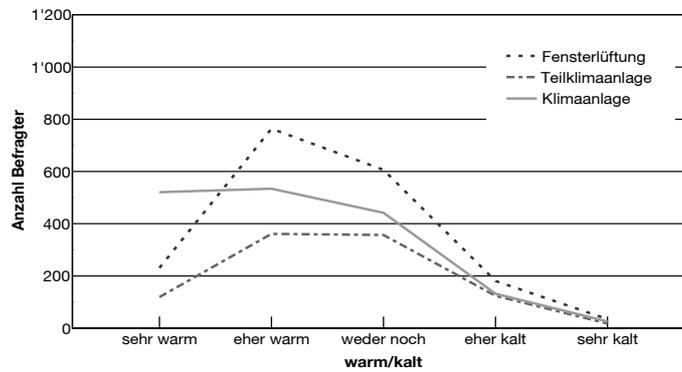
* befindlichkeitsgestört: Personen mit Symptomen des Sick-Building-Syndromes (SBS)

Mittelwerte und Standardabweichung von Größen zur Beschreibung der Arbeitssituation Angaben in Abhängigkeit von der Anlagenart

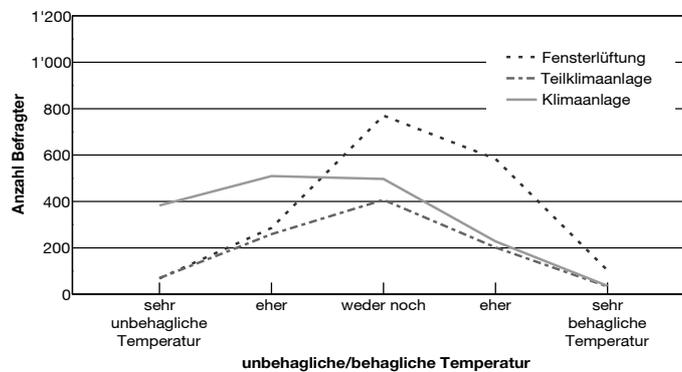
Variable	Fensterlüftung		Teilklimaanlage		Klimaanlage		Gesamt	
	MW (SD)	n	MW (SD)	n	MW (SD)	n	MW (SD)	n
Arbeitszufriedenheit (min=1, max=5)	3,37 (0,53)	1771	3,41 (0,56)	923	3,30 (0,60)	1612	3,36 (0,57)	4306
Lebenszufriedenheit	3,60 (0,53)	1774	3,62 (0,53)	908	3,56 (0,58)	1591	3,59 (0,55)	4273
arbeitsbezogene Beanspruchung	2,43 (0,44)	1820	2,37 (0,45)	951	2,38 (0,47)	1674	2,40 (0,45)	4445
allgemeine Beanspruchung	2,05 (0,47)	1811	1,99 (0,49)	947	2,05 (0,52)	1662	2,04 (0,49)	4420
Arbeitsauslastung	1,20 (0,26)	1803	1,19 (0,25)	947	1,25 (0,27)	1655	1,22 (0,26)	4405

Anhang 3 Raumklimabeurteilung Untersuchungszeitpunkt 1

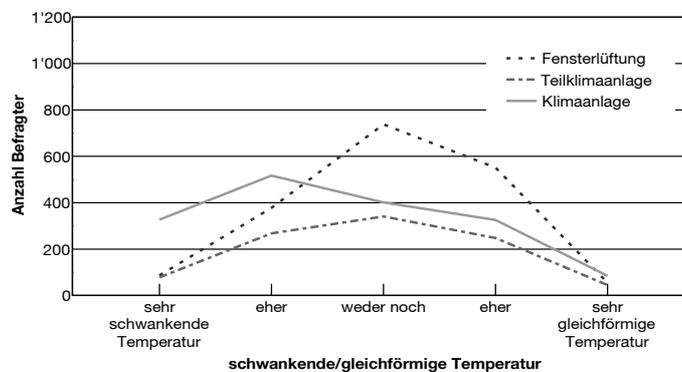
Thermisches Empfinden
(warm - kalt)
n = 4451



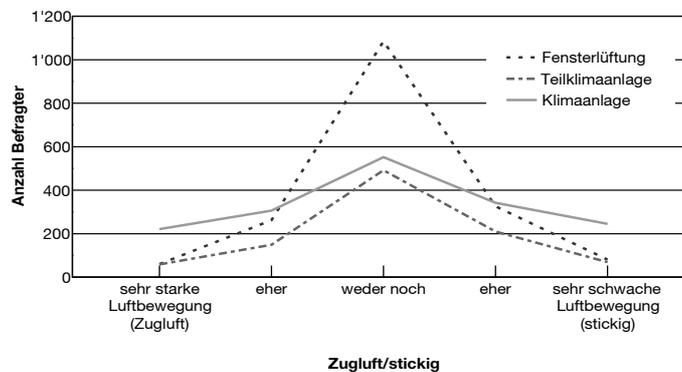
Thermische Behaglichkeit
(unbehaglich - behaglich)
n = 4435



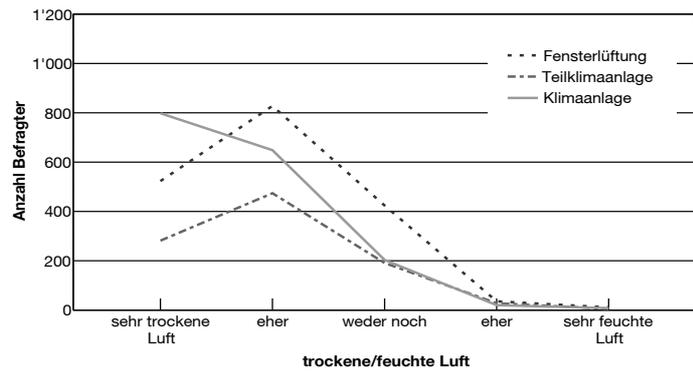
Schwankende - gleichförmige
Temperatur
n = 4445



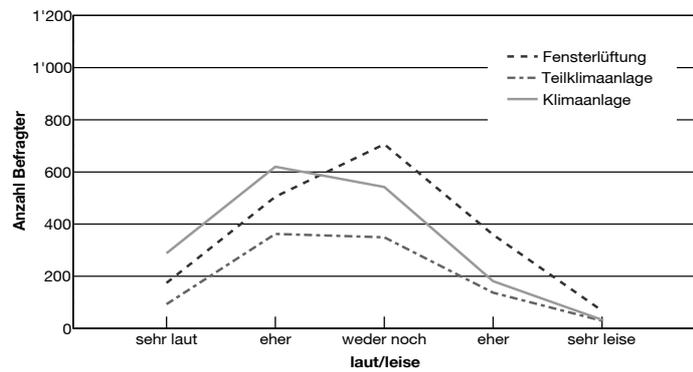
Starke Luftbewegung (Zugluft) -
schwache Luftbewegung
(stickig)
n = 4459



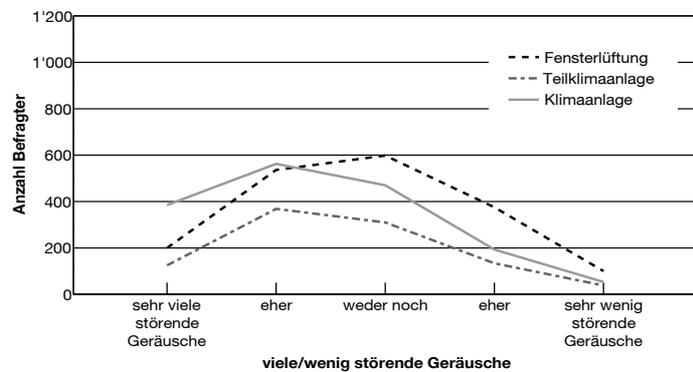
Trockene - feuchte Luft
n = 4480



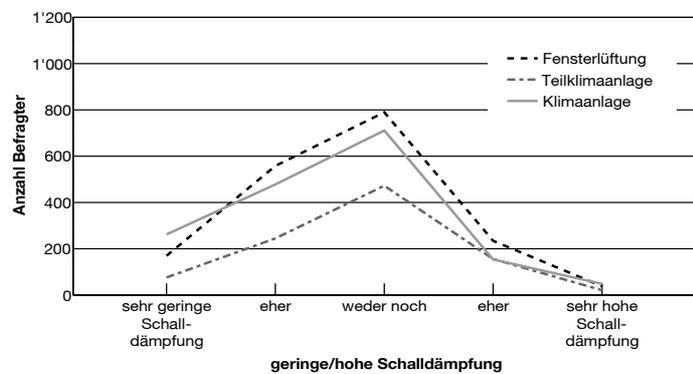
Laut - leise
n = 4446



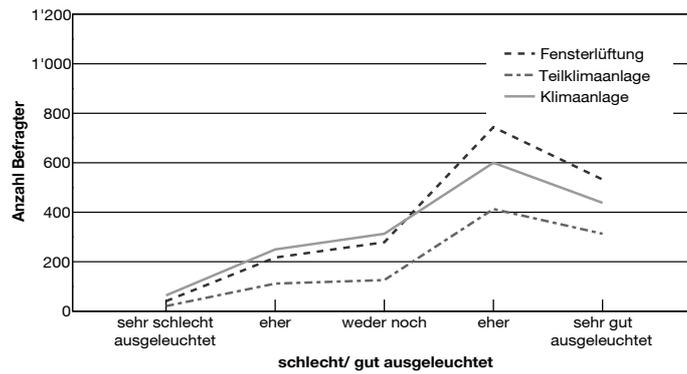
Viele - wenige störende
Geräusche
n = 4447



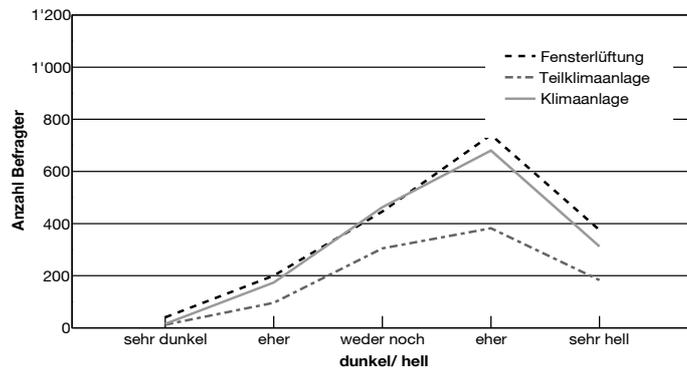
Geringe - hohe Schalldämpfung
n = 4416



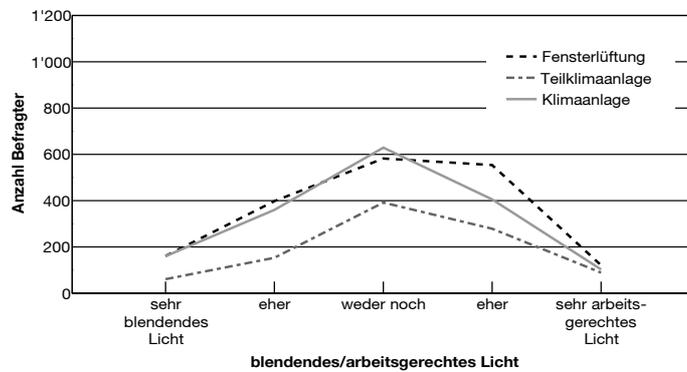
Schlecht – gut ausgeleuchtet
n = 4463



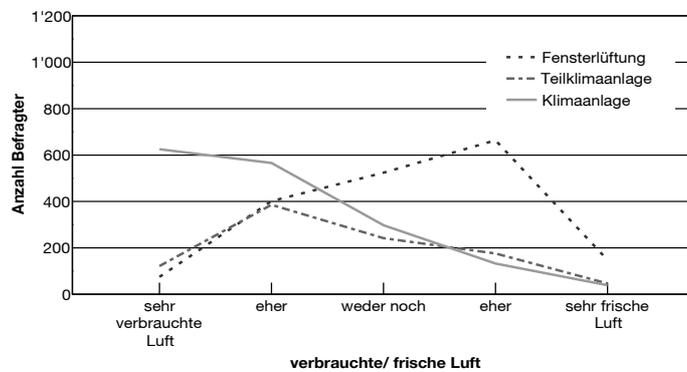
Dunkel - hell
n = 4423



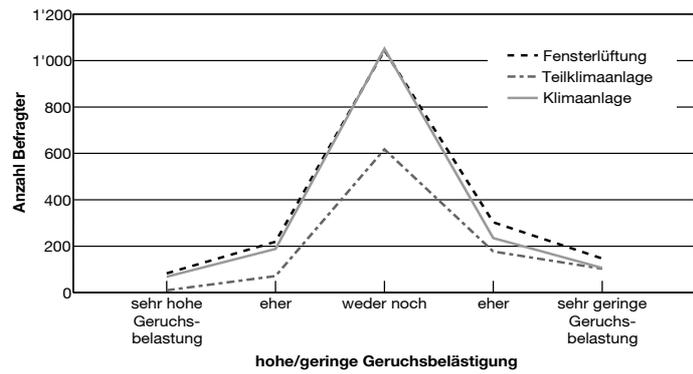
Blendendes – arbeitsgerechtes
Licht
n = 4448



