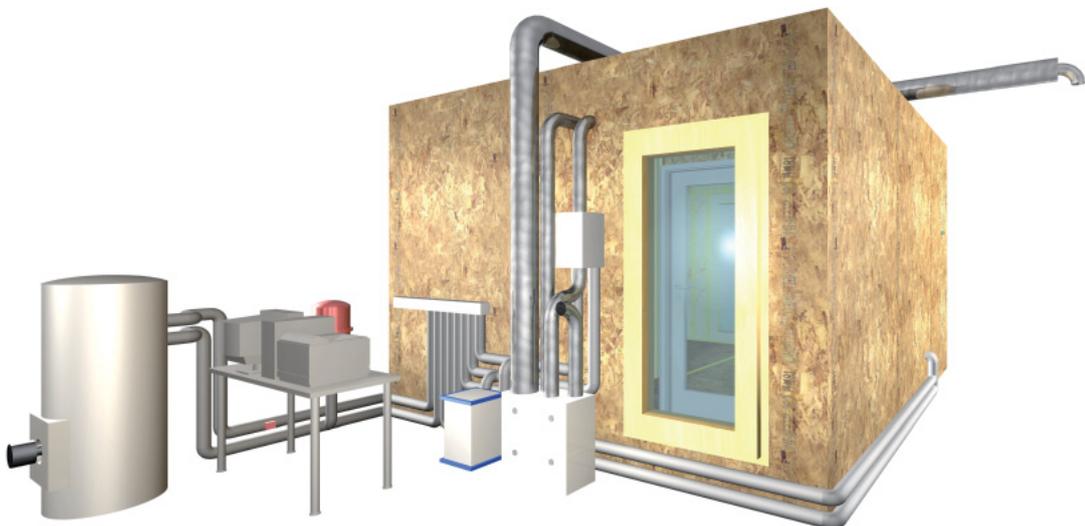


Thermische Behaglichkeit in Passivhäusern im Winter

Messtechnische Untersuchungen an einem
Modellraum zur Bewertung von Heiz- und
Lüftungssystemen

Dissertation

Wolfgang Nowak



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

Thermische Behaglichkeit in Passivhäusern im Winter

Messtechnische Untersuchungen an einem Modellraum zur
Bewertung von Heiz- und Lüftungssystemen

Dipl.-Ing. Univ. Wolfgang Nowak

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. Hermann Kaufmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Die Dissertation wurde am 23.08.2007 bei der Technischen
Universität München eingereicht und durch die Fakultät
für Architektur am 11.11.2007 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract	.....	6
1 Einleitung	.....	8
2 Abgrenzung und Zielsetzung	.....	10
2.1 Zielsetzung dieser Arbeit	.....	10
2.2 Stand der Forschung	.....	10
3 Grundlagen	.....	14
3.1 Energetische Gebäudestandards	.....	14
3.1.1 Energetische Bilanzierung	.....	14
3.1.2 Einfluß der Luftdichtheit	.....	16
3.1.3 Wärmeerzeugung und -übergabe in Passivhäusern	.....	17
3.1.4 Heizsysteme in gebauten Passivhäusern	.....	18
3.2 Lüftung in Wohngebäuden	.....	20
3.2.1 Luftqualität	.....	20
3.2.2 Außenluftbedarf	.....	22
3.2.3 Lüftungsmethoden und -systeme	.....	23
3.2.3.1 Fensterlüftung	.....	23
3.2.3.2 Abluftanlagen	.....	24
3.2.3.3 Lüftungsanlagen mit Zu- und Abluft	.....	25
3.2.3.4 Dezentrale Lüftungsgeräte	.....	25
3.2.4 Anforderungen an Lüftungssysteme in Passivhäusern	.....	26
3.3 Thermische Behaglichkeit – Einflussfaktoren und Bewertungsmodelle	.....	28
3.3.1 Raumklimatische Parameter	.....	28
3.3.1.1 Temperatur von Raumluft und Umschließungsflächen	.....	28
3.3.1.2 Luftfeuchte	.....	29
3