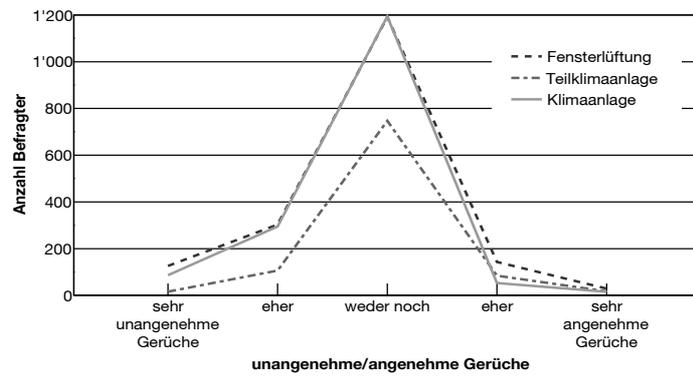
Verbrauchte - frische Luft
n = 4447



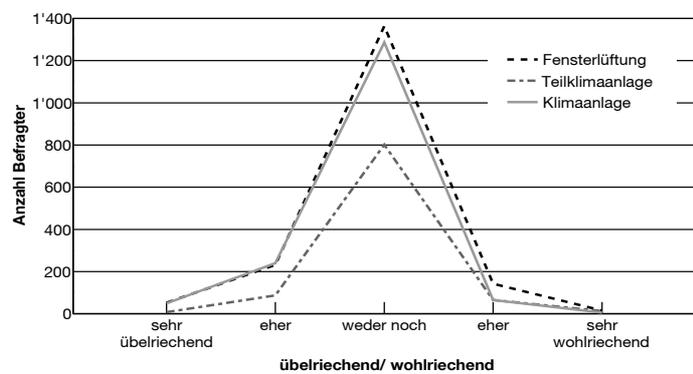
Hohe - geringe
Geruchsbelastung
n = 4423



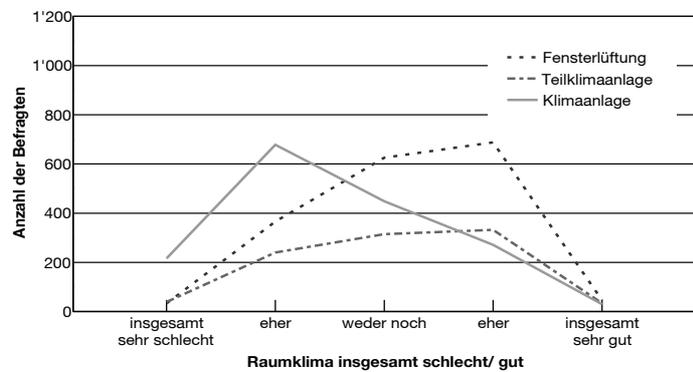
Unangenehme - angenehme
Gerüche
n = 4406



Übelriechend - wohlriechend
n = 4426



Raumklima insgesamt
schlecht – gut
n = 4361

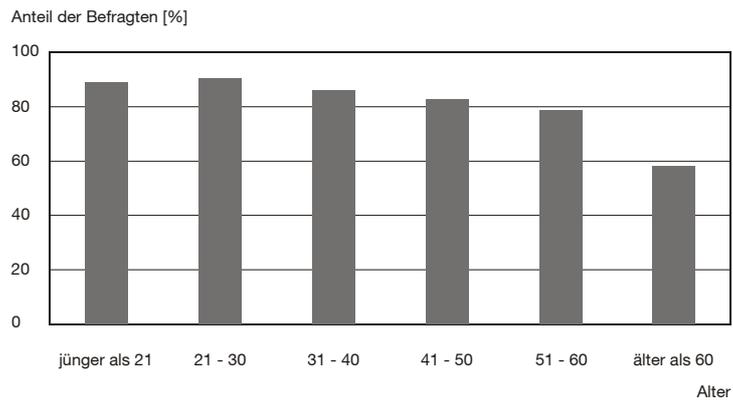


Wunsch nach Einfluss –
altersabhängig

n = 4360

$\chi^2 = 62,3; p < 0,0001$

$CC_{\text{korr}} = 0,17$

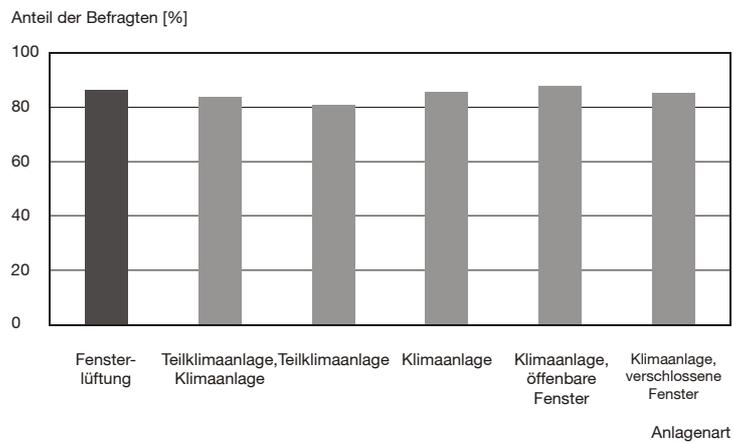


Wunsch nach Einfluss –
Anlagenart, Öffenbarkeit der
Fenster

n = 4394

$\chi^2 = 16,5; p < 0,001$

$CC_{\text{korr}} = 0,09$



Anteil der Personen, die angaben Einfluss nehmen zu können in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht

Einfluss möglich auf	Geschlecht			Alter				
	gesamt n	männlich	weiblich	gesamt n	<31	31-40	41-50	>50
Raumtemperatur	4463	62 %	53 %	4459	45 %	60 %	65 %	59 %
Luftbewegung	4455	54 %	50 %	4451	46 %	56 %	56 %	45 %
Lichtverhältnisse	4430	76 %	62 %	4427	63 %	72 %	72 %	66 %

Anteil derjenigen, die angaben Einfluss auf die Raumtemperatur und Luftbewegung zu haben sowie normierter Freiheitsgrad je Gebäude. Grau hinterlegt sind die frei belüfteten Gebäude.

Gebäude		2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Einfluss auf Raumtemperatur möglich	n gesamt	206	202	233	237	257	251	862	576	159	231	383	245	331	348
	%	14	54	50	85	90	85	16	79	98	81	93	85	24	29
Einfluss auf Luftbewegung möglich	n gesamt	206	203	233	238	259	252	862	575	159	231	385	235	331	344
	%	13	41	14	83	89	70	7	89	93	12	81	86	44	49
normierter Freiheitsgrad	n gesamt	206	202	233	236	257	250	860	573	159	230	382	235	327	342
	Mittelwert	0.13	0.47	0.32	0.85	0.89	0.77	0.11	0.84	0.95	0.46	0.87	0.86	0.33	0.39
	SD	0.32	0.44	0.34	0.30	0.26	0.33	0.26	0.28	0.16	0.26	0.26	0.26	0.38	0.41

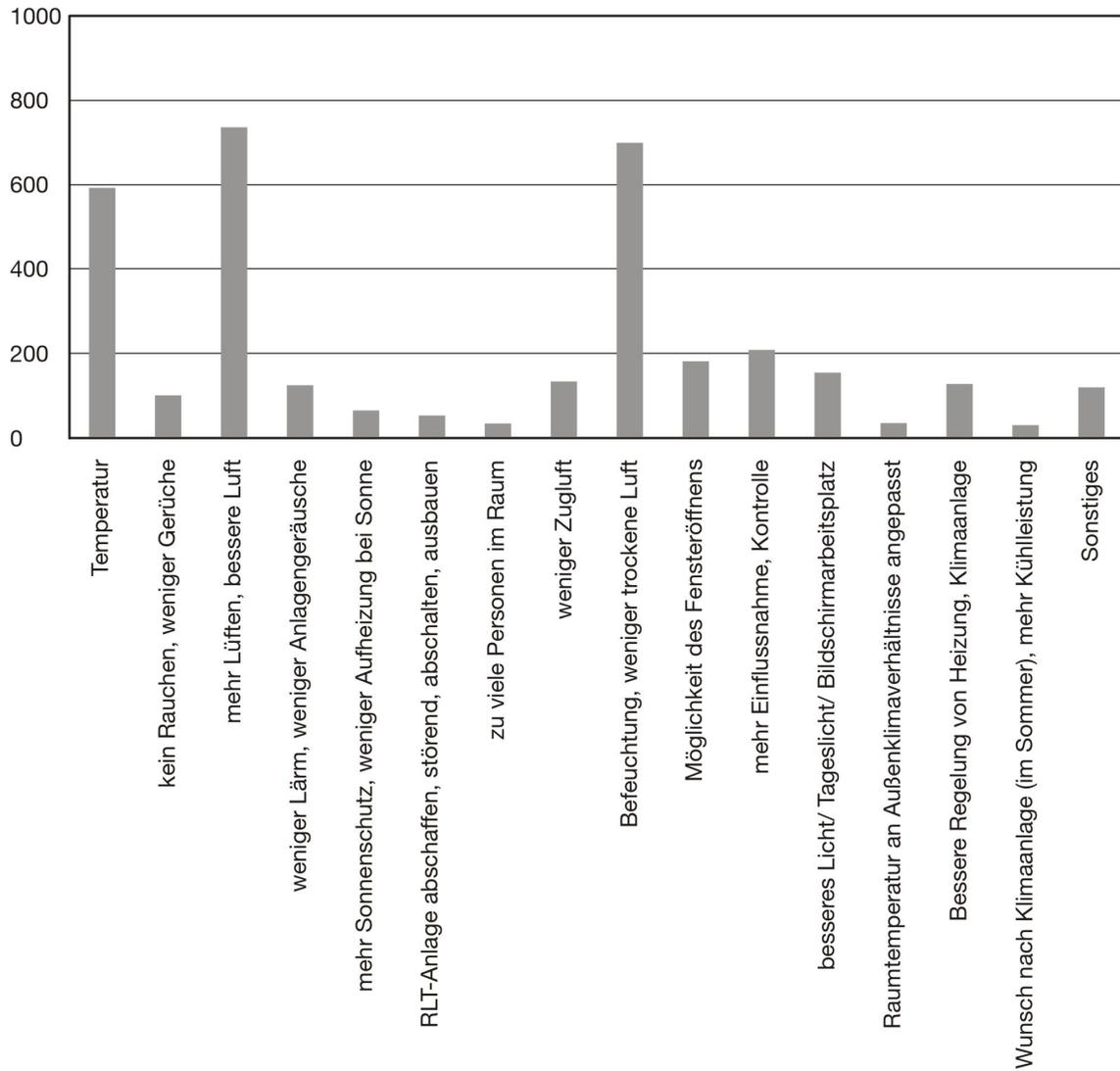
Rangtest nach Wilcoxon für unabhängige Stichproben: Die Mittelwerte des normierten Freiheitsgrades in jedem Gebäude sind bei fenstergelüfteten Gebäuden signifikant höher. Die Personen können mehr Einfluss nehmen. Einseitiger Test $\alpha=0.025$ (Prüfgröße 24 > 16 kritischer Wert)

Anteil der Personen, die auf die Raumtemperatur Einfluss nehmen können für mechanisch belüftete Gebäude

Anlagentypisierung		normierter Freiheitsgrad		
		n	Mittelwert	SD
Heiztyp	Warmwasser	846	0,51	0,43
	Luftheizung	1799	0,23	0,33
Luftführung im Raum	Decke-Decke	715	0,21	0,37
	Boden-Decke (Gebäude 8)	287	0,71	0,38
	Brüstung (Induktion)	1091	0,25	0,35
	unten-Decke	552	0,39	0,34

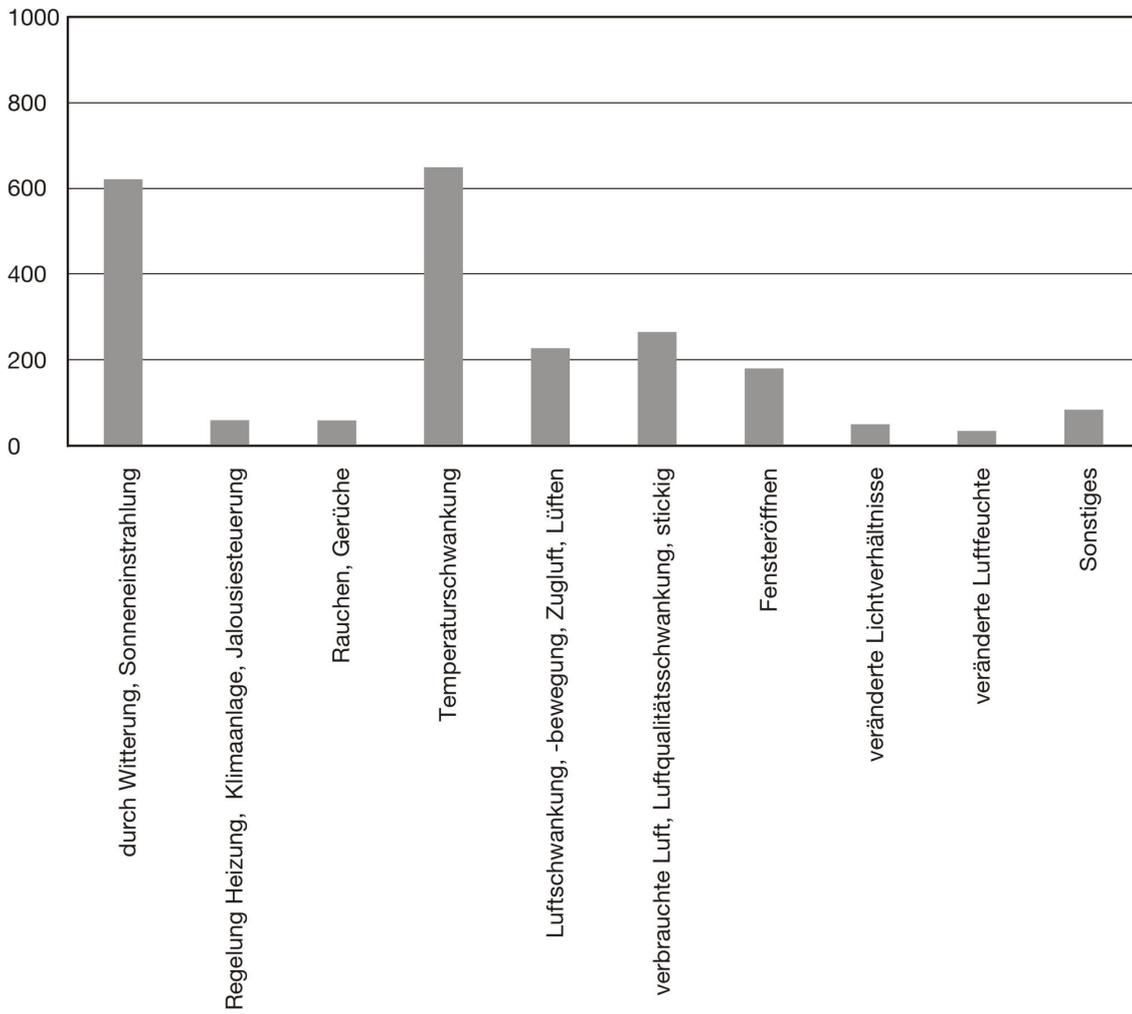
Häufigkeiten von Verbesserungsvorschlägen für das Raumklima

Anzahl der Befragten Inwiefern ist das Raumklima verbesserungswürdig?



Häufigkeiten von Antworten zur Raumklimaänderung

Anzahl der Befragten Inwiefern ändert sich das Raumklima während des Tages?



Anteil derer, die einen Raumklimaparameter als extrem wichtig einstufen in Abhängigkeit von Geschlecht und Anlagenart.

Raumklimaparameter	Frauen		Männer		frei belüftet		mechanisch belüftet	
	n ges.	%	n ges.	%	n gesamt	%	n gesamt	%
Beleuchtungsverhältnisse	2474	18	1988	12	1829	16	2691	15
Luftfeuchtigkeit	2468	16	1982	9	1819	8	2687	16
Be- und Entlüftung	2475	28	1982	16	1931	18	2683	27
Raumtemperatur	2476	21	1981	11	1831	12	2683	19
Geräuschpegel	2456	18	1979	17	1824	17	2667	17
Luftbewegung	2446	10	1975	5	1810	5	2666	10
Geruchsbelastung	2433	14	1979	10	1809	13	2659	12

Anteil derer, die mit einem Raumklimaparameter unzufrieden sind in Abhängigkeit vom Geschlecht und Anlagenart.

Raumklimaparameter	Frauen		Männer		frei belüftet		mechanisch belüftet	
	n ges.	%	n ges.	%	n gesamt	%	n gesamt	%
Beleuchtungsverhältnisse	2399	30	1948	22	1785	25	2610	27
Luftfeuchtigkeit	2388	64	1945	51	1774	46	2607	66
Be- und Entlüftung	2388	50	1947	43	1780	24	2602	62
Raumtemperatur	2403	44	1951	34	1786	23	2614	50
Geräuschpegel	2386	39	1948	42	1781	35	2598	44
Luftbewegung	2384	41	1945	31	1772	20	2603	46
Geruchsbelastung	2372	22	1935	16	1770	22	2581	18

Anteil der mit der Raumtemperatur und Be- und Entlüftung Zufriedenen je Gebäude

Gebäude		2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Raumtemperatur	n gesamt	206	202	233	237	257	251	862	576	159	231	383	245	331	348
	% zufrieden	14	54	50	85	90	85	16	79	98	81	93	85	24	29
Be- und Entlüftung	n gesamt	194	196	216	226	255	250	835	571	154	223	369	236	320	337
	% zufrieden	25	45	21	67	78	68	23	74	77	44	78	82	43	54

Rangtest nach Wilcoxon für unabhängige Stichproben: Der Anteil der Zufriedenen mit der Raumtemperatur in jedem Gebäude ist bei fenstergelüfteten Gebäuden signifikant höher. Einseitiger Test $\alpha=0.025$ (Prüfgröße 22 > 16 kritischer Wert)

Anteil der Zufriedenen für mechanisch belüftete Gebäude

Anlagentypisierung		Zufriedene	
		n	%
Heiztyp	Warmwasser	834	60
	Luftheizung	1746	45
Fensterart	verschlossen	1444	40
	öffnbar	1170	62

Anhang 4 Zusammenhangsanalyse

Zusammenhang zwischen verschiedenen Variablen und den Zielgrößen thermisches Empfinden (warm/kalt) und thermische Behaglichkeit (unbehagliche/behagliche Raumtemperatur)

Variable	korrigierte Kontingenzkoeffizienten	
	warm - kalt	unbehagliche - behagliche Raumtemperatur
Raumklima		
schlecht - gut ausgeleuchtet	0,31	0,29
warm - kalt	1,00	<u>0,61</u>
unangenehme - angenehme Gerüche	0,14	0,26
laut -leise	0,19	0,37
trockene - feuchte Luft	0,28	0,36
viele - wenig störende Geräusche	0,20	<u>0,41</u>
dunkel - hell	0,31	0,26
unbehagliche - behagliche Temperatur	<u>0,61</u>	1,00
verbrauchte - frische Luft	0,32	<u>0,52</u>
blendendes - arbeitsgerechtes Licht	0,17	<u>0,43</u>
übelriechend - wohlriechend	0,13	0,29
schwankende - gleichförmige Temperatur	0,31	<u>0,59</u>
starke Luftbewegung (Zugluft) - schwache Luftbewegung (stickig)	0,34	<u>0,41</u>
hohe - geringe Geruchsbelastung	nicht signifikant	0,37
geringe - hohe Schalldämpfung	0,15	0,33
Können Sie auf die Raumtemperatur Einfluss nehmen?	0,33	<u>0,55</u>
Können Sie auf die Luftbewegung (Zugluft) Einfluss nehmen?	0,24	<u>0,46</u>
normierter Freiheitsgrad (als Ersatz für die stark zusammenhängenden Variablen Einfluss auf die Raumtemperatur und Einfluss auf die Luftbewegung)	0,31	<u>0,49</u>
Wünschen Sie selbst direkten Einfluss auf das Raumklima?	nicht signifikant	0,15
Halten Sie das Raumklima für verbesserungswürdig?	0,23	<u>0,47</u>
Halten Sie das Raumklima für gesundheitsabträglich?	0,31	<u>0,53</u>
Ändert sich das Raumklima im Lauf des Tages?	0,07	0,17
Beschwerden		
Starkes Schwitzen	0,31	0,36
Überempfindlichkeit gegen Wärme	0,32	0,37
Überempfindlichkeit gegen Kälte	0,32	0,22
Person		
Geschlecht	0,18	0,16
Alter	0,16	0,16
Berufsausbildung	0,14	0,19
Schulabschluss	0,13	0,18
SBS-Fall (ja - nein)	0,17	0,34
Arbeitszufriedenheit	0,08	0,23
arbeitsbezogene Beanspruchung	0,09	0,11
allgemeine Beanspruchung	0,11	0,17
Lebenszufriedenheit	nicht signifikant	0,13
Arbeitssättigung	0,12	0,19
Raucher in Umgebung	nicht signifikant	0,12
Arbeitsplatz in Fensternähe	0,14	0,25
Ausreichend Tageslicht am Arbeitsplatz	0,18	0,21

Fortsetzung Tabelle Zusammenhang zwischen verschiedenen Variablen und den Zielgrößen thermischen Empfinden und thermische Behaglichkeit.

Variable	korrigierte Kontingenzkoeffizienten	
	warm - kalt	unbehagliche - behagliche Raumtemperatur
Witterungsverhältnisse		
Tagesmitteltemperatur	0,39	<u>0,45</u>
Laufende Außentemperatur	0,39	<u>0,45</u>
relative Sonnenscheindauer	0,16	<u>0,26</u>
Jahreszeit (Winter, Übergang, Sommer)	0,32	<u>0,40</u>
Gebäude		
Öffnungsmöglichkeit der Fenster (verschlossen - offenbar)	0,31	<u>0,44</u>
Bauweise	0,17	0,33
Verglasungsanteil (mittlerer)	0,36	<u>0,44</u>
Sonneneintragskennwert	0,29	0,33
Anlagentechnik		
Anlagenart (Fenster, Teilklima-, Klimaanlage)	0,28	0,42
Heiztyp	0,19	0,35
Luftführung im Raum	0,22	0,37
Lüftungsprinzip	0,20	0,34
Kühltyp	0,22	0,39
Befeuchtung	0,22	0,36
<p>Dargestellt sind ausschließlich mit Chi² auf dem Niveau 0,05 signifikant getestete Werte. Ckorr < 0,2: schwacher Zusammenhang 0,2 ≤ Ckorr < 0,4: mittel starker Zusammenhang Ckorr ≥ 0,4: sehr starker Zusammenhang</p>		

Zusammenhänge zwischen den einzelnen Raumklimaparametern

korrigierte Kontingenzkoeffizienten	gut - schlecht ausgeleuchtet	warm - kalt	unangenehme - angenehme Gerüche	laut - leise	trockene - feuchte Luft	viele - wenig störende Geräusche	dunkel - hell	unbehagliche - behagliche Temperatur	verbrauchte - frische Luft	blendendes - arbeitsgerechtes Licht	übelriechend - wohlriechend	schwankende - gleichförmige Temperatur	starke - schwache Luftbewegung	hohe - geringe Geruchsbelastung	geringe - hohe Schalldämpfung
schlecht - gut ausgeleuchtet	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
warm - kalt	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
unangenehme - angenehme Gerüche	0,17	0,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
laut - leise	0,18	0,19	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
trockene - feuchte Luft	0,17	0,28	0,24	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
viele - wenig störende Geräusche	0,23	0,20	0,33	0,83	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
dunkel - hell	0,69	0,31	0,15	0,19	0,19	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
unbehagliche - behagliche Temperatur	0,29	0,61	0,26	0,37	0,36	0,41	0,26	-	-	-	-	-	-	-	-
verbrauchte - frische Luft	0,30	0,32	0,25	0,31	0,42	0,33	0,27	0,52	-	-	-	-	-	-	-
blendendes - arbeitsgerechtes Licht	0,47	0,17	0,20	0,29	0,22	0,32	0,37	0,43	0,25	-	-	-	-	-	-
übelriechend - wohlriechend	0,24	0,13	0,73	0,32	0,20	0,26	0,19	0,29	0,41	0,28	-	-	-	-	-
schwankende - gleichförmige Temperatur	0,23	0,31	0,18	0,30	0,28	0,30	0,22	0,59	0,35	0,42	0,21	-	-	-	-
starke - schwache Luftbewegung	0,19	0,34	0,20	0,29	0,35	0,30	0,16	0,41	0,51	0,24	0,25	0,47	-	-	-
hohe - geringe Geruchsbelastung	0,21	0,09	0,67	0,39	0,21	0,39	0,18	0,37	0,28	0,34	0,66	0,37	0,29	-	-
geringe - hohe Schalldämpfung	0,22	0,15	0,21	0,58	0,18	0,59	0,21	0,33	0,23	0,32	0,22	0,35	0,27	0,43	-
Raumklima insgesamt schlecht - gut	0,42	0,36	0,39	0,49	0,41	0,51	0,31	0,66	0,58	0,48	0,45	0,53	0,46	0,52	0,50

Dargestellt sind ausschließlich korrigierte Kontingenzkoeffizienten C_{korr} , die mit χ^2 auf dem Niveau 0,05 signifikant getestet wurden.

$C_{korr} < 0,2$: schwacher Zusammenhang

0,2 ≤ C_{korr} < **0,4**: mittel starker Zusammenhang

C_{korr} ≥ **0,4**: sehr starker Zusammenhang

Anhang 5 Faktorenanalyse

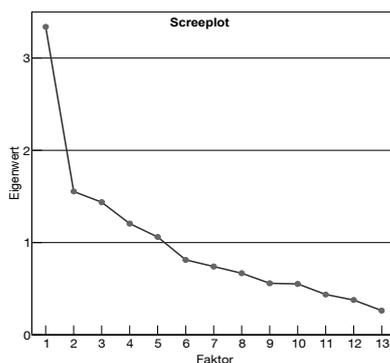
Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse

Rotationsmethode: Varimax

Maß der Stichprobeneignung nach Kaiser-Meyer-Olkin: 0,72

erklärte Gesamtvarianz: 72,4%

Screeplot



Maß der Stichprobeneignung und Kommunalitäten für jede Variable

Variablen	variablenspezifische Kaiser-Meyer-Olkin-Werte	Kommunalitäten	Faktor
schlecht - gut ausgeleuchtet	0,62	0,776	3
dunkel - hell	0,56	0,799	
blendendes - arbeitsgerechtes Licht	0,76	0,882	6
unangenehme - angenehme Gerüche	0,74	0,693	2
übelriechend - wohlriechend	0,73	0,705	
hohe -geringe Geruchsbelästigung	0,83	0,596	
laut - leise	0,71	0,784	1
viele - wenig störende Geräusche	0,71	0,791	
geringe - hohe Schalldämpfung	0,89	0,527	
trockene - feuchte Luft	0,79	0,629	4
verbrauchte - frische Luft	0,73	0,726	
schwankende - gleichförmige Temperatur	0,76	0,766	5
starke Luftbewegung – schwache Luftbewegung	0,53	0,733	

Rotierte Faktormatrix, grau hinterlegt sind die dem jeweiligen Faktor zugeordneten Variablen

Variablen	Faktor					
	1	2	3	4	5	6
schlecht - gut ausgeleuchtet	0,102	0,083	0,812	0,092	0,005	0,301
dunkel - hell	0,047	0,036	0,890	-0,010	0,029	-0,051
blendendes - arbeitsgerechtes Licht	0,132	0,115	0,175	0,080	0,092	0,898
unangenehme - angenehme Gerüche	0,134	0,818	-0,038	0,064	0,006	0,029
übelriechend - wohlriechend	0,050	0,808	0,113	0,177	-0,076	-0,017
hohe -geringe Geruchsbelästigung	0,197	0,700	0,070	-0,001	0,193	0,160
laut - leise	0,857	0,149	-0,006	0,151	0,071	0,015
viele - wenig störende Geräusche	0,858	0,125	0,031	0,172	0,085	0,043
geringe - hohe Schalldämpfung	0,696	0,097	0,124	-0,043	0,049	0,116
trockene - feuchte Luft	0,137	0,066	-0,183	0,693	0,041	0,301
verbrauchte - frische Luft	0,142	0,183	0,266	0,762	-0,046	-0,140
schwankende - gleichförmige Temperatur	0,060	0,103	0,114	0,363	0,774	0,093
starke Luftbewegung – schwache Luftbewegung	0,147	-0,009	-0,070	-0,355	0,761	0,030

Faktorkongruenz

geschätzte Faktorwerte der rotierten Faktoren	generierte Summenwerte					
	Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5	Score 6
	geringe - hohe akustische Güte	geringe - hohe olfaktorische Güte	schlechte - gute Licht- verhältnisse	Luftzustand	Temperatur- schwankung	Blendung
Faktor 1	0,97	0,17	0,09	0,17	0,13	0,13
Faktor 2	0,15	0,96	0,07	0,17	0,06	0,12
Faktor 3	0,06	0,06	0,96	0,10	0,03	0,17
Faktor 4	0,12	0,08	0,05	0,91	0,02	0,08
Faktor 5	0,08	0,08	0,02	-0,01	0,98	0,09
Faktor 6	0,07	0,09	0,15	0,05	0,08	0,90

Anhang 6 Logistische Regressionsmodelle, bivariat, Untersuchungszeitpunkt 1

Einfluss verschiedener Variablen auf die Chance sich kalt zu fühlen für Personen in frei belüfteten Gebäuden (n = 1472) in bivariaten Modellen.

Variable		n	Variablen		Likelihood-Ratio-Test	
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	Chi ²	p*
Befindlichkeitsstörung (SBS-Fall)	nicht vorhanden	1064	1	-	12,74	< 0,001
	vorhanden	408	1,85	1,33 - 2,58		
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	1125	1	-	49,88	< 0,001
	vorhanden	347	3,39	2,44 - 4,72		
Raumklima gesund- heitsabträglich	nein	1048	1	-	15,26	< 0,001
	ja	424	1,95	1,40 - 2,71		
akustische Güte	hoch	262	1	-	4,63	0,099
	niedrig	356	0,98	0,61 - 1,56		
	mittelmäßig	854	0,69	0,46 - 1,05		
olfaktorische Güte	hoch	198	1	-	0,33	0,849
	niedrig	151	1,21	0,63 - 2,35		
	mittelmäßig	1123	1,09	0,67 - 1,78		
Lichtverhältnisse	gut	432	1	-	35,70	< 0,001
	schlecht	199	3,81	2,38 - 6,10		
	mittelmäßig	841	1,26	0,83 - 1,90		
Luftzustand	frisch	697	1	-	1,73	0,188
	verbraucht und trocken	775	1,24	0,90 - 1,72		
Temperatur- schwankung	nicht vorhanden	1106	1	-	25,45	< 0,001
	vorhanden	366	2,41	1,73 - 3,35		
Blendung	nicht vorhanden	555	1	-	0,95	0,621
	stark	450	1,19	0,81 - 1,77		
	mittelmäßig	466	1,17	0,79 - 1,72		
Verglasungsanteil	niedrig	532	1	-	26,79	< 0,001
	hoch	940	2,67	1,79 - 3,98		
Modifizierter Sonnen- eintragskennwert	niedrig	985	1	-	30,76	< 0,001
	mittel	226	0,39	0,22 - 0,69		
	hoch	260	0,29	0,16 - 0,52		
normierter Freiheitsgrad	1	1183	1	-	67,76	< 0,001
	0	48	4,40	2,25 - 8,62		
	0,5	241	4,29	3,00 - 6,12		

* Odds Ratios mit p < 0,05 und LR-Tests mit p < 0,25 sind fett gedruckt.

Einfluss verschiedener Variablen auf die Chance sich kalt zu fühlen für Personen in mechanisch belüfteten Gebäuden (n = 2119) in bivariaten Modellen.

Variable		n	Variablen		Likelihood-Ratio-Test	
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	Chi ²	p*
Befindlichkeitsstörung (SBS-Fall)	nicht vorhanden	1194	1	-	13,87	< 0,001
	vorhanden	925	1,69	1,28 - 2,23		
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	1599	1	-	89,05	< 0,001
	vorhanden	520	3,97	3,00 - 5,27		
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	845	1	-	24,91	< 0,001
	ja	1274	2,14	1,57 - 2,93		
akustische Güte	hoch	244	1	-	15,72	< 0,001
	niedrig	722	1,72	1,06 - 2,79		
	mittelmäßig	1153	0,97	0,60 - 1,57		
olfaktorische Güte	hoch	229	1	-	10,62	0,005
	niedrig	166	2,98	1,51 - 5,89		
	mittelmäßig	1724	1,87	1,07 - 3,28		
Lichtverhältnisse	gut	560	1	-	26,90	< 0,001
	schlecht	322	2,96	1,94 - 4,52		
	mittelmäßig	1237	1,44	0,99 - 2,07		
Luftzustand	frisch	402	1	-	0,10	0,756
	verbraucht und trocken	1717	0,95	0,67 - 1,34		
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	1319	1	-	74,94	< 0,001
	vorhanden	800	3,44	2,58 - 4,59		
Blendung	nicht vorhanden	576	1	-	9,37	0,009
	stark	819	1,72	1,21 - 2,45		
	mittelmäßig	724	1,25	0,89 - 1,77		
Verglasungsanteil	niedrig	364	1	-	8,85	0,003
	hoch	1755	1,86	1,20 - 2,89		
Modifizierter Sonneneintragskennwert	niedrig	951	1	-	8,44	0,015
	mittel	169	0,66	0,37 - 1,15		
	hoch	999	0,67	0,50 - 0,89		
normierter Freiheitsgrad	1	397	1	-	11,82	0,003
	0	1157	2,03	1,31 - 3,13		
	0,5	565	1,63	1,01 - 2,64		

* Odds Ratios mit p < 0,05 und LR-Tests mit p < 0,25 sind fett gedruckt.

Einfluss verschiedener Variablen auf die Chance sich sehr warm zu fühlen für Personen in frei belüfteten Gebäuden (n = 1472) in bivariaten Modellen.

Variable		n	Variablen		Likelihood-Ratio-Test	
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	Chi ²	p*
Befindlichkeitsstörung (SBS-Fall)	nicht vorhanden	1064	1	-	6,93	0,008
	vorhanden	408	0,61	0,41 - 0,89		
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	1203	1	-	13,33	< 0,001
	vorhanden	269	1,98	1,39 - 2,82		
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	1048	1	-	0,18	0,670
	ja	424	0,93	0,66 - 1,31		
akustische Güte	hoch	262	1	-	1,39	0,500
	niedrig	356	1,31	0,81 - 2,14		
	mittelmäßig	854	1,10	0,71 - 1,71		
olfaktorische Güte	hoch	198	1	-	9,18	0,010
	niedrig	151	1,33	0,76 - 2,33		
	mittelmäßig	1123	0,69	0,45 - 1,06		
Lichtverhältnisse	gut	432	1	-	74,64	< 0,001
	schlecht	199	0,12	0,05 - 0,26		
	mittelmäßig	841	0,30	0,22 - 0,41		
Luftzustand	frisch	697	1	-	0,44	0,507
	verbraucht und trocken	775	1,11	0,81 - 1,52		
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	1106	1	-	0,00	0,963
	vorhanden	366	0,99	0,69 - 1,42		
Blendung	nicht vorhanden	555	1	-	0,38	0,825
	stark	450	1,08	0,74 - 1,57		
	mittelmäßig	466	0,96	0,65 - 1,40		
Verglasungsanteil	niedrig	532	1	-	1,40	0,237
	hoch	940	0,82	0,60 - 1,13		
Modifizierter Sonneneintragskennwert	niedrig	985	1	-	2,08	0,353
	mittel	226	0,91	0,58 - 1,45		
	hoch	260	1,30	0,88 - 1,92		
normierter Freiheitsgrad	1	1183	1	-	0,37	0,832
	0	48	0,99	0,41 - 2,37		
	0,5	241	0,88	0,57 - 1,35		

* Odds Ratios mit p < 0,05 und LR-Tests mit p < 0,25 sind fett gedruckt.

Einfluss verschiedener Variablen auf die Chance sich sehr warm zu fühlen für Personen in mechanisch belüfteten Gebäuden (n = 2119) in bivariaten Modellen.

Variable		n	Variablen		Likelihood-Ratio-Test	
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	Chi ²	p*
Befindlichkeitsstörung (SBS-Fall)	nicht vorhanden	1194	1	-	20,43	< 0,001
	vorhanden	925	1,58	1,30 - 1,93		
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	1587	1	-	207,76	< 0,001
	vorhanden	532	4,86	3,91 - 6,03		
Raumklima gesund- heitsabträglich	nein	845	1	-	92,44	< 0,001
	ja	1274	2,89	2,30 - 3,63		
akustische Güte	hoch	244	1	-	31,81	< 0,001
	niedrig	722	2,53	1,73 - 3,72		
	mittelmäßig	1153	1,62	1,11 - 2,36		
olfaktorische Güte	hoch	229	1	-	16,94	< 0,001
	niedrig	166	2,66	1,64 - 4,30		
	mittelmäßig	1724	1,78	1,23 - 2,58		
Lichtverhältnisse	gut	560	1	-	16,77	< 0,001
	schlecht	322	0,62	0,45 - 0,85		
	mittelmäßig	1237	0,64	0,51 - 0,80		
Luftzustand	frisch	402	1	-	44,32	< 0,001
	verbraucht und trocken	1717	2,66	1,94 - 3,65		
Temperatur- schwankung	nicht vorhanden	1319	1	-	2,69	0,101
	vorhanden	800	0,84	0,68 - 1,04		
Blendung	nicht vorhanden	576	1	-	11,22	0,004
	stark	819	1,52	1,19 - 1,96		
	mittelmäßig	724	1,14	0,90 - 1,45		
Verglasungsanteil	niedrig	364	1	-	0,22	0,639
	hoch	1755	1,07	0,82 - 1,39		
Modifizierter Sonnen- eintragskennwert	niedrig	951	1	-	155,69	< 0,001
	mittel	169	2,43	1,64 - 3,62		
	hoch	999	4,03	3,20 - 5,09		
normierter Freiheitsgrad	1	397	1	-	89,25	< 0,001
	0	1157	2,55	1,90 - 3,43		
	0,5	565	0,90	0,63 - 1,29		

* Odds Ratios mit p < 0,05 und LR-Tests mit p < 0,25 sind fett gedruckt.

Einfluss verschiedener Variablen auf die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen für Personen in frei belüfteten Gebäuden (n = 1471) in bivariaten Modellen.

Variable		n	Variablen		Likelihood-Ratio-Test	
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	Chi ²	p*
Befindlichkeitsstörung (SBS-Fall)	nicht vorhanden	1064	1	-	11,54	0,001
	vorhanden	407	2,04	1,36 - 3,06		
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	1124	1	-	46,06	< 0,001
	vorhanden	347	4,13	2,76 - 6,18		
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	1047	1	-	22,77	< 0,001
	ja	424	2,68	1,80 - 3,99		
akustische Güte	hoch	262	1	-	5,46	0,060
	niedrig	355	1,63	0,89 - 2,96		
	mittelmäßig	854	0,95	0,54 - 1,68		
olfaktorische Güte	hoch	198	1	-	1,06	0,589
	niedrig	151	1,45	0,66 - 3,19		
	mittelmäßig	1122	1,08	0,59 - 1,98		
Lichtverhältnisse	gut	431	1	-	25,52	< 0,001
	schlecht	199	4,09	2,28 - 7,33		
	mittelmäßig	841	1,38	0,82 - 2,34		
Luftzustand	frisch	696	1	-	7,19	0,007
	verbraucht und trocken	775	1,74	1,15 - 2,63		
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	1105	1	-	22,59	< 0,001
	vorhanden	366	2,72	1,82 - 4,08		
Blendung	nicht vorhanden	555	1	-	1,10	0,577
	stark	450	1,25	0,77 - 2,04		
	mittelmäßig	466	1,24	0,77 - 2,02		
Verglasungsanteil	niedrig	532	1	-	20,34	< 0,001
	hoch	939	2,95	1,76 - 4,96		
Modifizierter Sonneneintragskennwert	niedrig	985	1	-	19,49	< 0,001
	mittel	226	0,41	0,20 - 0,83		
	hoch	260	0,28	0,13 - 0,60		
normierter Freiheitsgrad	1	1182	1	-	82,20	< 0,001
	0	48	5,05	2,24 - 11,42		
	0,5	241	7,12	4,65 - 10,91		

* Odds Ratios mit p < 0,05 und LR-Tests mit p < 0,25 sind fett gedruckt.

Einfluss verschiedener Variablen auf die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen für Personen in mechanisch belüfteten Gebäuden (n = 2115) in bivariaten Modellen.

Variable		n	Variablen		Likelihood-Ratio-Test	
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	Chi ²	p*
Befindlichkeitsstörung (SBS-Fall)	nicht vorhanden	1192	1	-	15,22	< 0,001
	vorhanden	923	1,87	1,36 - 2,57		
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	1596	1	-	111,99	< 0,001
	vorhanden	519	5,72	4,13 - 7,92		
Raumklima gesund- heitsabträglich	nein	844	1	-	33,92	< 0,001
	ja	1271	2,88	1,96 - 4,23		
akustische Güte	hoch	244	1	-	22,96	< 0,001
	niedrig	721	3,17	1,62 - 6,20		
	mittelmäßig	1150	1,63	0,83 - 3,21		
olfaktorische Güte	hoch	229	1	-	22,35	< 0,001
	niedrig	166	7,57	2,82 - 20,30		
	mittelmäßig	1720	4,03	1,63 - 9,94		
Lichtverhältnisse	gut	560	1	-	22,59	< 0,001
	schlecht	322	2,99	1,86 - 4,81		
	mittelmäßig	1233	1,38	0,90 - 2,09		
Luftzustand	frisch	402	1	-	1,84	0,175
	verbraucht und trocken	1714	1,34	0,87 - 2,06		
Temperatur- schwankung	nicht vorhanden	1316	1	-	83,39	< 0,001
	vorhanden	799	4,52	3,21 - 6,36		
Blendung	nicht vorhanden	575	1	-	18,29	< 0,001
	stark	816	2,44	1,60 - 3,72		
	mittelmäßig	724	1,79	1,18 - 2,72		
Verglasungsanteil	niedrig	362	1	-	10,60	0,001
	hoch	1753	2,26	1,31 - 3,89		
Modifizierter Sonnen- eintragskennwert	niedrig	948	1	-	3,90	0,142
	mittel	169	0,74	0,39 - 1,38		
	hoch	998	0,73	0,53 - 1,01		
normierter Freiheitsgrad	1	396	1	-	20,08	< 0,001
	0	1155	2,89	1,67 - 5,01		
	0,5	564	1,83	1,00 - 3,38		

* Odds Ratios mit p < 0,05 und LR-Tests mit p < 0,25 sind fett gedruckt.

Einfluss verschiedener Variablen auf die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen für Personen in frei belüfteten Gebäuden (n = 1471) in bivariaten Modellen.

Variable		n	Variablen		Likelihood-Ratio-Test	
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	Chi ²	p*
Befindlichkeitsstörung (SBS-Fall)	nicht vorhanden	1064	1	-	6,51	0,011
	vorhanden	407	1,63	1,13 - 2,37		
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	1202	1	-	34,58	< 0,001
	vorhanden	269	3,26	2,24 - 4,76		
Raumklima gesund- heitsabträglich	nein	1047	1	-	15,34	< 0,001
	ja	424	2,09	1,45 - 3,00		
akustische Güte	hoch	262	1	-	21,51	< 0,001
	niedrig	355	3,67	1,92 - 7,01		
	mittelmäßig	854	1,82	0,97 - 3,42		
olfaktorische Güte	hoch	198	1	-	39,97	< 0,001
	niedrig	151	10,89	4,13 - 28,67		
	mittelmäßig	1122	3,62	1,45 - 9,01		
Lichtverhältnisse	gut	431	1	-	0,23	0,892
	schlecht	199	1,06	0,59 - 1,91		
	mittelmäßig	841	1,10	0,73 - 1,66		
Luftzustand	frisch	696	1	-	14,11	< 0,001
	verbraucht und trocken	775	2,02	1,39 - 2,95		
Temperatur- schwankung	nicht vorhanden	1105	1	-	14,05	< 0,001
	vorhanden	366	2,07	1,43 - 2,99		
Blendung	nicht vorhanden	555	1	-	3,23	0,199
	stark	450	1,43	0,92 - 2,21		
	mittelmäßig	466	1,40	0,90 - 2,17		
Verglasungsanteil	niedrig	532	1	-	1,11	0,292
	hoch	939	0,82	0,57 - 1,18		
Modifizierter Sonnen- eintragskennwert	niedrig	985	1	-	3,58	0,167
	mittel	226	1,35	0,83 - 2,18		
	hoch	260	1,48	0,95 - 2,31		
normierter Freiheitsgrad	1	1182	1	-	10,08	0,006
	0	48	3,32	1,64 - 6,71		
	0,5	241	1,36	0,86 - 2,14		

* Odds Ratios mit p < 0,05 und LR-Tests mit p < 0,25 sind fett gedruckt.

Einfluss verschiedener Variablen auf die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen für Personen in mechanisch belüfteten Gebäuden (n = 2115) in bivariaten Modellen.

Variable		n	Variablen		Likelihood-Ratio-Test	
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	Chi ²	p*
Befindlichkeitsstörung (SBS-Fall)	nicht vorhanden	1192	1	-	52,07	< 0,001
	vorhanden	923	1,95	1,63 - 2,34		
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	1585	1	-	262,79	< 0,001
	vorhanden	530	5,45	4,41 - 6,73		
Raumklima gesund- heitsabträglich	nein	844	1	-	194,43	< 0,001
	ja	1271	4,11	3,32 - 5,08		
akustische Güte	hoch	244	1	-	86,71	< 0,001
	niedrig	721	4,79	3,25 - 7,06		
	mittelmäßig	1150	2,71	1,86 - 3,96		
olfaktorische Güte	hoch	229	1	-	61,25	< 0,001
	niedrig	166	5,66	3,51 - 9,13		
	mittelmäßig	1720	3,19	2,18 - 4,67		
Lichtverhältnisse	gut	560	1	-	8,68	0,013
	schlecht	322	1,52	1,14 - 2,02		
	mittelmäßig	1233	1,11	0,89 - 1,37		
Luftzustand	frisch	402	1	-	134,70	< 0,001
	verbraucht und trocken	1714	5,24	3,78 - 7,27		
Temperatur- schwankung	nicht vorhanden	1316	1	-	1,73	0,189
	vorhanden	799	1,13	0,94 - 1,36		
Blendung	nicht vorhanden	575	1	-	44,62	< 0,001
	stark	816	2,19	1,73 - 2,78		
	mittelmäßig	724	1,60	1,29 - 2,00		
Verglasungsanteil	niedrig	362	1	-	6,34	0,012
	hoch	1753	1,37	1,07 - 1,76		
Modifizierter Sonnen- eintragskennwert	niedrig	948	1	-	185,24	< 0,001
	mittel	169	1,58	1,09 - 2,29		
	hoch	998	3,83	3,12 - 4,69		
normierter Freiheitsgrad	1	396	1	-	170,13	< 0,001
	0	1155	4,21	3,16 - 5,62		
	0,5	564	1,37	0,98 - 1,90		

* Odds Ratios mit p < 0,05 und LR-Tests mit p < 0,25 sind fett gedruckt.

Anhang 7 Logistische Regressionsmodelle, multivariat, Untersuchungszeitpunkt 1, Likelihood-Quotienten-Test

Likelihood-Quotienten-Test für alle Variablen im Startmodell für die Chance sich kalt zu fühlen für frei belüftete Räume und mechanisch belüftete Räume.

Variable, die aus dem Modell herausgenommen wird	frei belüftet			mechanisch belüftet		
	Likelihood-Quotienten-Test			Likelihood-Quotienten-Test		
	Chi ²	df	p*	Chi ²	df	p*
Befindlichkeitsstörung	1,63	1	0,201	0,19	1	0,660
Raumklima gesundheitsabträglich	0,45	1	0,502	0,25	1	0,620
akustische Güte	8,83	2	0,012	4,97	2	0,083
olfaktorische Güte	-	-	-	1,37	2	0,505
Lichtverhältnisse	26,44	2	< 0,001	19,61	2	< 0,001
Luftzustand	2,22	1	0,137	-	-	-
Temperaturschwankung	13,80	1	< 0,001	42,0	1	< 0,001
Blendung	-	-	-	0,59	2	0,744
Verglasungsanteil	24,30	1	< 0,001	5,50	1	0,019
Modifizierter Sonneneintragskennwert	-	-	-	-	-	-
normierter Freiheitsgrad	36,61	2	< 0,001	0,52	2	0,771

* Fett markiert sind die Werte auf einem Signifikanzniveau von 10%.

Likelihood-Quotienten-Test für alle Variablen im Startmodell für die Chance sich sehr warm zu fühlen für frei belüftete Räume und mechanisch belüftete Räume.

Variable, die aus dem Modell herausgenommen wird	frei belüftet			mechanisch belüftet		
	Likelihood-Quotienten-Test			Likelihood-Quotienten-Test		
	Chi ²	df	p*	Chi ²	df	p*
Befindlichkeitsstörung	5,28	1	0,022	2,1	1	0,147
Raumklima gesundheitsabträglich	-	-	-	13,38	1	< 0,001
akustische Güte	-	-	-	7,34	2	0,026
olfaktorische Güte	9,98	2	0,007	0,06	2	0,969
Lichtverhältnisse	74,81	2	< 0,001	33,18	2	< 0,001
Luftzustand	-	-	-	2,41	1	0,120
Temperaturschwankung	-	-	-	9,30	1	0,002
Blendung	-	-	-	1,73	2	0,421
Verglasungsanteil	0,75	1	0,387	-	-	-
Modifizierter Sonneneintragskennwert	-	-	-	56,66	2	< 0,001
normierter Freiheitsgrad	-	-	-	17,94	2	< 0,001

* Fett markiert sind die Werte auf einem Signifikanzniveau von 10%.

Likelihood-Quotienten-Test für alle Variablen im Startmodell für die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen für frei belüftete Räume und mechanisch belüftete Räume.

Variable, die aus dem Modell herausgenommen wird	frei belüftet			mechanisch belüftet		
	Likelihood-Quotienten-Test			Likelihood-Quotienten-Test		
	Chi ²	df	p*	Chi ²	df	p*
Befindlichkeitsstörung	0,34	1	0,562	0,52	1	0,471
Raumklima gesundheitsabträglich	2,41	1	0,121	1,32	1	0,250
akustische Güte	1,38	2	0,502	1,33	2	0,514
olfaktorische Güte	-	-	-	5,87	2	0,053
Lichtverhältnisse	13,42	2	0,001	11,73	2	0,003
Luftzustand	0,26	1	0,609	3,64	1	0,057
Temperaturschwankung	9,49	1	0,002	42,93	1	< 0,001
Blendung	-	-	-	2,2	2	0,333
Verglasungsanteil	16,55	1	< 0,001	6,82	1	0,009
Modifizierter Sonneneintragskennwert	-	-	-	-	-	-
normierter Freiheitsgrad	43,80	2	< 0,001	2,90	2	0,234

* Fett markiert sind die Werte auf einem Signifikanzniveau von 10%.

Likelihood-Quotienten-Test für alle Variablen im Startmodell für die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen für frei belüftete Räume und mechanisch belüftete Räume.

Variable, die aus dem Modell herausgenommen wird	frei belüftet			mechanisch belüftet		
	Likelihood-Quotienten-Test			Likelihood-Quotienten-Test		
	Chi ²	df	p*	Chi ²	df	p*
Befindlichkeitsstörung	0,03	1	0,865	1,45	1	0,228
Raumklima gesundheitsabträglich	0,75	1	0,388	25,76	1	< 0,001
akustische Güte	3,98	2	0,137	11,07	2	0,004
olfaktorische Güte	14,09	2	0,001	3,16	2	0,206
Lichtverhältnisse	-	-	-	0,68	2	0,711
Luftzustand	2,53	1	0,112	20,82	1	< 0,001
Temperaturschwankung	7,18	1	0,007	0,52	1	0,470
Blendung	0,49	2	0,784	8,47	2	0,014
Verglasungsanteil	-	-	-	-	-	-
Modifizierter Sonneneintragskennwert	1,39	2	0,500	56,17	2	< 0,001
normierter Freiheitsgrad	3,61	2	0,164	23,57	2	< 0,001

* Fett markiert sind die Werte auf einem Signifikanzniveau von 10%.

Anhang 8 Logistische Regressionsmodelle für die Zielgrößen, multivariat, Untersuchungszeitpunkt 1

Modellkennwerte für die Chance einer Kalt-Empfindung bei freier Lüftung (Modell 1), adjustiert auf Alter, Geschlecht und Befindlichkeitsstörung

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p*	
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	1125	1	-	-
	vorhanden	347	2,87	1,98 - 4,16	<0,001
akustische Güte	hoch	262	1	-	-
	niedrig	356	0,47	0,28 - 0,81	0,006
	mittel	854	0,49	0,31 - 0,79	0,003
Lichtverhältnisse	gut	432	1	-	-
	schlecht	199	3,50	2,07 - 5,91	<0,001
	mittel	841	1,17	0,75 - 1,83	0,482
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	1106	1	-	-
	vorhanden	366	2,09	1,44 - 3,05	<0,001
Verglasungsanteil	niedrig	532	1	-	-
	hoch	940	2,85	1,98 - 4,16	<0,001
normierter Freiheitsgrad	1	1183	1	-	-
	0	48	3,34	1,58 - 7,05	0,002
	0,5	241	3,17	2,14 - 4,70	<0,001
Freiheitsgrade: 13 LR-Test: p < 0,001 Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,23 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): p = 0,816 Klassifikationstabelle: 0,2 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance einer Kalt-Empfindung bei mechanischer Lüftung (Modell 2), adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p*	
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	1599	1	-	-
	vorhanden	520	2,95	2,18 - 3,99	<0,001
akustische Güte	hoch	244	1	-	-
	niedrig	722	0,79	0,47 - 1,33	0,380
	mittel	1153	0,60	0,36 - 1,00	0,052
Lichtverhältnisse	gut	560	1	-	-
	schlecht	322	2,88	1,83 - 4,52	<0,001
	mittel	1237	1,52	1,03 - 2,23	0,034
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	1319	1	-	-
	vorhanden	800	2,77	2,04 - 3,76	<0,001
Verglasungsanteil	niedrig	364	1	-	-
	hoch	1755	1,75	1,10 - 2,78	0,019
Freiheitsgrade: 10 LR-Test: p < 0,001 Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,18 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): p = 0,964 Klassifikationstabelle: 0,2 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance einer Sehr-Warm-Empfindung bei freier Lüftung (Modell 3),
adjustiert auf Alter, Geschlecht und Befindlichkeitsstörung

Variable		n	Variablen		Wald-Test
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p*
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	1203	1	-	-
	vorhanden	269	2,07	1,42 - 3,02	<0,001
olfaktorische Güte	hoch	198	1	-	-
	niedrig	151	2,03	1,11 - 3,71	0,021
	mittel	1123	0,85	0,54 - 1,34	0,489
Lichtverhältnisse	gut	432	1	-	-
	schlecht	199	0,12	0,05 - 0,26	<0,001
	mittel	841	0,31	0,22 - 0,43	<0,001
Freiheitsgrade: 9 LR-Test: $p < 0,001$ Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,13 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,266$ Klassifikationstabelle: 0,0 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance einer Sehr-Warm-Empfindung bei mechanischer Lüftung
(Modell 4), adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable		n	Variablen		Wald-Test
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p*
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	1587	1	-	-
	vorhanden	532	3,95	3,11 - 5,00	<0,001
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	845	1	-	-
	ja	1274	1,70	1,30 - 2,24	<0,001
akustische Güte	hoch	244	1	-	-
	niedrig	722	1,73	1,11 - 2,70	0,015
	mittel	1153	1,28	0,85 - 1,94	0,236
Lichtverhältnisse	gut	560	1	-	-
	schlecht	322	0,38	0,26 - 0,55	<0,001
	mittel	1237	0,55	0,43 - 0,71	<0,001
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	1319	1	-	-
	vorhanden	800	0,69	0,54 - 0,88	0,002
Modifizierter Sonneneintragskennwert	niedrig	951	1	-	-
	mittel	169	1,92	1,23 - 2,99	0,004
	hoch	999	2,82	2,14 - 3,70	<0,001
normierter Freiheitsgrad	1	397	1	-	-
	0	1157	1,18	0,82 - 1,69	0,373
	0,5	565	0,62	0,42 - 0,92	0,017
Freiheitsgrade: 14 LR-Test: $p < 0,001$ Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,28 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,198$ Klassifikationstabelle: 3,4 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen bei freier Lüftung (Modell 5),
adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p*	
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	1124	1	-	-
	vorhanden	347	3,56	2,27 - 5,59	<0,001
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	1047	1	-	-
	ja	424	1,46	0,93- 2,29	0,100
Lichtverhältnisse	gut	431	1	-	-
	schlecht	199	2,81	1,47 - 5,37	0,002
	mittel	841	1,13	0,64 - 1,98	0,681
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	1105	1	-	-
	vorhanden	366	2,02	1,29 - 3,18	0,002
Verglasungsanteil	niedrig	532	1	-	-
	hoch	939	3,03	1,71 - 5,35	<0,001
normierter Freiheitsgrad	1	1182	1	-	-
	0	48	3,01	1,23 - 7,40	0,016
	0,5	241	4,76	3,01 - 7,53	<0,001
Freiheitsgrade: 11 LR-Test: p < 0,001 Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,27 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): p = 0,972 Klassifikationstabelle: -0,2 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen bei mechanischer Lüftung (Modell 6), adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p*	
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	1596	1	-	-
	vorhanden	519	4,21	2,97 - 5,96	<0,001
olfaktorische Güte	hoch	229	1	-	-
	niedrig	166	4,18	1,48 - 11,80	0,007
	mittel	1720	2,91	1,14 - 7,43	0,026
Lichtverhältnisse	gut	560	1	-	-
	schlecht	322	2,85	1,70 - 4,76	<0,001
	mittel	1233	1,39	0,89 - 2,17	0,147
Luftzustand	frisch	402	1	-	-
	verbraucht und trocken	1714	0,73	0,45 - 1,18	0,204
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	1316	1	-	-
	vorhanden	799	3,48	2,43 - 4,98	<0,001
Verglasungsanteil	niedrig	362	1	-	-
	hoch	1753	2,11	1,18 - 3,77	0,011
Freiheitsgrade: 11 LR-Test: p < 0,001 Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,23 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): p = 0,761 Klassifikationstabelle: 0,2 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen bei freier Lüftung (Modell 7),
adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p*	
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	1202	1	-	-
	vorhanden	269	3,16	2,13 - 4,67	<0,001
akustische Güte	hoch	262	1	-	-
	niedrig	355	2,13	1,08 - 4,24	0,030
	mittel	854	1,38	0,72 - 2,64	0,337
olfaktorische Güte	gut	198	1	-	-
	schlecht	151	7,02	2,56 - 19,28	<0,001
	mittel	1122	2,81	1,11 - 7,13	0,030
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	1105	1	-	-
	vorhanden	366	1,78	1,21 - 2,63	0,003
Freiheitsgrade: 9 LR-Test: $p < 0,001$ Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,13 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,983$ Klassifikationstabelle: 0,0 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen bei mechanischer Lüftung
(Modell 8), adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall*	p*	
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	1585	1	-	-
	vorhanden	530	4,56	3,59 - 5,78	<0,001
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	844	1	-	-
	ja	1271	1,89	1,47 - 2,43	<0,001
akustische Güte	hoch	244	1	-	-
	niedrig	721	2,17	1,40 - 3,38	0,001
	mittel	1150	1,78	1,17 - 2,71	0,007
Luftzustand	frisch	402	1	-	-
	verbraucht und trocken	1714	2,34	1,62 - 3,39	<0,001
Blendung	keine	575	1	-	-
	starke	816	1,39	1,05 - 1,84	0,020
	mittlere	724	1,43	1,10 - 1,85	0,007
Modifizierter Sonneneintragskennwert	niedrig	948	1	-	-
	mittel	169	1,24	0,80 - 1,92	0,329
	hoch	998	2,49	1,95 - 3,17	<0,001
normierter Freiheitsgrad	1	396	1	-	-
	0	1155	1,58	1,11 - 2,23	0,010
	0,5	564	0,85	0,58 - 1,24	0,390
Freiheitsgrade: 14 LR-Test: $p < 0,001$ Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,35 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,246$ Klassifikationstabelle: 10,3 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Anhang 9 Stichprobenbeschreibung Untersuchungszeitpunkt 2

Anteil von Frauen und Männern, Anteil der Altersgruppen und Anteil Befindlichkeitsgestörter je Gebäude. Die frei belüfteten Gebäude sind grau hinterlegt.

Gebäude	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
n gesamt	105	96	117	108	117	108	124	100	92	85	107	96	102	110	
Frauen [%]	70	79	41	64	32	40	77	62	63	53	79	84	73	38	
Männer [%]	30	21	59	36	68	60	23	38	37	47	21	16	27	62	
Alter [%]	< 31	29	35	16	19	16	15	56	32	29	35	25	14	49	23
	31 – 40	29	29	36	31	36	32	17	31	37	21	37	35	33	37
	41 – 50	25	20	26	26	32	38	12	30	18	29	28	33	12	29
	> 51	18	16	22	23	15	15	15	7	15	14	9	18	6	11
Befindlichkeitsgestörte (SBS) [%]	37	45	41	40	19	26	54	34	29	31	44	32	46	37	

Soziodemografische Größen nach Anlagenart

Anlagenart	Fensterlüftung		Teilklimaanlage		Klimaanlage		Gesamt		
	n	%	n	%	n	%	n	%	
Frauen	386	63	170	51	332	64	888	61	
Männer	228	37	166	49	184	36	578	39	
Alter	< 31	137	22	101	30	174	34	412	28
	31 - 40	212	35	112	33	140	27	464	32
	41 - 50	175	29	88	26	112	22	375	26
	> 51	90	15	36	11	90	17	216	15
befindlichkeitsgestört*	205	33	121	35	222	43	548	37	
nicht befindlichkeitsgestört*	415	67	222	65	295	57	932	63	

Anhang 10 Messwerte Untersuchungszeitpunkt 2

Mittelwert des Vorhergesagten mittleren Votums (PMV) und Mittelwert des Vorhergesagten Anteils Unzufriedener (PPD) nach Fanger und Mayer je Gebäude. Die Gebäude sind nach ihrer laufenden mittleren Außentemperatur sortiert. Grau hinterlegt sind die frei belüfteten Gebäude.

Gebäude	6	8	7	10	11	13	9	5	16	14	2	15	12	3
Anzahl Personen	85	84	109	83	93	95	97	89	98	90	100	92	74	94
Mittelwert PMV	0,17	0,52	0,31	-0,19	0,18	0,06	0,62	0,44	0,06	0,33	0,50	0,08	0,28	0,60
Standardabw.	0,25	0,26	0,25	0,32	0,30	0,25	0,25	0,25	0,30	0,27	0,18	0,30	0,27	0,35
Mittelwert PPD Fanger	6,8	12,1	8,3	7,8	7,6	6,3	14,4	10,4	6,6	8,8	10,9	7,0	8,1	15,1
Standardabw.	2,2	5,6	3,3	3,6	3,4	2,1	5,3	4,4	1,8	3,8	4,2	2,3	3,9	7,9
Mittelwert PPD Mayer	20,5	19,3	18,7	32,6	21,4	22,9	20,4	18,4	23,4	19,0	17,6	23,5	19,4	22,4
Standardabw.	5,9	4,5	4,3	12,6	7,1	7,1	4,9	4,5	8,4	5,1	2,9	9,6	5,0	7,1

Mittelwert des Vorhergesagten mittleren Votums (PMV) und Mittelwert des Vorhergesagten Anteils Unzufriedener (PPD) nach Fanger und Mayer nach Anlagenart.

Gebäude	Fenster	Teilklimaanlage	Klimaanlage	Gesamt
Anzahl Personen	555	288	440	1283
Mittelwert PMV	0,16	0,23	0,49	0,29
Standardabweichung	0,33	0,35	0,29	0,35
Mittelwert PPD Fanger	7,8	8,7	11,8	9,3
Standardabweichung	3,5	4,4	5,9	5,0
Mittelwert PPD Mayer	22,3	22,0	19,7	21,3
Standardabweichung	8,6	8,0	5,3	7,6

Anhang 11 Logistische Regressionsmodelle, multivariat, Untersuchungszeitpunkt 2, Modellverifizierung

Modellkennwerte für die Chance einer Kalt-Empfindung bei freier Lüftung (Modell 1), Modellverifizierung, adjustiert auf Alter, Geschlecht und Befindlichkeitsstörung

Variable		n	Variablen		Wald-Test
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	360	1	-	-
	vorhanden	105	4,02	1,70 - 9,53	0,002
akustische Güte	hoch	70	1	-	-
	niedrig	114	0,33	0,10 - 1,12	0,075
	mittel	281	0,45	0,16 - 1,24	0,122
Lichtverhältnisse	gut	60	1	-	-
	schlecht/ mittel	405	4,25	1,78 - 10,15	0,001
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	377	1	-	-
	vorhanden	88	3,45	1,46 - 8,18	0,005
Verglasungsanteil	niedrig	208	1	-	-
	hoch	257	1,84	0,80 - 4,23	0,152
normierter Freiheitsgrad	1	372	1	-	-
	0 und 0,5	93	2,58	1,10 - 6,06	0,029
Freiheitsgrade: 10 LR-Test: $p < 0,001$ Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,28 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 10): $p = 0,451$ Klassifikationstabelle: 1,3 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance einer Kalt-Empfindung bei mechanischer Lüftung (Modell 2), Modellverifizierung, adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable		n	Variablen		Wald-Test
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	485	1	-	-
	vorhanden	141	3,31	1,98 - 5,52	< 0,001
akustische Güte	hoch	60	1	-	-
	niedrig	212	0,32	0,14 - 0,72	0,006
	mittel	354	0,40	0,19 - 0,86	0,018
Lichtverhältnisse	gut	152	1	-	-
	schlecht	91	4,36	2,01 - 9,48	< 0,001
	mittel	383	1,50	0,77 - 2,93	0,236
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	402	1	-	-
	vorhanden	224	2,95	1,79 - 4,89	< 0,001
Verglasungsanteil	niedrig	142	1	-	-
	hoch	484	0,94	0,51 - 1,73	0,835
Freiheitsgrade: 10 LR-Test: $p < 0,001$ Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,24 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 10): $p = 0,727$ Klassifikationstabelle: 1,4 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance einer Sehr-Warm-Empfindung bei freier Lüftung (Modell 3),
Modellverifizierung, adjustiert auf Alter, Geschlecht und Befindlichkeitsstörung

Variable		n	Variablen		Wald-Test
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	391	1	-	-
	vorhanden	74	1,49	0,69 - 3,23	0,310
olfaktorische Güte	hoch/ mittel	411	1	-	-
	niedrig	54	1,85	0,78 - 4,40	0,166
Lichtverhältnisse	gut	134	1	-	-
	schlecht/ mittel	331	0,20	0,11 - 0,38	<0,001
Freiheitsgrade: 6 LR-Test: p < 0,001 Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,13 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 9): p = 0,936 Klassifikationstabelle: -0,2 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance einer Sehr-Warm-Empfindung bei mechanischer Lüftung
(Modell 4), Modellverifizierung, adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable		n	Variablen		Wald-Test
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	495	1	-	-
	vorhanden	131	2,51	1,59 - 3,97	< 0,001
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	226	1	-	-
	ja	400	2,36	1,41 - 3,95	0,001
akustische Güte	hoch	60	1	-	-
	niedrig	212	6,43	1,82 - 22,67	0,004
	mittel	354	5,57	1,64 - 18,97	0,006
Lichtverhältnisse	gut	152	1	-	-
	schlecht	91	0,43	0,21 - 0,86	0,017
	mittel	383	0,47	0,29 - 0,76	0,002
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	402	1	-	-
	vorhanden	224	0,81	0,51 - 1,27	0,349
Modifizierter Sonneneintragskennwert	niedrig	313	1	-	-
	mittel	170	2,95	1,76 - 4,96	< 0,001
	hoch	143	2,00	1,14 - 3,51	0,016
normierter Freiheitsgrad	1	132	1	-	-
	0	317	0,89	0,48 - 1,63	0,702
	0,5	177	0,91	0,47 - 1,76	0,775
Freiheitsgrade: 14 LR-Test: p < 0,001 Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,20 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 10): p = 0,854 Klassifikationstabelle: 1,4 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen bei freier Lüftung (Modell 5),
Modellverifizierung, adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p	
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	360	1	-	-
	vorhanden	104	2,47	0,82 - 7,42	0,108
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	292	1	-	-
	ja	172	3,69	1,13 - 12,03	0,031
Lichtverhältnisse	gut/ mittel	404	1	-	-
	schlecht	60	3,76	1,22 - 11,58	0,021
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	376	1	-	-
	vorhanden	88	7,25	2,46 - 21,34	< 0,001
Verglasungsanteil	niedrig	207	1	-	-
	hoch	257	2,29	0,72 - 7,31	0,160
normierter Freiheitsgrad	1	372	1	-	-
	0 und 0,5	92	2,41	0,77 - 7,56	0,130
Freiheitsgrade: 8 LR-Test: p < 0,001 Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,35 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 10): p = 0,909 Klassifikationstabelle: 1,3 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen bei mechanischer Lüftung (Modell 6),
Modellverifizierung, adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p	
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	485	1	-	-
	vorhanden	140	4,42	2,38 - 8,22	< 0,001
olfaktorische Güte	hoch/ mittel	575	1	-	-
	niedrig	50	1,35	0,50 - 3,64	0,556
Lichtverhältnisse	gut/ mittel	53	1	-	-
	schlecht	91	4,43	2,28 - 8,63	< 0,001
Luftzustand	frisch	183	1	-	-
	verbraucht und trocken	442	1,11	0,53 - 2,32	0,789
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	402	1	-	-
	vorhanden	223	4,51	2,37 - 8,59	< 0,001
Verglasungsanteil	niedrig	142	1	-	-
	hoch	483	1,27	0,57 - 2,82	0,552
Freiheitsgrade: 8 LR-Test: p < 0,001 Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,29 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 10): p = 0,883 Klassifikationstabelle: 0,5 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen bei freier Lüftung (Modell 7),
Modellverifizierung, adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p	
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	390	1	-	-
	vorhanden	74	2,86	1,53 - 5,34	0,001
akustische Güte	hoch/ mittel	350	1	-	-
	niedrig	114	1,56	0,84 - 2,89	0,155
olfaktorische Güte	hoch/ mittel	410	1	-	-
	niedrig	54	1,96	0,95 - 4,04	0,068
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	376	1	-	-
	vorhanden	88	1,37	0,71 - 2,64	0,344
Freiheitsgrade: 6 LR-Test: p = 0,002 Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,08 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): p = 0,936 Klassifikationstabelle: -0,4 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen bei mechanischer Lüftung
(Modell 8), Modellverifizierung, adjustiert auf Alter und Geschlecht

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p	
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	494	1	-	-
	vorhanden	131	2,94	1,89 - 4,59	< 0,001
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	226	1	-	-
	ja	399	1,92	1,20 - 3,07	0,007
akustische Güte	hoch	60	1	-	-
	niedrig	212	3,39	1,30 - 8,86	0,013
	mittel	353	3,07	1,22 - 7,75	0,018
Luftzustand	frisch	183	1	-	-
	verbraucht und trocken	442	2,71	1,59 - 4,63	< 0,001
Blendung	keine	208	1	-	-
	starke	157	1,31	0,78 - 2,20	0,300
	mittlere	260	1,06	0,67 - 1,69	0,802
Modifizierter Sonneneintragskennwert	niedrig	312	1	-	-
	mittel	170	1,93	1,18 - 3,16	0,009
	hoch	143	2,63	1,57 - 4,40	< 0,001
normierter Freiheitsgrad	1	132	1	-	-
	0	317	0,66	0,38 - 1,15	0,146
	0,5	176	0,40	0,21 - 0,74	0,004
Freiheitsgrade: 14 LR-Test: p < 0,001 Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,25 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 10): p = 0,616 Klassifikationstabelle: 4,1 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Anhang 12 Logistische Regressionsmodelle, multivariat, Untersuchungszeitpunkt 2, Adjustierung auf Messwerte

Modellkennwerte für die Chance einer Kalt-Empfindung bei freier Lüftung (Modell 1a), adjustiert auf Alter, Geschlecht, Befindlichkeitsstörung, Bekleidungsämmung, Metabolismus, operative Temperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte.

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p	
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	360	1	-	-
	vorhanden	105	4,34	1,73 - 10,88	0,002
akustische Güte	hoch	70	1	-	-
	niedrig	114	0,34	0,10 - 1,19	0,092
	mittel	281	0,50	0,17 - 1,44	0,200
Lichtverhältnisse	gut	60	1	-	-
	schlecht/ mittel	405	4,64	1,90 - 11,35	0,001
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	377	1	-	-
	vorhanden	88	3,96	1,59 - 9,86	0,003
Verglasungsanteil	niedrig	208	1	-	-
	hoch	257	2,19	0,82 - 5,90	0,119
normierter Freiheitsgrad	1	372	1	-	-
	0 und 0,5	93	2,54	1,06 - 6,08	0,037

Freiheitsgrade: 15
LR-Test: $p < 0,001$
Nagelkerkes Pseudo-R²: 0,33
Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,256$
Klassifikationstabelle: 0,8 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit

Modellkennwerte für die Chance einer Kalt-Empfindung bei mechanischer Lüftung (Modell 2a), adjustiert auf Alter, Geschlecht, Bekleidungsämmung, Metabolismus, operative Temperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte.

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p	
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	485	1	-	-
	vorhanden	141	3,37	1,93 - 5,88	< 0,001
akustische Güte	hoch	60	1	-	-
	niedrig	212	0,29	0,12 - 0,70	0,006
	mittel	354	0,34	0,15 - 0,77	0,010
Lichtverhältnisse	gut	152	1	-	-
	schlecht	91	4,28	1,90 - 9,67	< 0,001
	mittel	383	1,44	0,72 - 2,87	0,299
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	402	1	-	-
	vorhanden	224	3,10	1,81 - 5,31	< 0,001
Verglasungsanteil	niedrig	142	1	-	-
	hoch	484	0,72	0,33 - 1,56	0,401

Freiheitsgrade: 15
LR-Test: $p < 0,001$
Nagelkerkes Pseudo-R²: 0,34
Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,731$
Klassifikationstabelle: 1,4 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit

Modellkennwerte für die Chance einer Sehr-Warm-Empfindung bei freier Lüftung (Modell 3a), adjustiert auf Alter, Geschlecht, Befindlichkeitsstörung, Bekleidungsämmung, Metabolismus, operative Temperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte.

Variable		n	Variablen		Wald-Test
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	391	1	-	-
	vorhanden	74	1,26	0,55 - 2,92	0,584
olfaktorische Güte	hoch/ mittel	411	1	-	-
	niedrig	54	2,64	1,05 - 6,64	0,038
Lichtverhältnisse	gut	134	1	-	-
	schlecht/ mittel	331	0,16	0,08 - 0,31	< 0,001
Freiheitsgrade: 11 LR-Test: $p < 0,001$ Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,23 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,280$ Klassifikationstabelle: -0,2 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance einer Sehr-Warm-Empfindung bei mechanischer Lüftung (Modell 4a), adjustiert auf Alter, Geschlecht, Bekleidungsämmung, Metabolismus, operative Temperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte.

Variable		n	Variablen		Wald-Test
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	495	1	-	-
	vorhanden	131	2,55	1,57 - 4,14	< 0,001
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	226	1	-	-
	ja	400	2,24	1,31 - 3,83	0,003
akustische Güte	hoch	60	1	-	-
	niedrig	212	7,59	2,02 - 28,51	0,003
	mittel	354	6,31	1,76 - 22,65	0,005
Lichtverhältnisse	gut	152	1	-	-
	schlecht	91	0,42	0,20 - 0,88	0,022
	mittel	383	0,46	0,28 - 0,77	0,003
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	402	1	-	-
	vorhanden	224	0,90	0,56 - 1,46	0,675
Modifizierter Sonneneintragskennwert	niedrig	313	1	-	-
	mittel	170	1,29	0,65 - 2,55	0,462
	hoch	143	0,54	0,26 - 1,14	0,106
normierter Freiheitsgrad	1	132	1	-	-
	0	317	1,06	0,54 - 2,08	0,865
	0,5	177	1,12	0,54 - 2,32	0,767
Freiheitsgrade: 19 LR-Test: $p < 0,001$ Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,30 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,882$ Klassifikationstabelle: 2,8 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen bei freier Lüftung (Modell 5a), adjustiert auf Alter, Geschlecht, Bekleidungsämmung, Metabolismus, operative Temperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte.

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p	
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	360	1	-	-
	vorhanden	104	2,38	0,73 - 7,78	0,150
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	292	1	-	-
	ja	172	3,62	1,03 - 12,72	0,045
Lichtverhältnisse	gut/ mittel	404	1	-	-
	schlecht	60	3,77	1,11 - 12,70	0,033
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	376	1	-	-
	vorhanden	88	8,25	2,61 - 26,05	< 0,001
Verglasungsanteil	niedrig	207	1	-	-
	hoch	257	2,23	0,47 - 10,51	0,310
normierter Freiheitsgrad	1	372	1	-	-
	0 und 0,5	92	2,22	0,66 - 7,49	0,197

Freiheitsgrade: 13
 LR-Test: $p < 0,001$
 Nagelkerkes Pseudo-R²: 0,41
 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,427$
 Klassifikationstabelle: 0,9 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Konfidenzintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich kalt zu fühlen bei mechanischer Lüftung (Modell 6a), adjustiert auf Alter, Geschlecht, Bekleidungsämmung, Metabolismus, operative Temperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte.

Variable	n	Variablen		Wald-Test	
		Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p	
Überempfindlichkeit gegen Kälte	nicht vorhanden	485	1	-	-
	vorhanden	140	4,72	2,44 - 9,14	< 0,001
olfaktorische Güte	hoch/ mittel	575	1	-	-
	niedrig	50	1,63	0,58 - 4,54	0,350
Lichtverhältnisse	gut/ mittel	53	1	-	-
	schlecht	91	4,64	2,26 - 9,53	< 0,001
Luftzustand	frisch	183	1	-	-
	verbraucht und trocken	442	1,15	0,53 - 2,50	0,717
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	402	1	-	-
	vorhanden	223	4,63	2,35 - 9,12	< 0,001
Verglasungsanteil	niedrig	142	1	-	-
	hoch	483	1,06	0,40 - 2,82	0,913

Freiheitsgrade: 13
 LR-Test: $p < 0,001$
 Nagelkerkes Pseudo-R²: 0,36
 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,663$
 Klassifikationstabelle: 1,3 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen bei freier Lüftung (Modell 7a), adjustiert auf Alter, Geschlecht, Bekleidungs-dämmung, Metabolismus, operative Temperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte.

Variable		n	Variablen		Wald-Test
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	390	1	-	-
	vorhanden	74	3,06	1,57 - 5,98	0,001
akustische Güte	hoch/ mittel	350	1	-	-
	niedrig	114	1,73	0,91 - 3,28	0,093
olfaktorische Güte	hoch/ mittel	410	1	-	-
	niedrig	54	2,10	0,99 - 4,48	0,054
Temperaturschwankung	nicht vorhanden	376	1	-	-
	vorhanden	88	1,21	0,61 - 2,40	0,592
Freiheitsgrade: 11 LR-Test: $p < 0,001$ Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,15 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,925$ Klassifikationstabelle: -0,4 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Modellkennwerte für die Chance sich unbehaglich warm zu fühlen bei mechanischer Lüftung (Modell 8a), adjustiert auf Alter, Geschlecht, Bekleidungs-dämmung, Metabolismus, operative Temperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte.

Variable		n	Variablen		Wald-Test
			Odds Ratio*	95% Vertrauensintervall	p
Überempfindlichkeit gegen Wärme	nicht vorhanden	494	1	-	-
	vorhanden	131	2,92	1,84 - 4,63	< 0,001
Raumklima gesundheitsabträglich	nein	226	1	-	-
	ja	399	1,95	1,20 - 3,17	0,007
akustische Güte	hoch	60	1	-	-
	niedrig	212	4,23	1,53 - 11,64	0,005
	mittel	353	3,50	1,33 - 9,22	0,011
Luftzustand	frisch	183	1	-	-
	verbraucht und trocken	442	2,54	1,45 - 4,45	0,001
Blendung	keine	208	1	-	-
	starke	157	1,45	0,84 - 2,48	0,179
	mittlere	260	1,09	0,67 - 1,78	0,727
Modifizierter Sonneneintragskennwert	niedrig	312	1	-	-
	mittel	170	1,14	0,60 - 2,14	0,693
	hoch	143	0,96	0,50 - 1,82	0,892
normierter Freiheitsgrad	1	132	1	-	-
	0	317	0,79	0,43 - 1,44	0,438
	0,5	176	0,49	0,25 - 0,95	0,035
Freiheitsgrade: 19 LR-Test: $p < 0,001$ Nagelkerkes Pseudo-R ² : 0,32 Hosmer-Lemeshow-Test (df = 8): $p = 0,719$ Klassifikationstabelle: 7,7 % *Fett markiert sind signifikante Odds Ratios mit Vertrauensintervall und Irrtumswahrscheinlichkeit					

Anhang 13 Beobachtete und vorhergesagte Raumtemperaturen

Statistische Kenngrößen für den Vergleich der Vorhersagegüte verschiedener Methoden mit dem t-Test für gepaarte Stichproben für frei belüftete Räume und Personen, die die Raumtemperatur als behaglich einstufen. Mess-* und Befragungswerte aus dem Untersuchungszeitpunkt 2.

Frei belüftete Räume und Personen, die die Raumtemperatur als behaglich einstufen		n	Mittelwert [°C]	Standardabweichung [K]	Differenz zwischen Soll- und Ist-Temperatur [K]		t	p	95% Vertrauensintervall der Differenz [K]	
					Mittelwert	Standardabweichung				
gemessen*	operative Temperatur	439	22,413	1,315	-	-	-	-	-	-
optimal, berechnet	ISO 7730		21,439	1,063	-0,974	1,690	-12,07	<0,001	-1,13	-0,82
	Mayer		23,502	0,870	1,089	1,581	14,43	<0,001	0,94	1,24
gemessen*	operative Temperatur	488	22,416	1,308	-	-	-	-	-	-
optimal, berechnet	ASHRAE		22,402	0,590	-0,014	1,467	-0,21	0,838	-0,14	0,12
	Niederländische Richtlinie		21,748	0,504	-0,667	1,279	-11,53	<0,001	-0,78	-0,55

* Die operative Temperatur wurde nicht gemessen. Jedoch wurde sie aus den Messwerten von Raumlufttemperatur und Strahlungstemperatur nach Abschnitt 4.3 berechnet.

Statistische Kenngrößen für den Vergleich der Vorhersagegüte verschiedener Methoden mit dem t-Test für gepaarte Stichproben für mechanisch belüftete Räume und Personen, die die Raumtemperatur als behaglich einstufen. Mess-* und Befragungswerte aus Untersuchungszeitpunkt 2.

Mechanisch belüftete Räume und Personen, die die Raumtemperatur als behaglich einstufen		n	Mittelwert [°C]	Standardabweichung [K]	Differenz zwischen Soll- und Ist-Temperatur [K]		t	p	95% Vertrauensintervall der Differenz [K]	
					Mittelwert	Standardabweichung				
gemessen*	operative Temperatur	431	23,695	1,378	-	-	-	-	-	-
optimal, berechnet	ISO 7730		21,963	1,773	-1,733	1,700	-21,16	<0,001	-1,89	-1,57
	Mayer		23,825	1,464	0,130	1,526	1,77	0,077	-0,01	0,27
gemessen*	operative Temperatur	498	23,626	1,366	-	-	-	-	-	-
optimal, berechnet	ASHRAE		23,035	0,286	-0,591	1,202	-10,98	<0,001	-0,70	-0,49
	Niederländische Richtlinie		22,686	0,829	-0,941	1,075	-19,52	<0,001	-1,04	-0,85

* Die operative Temperatur wurde nicht gemessen. Jedoch wurde sie aus den Messwerten von Raumlufttemperatur und Strahlungstemperatur nach Abschnitt 4.3 berechnet.

Anhang 14 Überprüfung der Temperaturbandbreite

Statistische Kenngrößen für den Test auf Varianzhomogenität zwischen der gemessenen operativen Temperatur in frei und mechanisch belüfteten Gebäuden für Personen, die die Raumtemperatur als behaglich einstufen. Mess- und Befragungswerte aus Untersuchungszeitpunkt 2.

Art der Belüftung	n	Mittelwert [°C]	Standardabweichung [K]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
frei	488	22,416	1,308	16,0	26,1
mechanisch	498	23,027	1,366	19,9	27,6
Levene-Statistik: 0,510 $p = 0,475$ (Varianzen sind nicht verschieden.)					

Statistische Kenngrößen für den Test auf Varianzhomogenität und Gleichheit der Mittelwerte zwischen der gemessenen operativen Temperatur von Personen, die die Raumtemperatur als behaglich bzw. unbehaglich einstufen in frei belüfteten Gebäuden. Mess- und Befragungswerte aus Untersuchungszeitpunkt 2.

Raumtemperatur bei freier Lüftung	n	Mittelwert [°C]	Standardabweichung [K]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
behaglich	488	22,416	1,308	16,0	26,1
unbehaglich	114	22,239	1,353	18,6	25,5
Levene-Statistik: 0,358 $p = 0,550$ (Varianzen sind nicht verschieden.)					
F-Statistik: 1,67 $p = 0,197$ (Mittelwerte sind nicht verschieden.)					

Statistische Kenngrößen für den Test auf Varianzhomogenität und Gleichheit der Mittelwerte zwischen der gemessenen operativen Temperatur von Personen, die die Raumtemperatur als behaglich bzw. unbehaglich einstufen in mechanisch belüfteten Gebäuden. Mess- und Befragungswerte aus Untersuchungszeitpunkt 2.

Raumtemperatur bei mechanischer Lüftung	n	Mittelwert [°C]	Standardabweichung [K]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
behaglich	498	23,626	1,366	19,9	27,6
unbehaglich	313	24,130	1,313	19,5	28,7
Levene-Statistik: 0,001 $p = 0,975$ (Varianzen sind nicht verschieden.)					
F-Statistik: 27,01 $p < 0,001$ (Mittelwerte sind verschieden.)					

Lebenslauf

Persönliche Angaben	Name	Runa Tabea Hellwig
	Geboren	4. März 1970 in Berlin
Ausbildung	1976 - 1986	Polytechnische Oberschule, Berlin
	1986 - 1988	Erweiterte Polytechnische Oberschule, Berlin, Abitur
	1989 - 1990	Studium Bauingenieurwesen, Hochschule für Bauwesen, Cottbus
	1990 - 1992	Grundstudium Bauingenieurwesen, Technische Universität Berlin, Vordiplom
	1992 - 1995	Hauptstudium Bauingenieurwesen, Universität Stuttgart, Vertiefung Konstruktiver Ingenieurbau, Entwerfen und Bauphysik, Diplom
Berufliche Tätigkeit	1988 - 1989	Studienvorbereitendes Praktikum im Ingenieurbereich Bau des VEB Wasserversorgung und Abwasserbehandlung Berlin
	1990, 1992	Industriepraktika bei den Firmen Stahlbau-technik Neckar in Altbach und Wagner in Kirchheim/Teck: Stahlbau bzw. Massivbau (3 Monate)
	1994 - 1995	Studentische Hilfskraft am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart
	1995 - 1998	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Bauphysik Stuttgart, Abteilung Wärmetechnik
	1998	Gastwissenschaftlerin an der Norwegian University of Science and Technology, Department of Building Technology (6 Monate)
	1998 - 1999	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Bauphysik Stuttgart, Abteilung Wärmetechnik
	1999 - 2002	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kassel
	seit 2002	Lehrbeauftragte im weiterbildenden Studiengang Energie und Umwelt an der Universität Kassel
	2002 - 2005	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik der Technischen Universität München
	seit 2004	Wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe Raumklimatologie am Universitätsklinikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena

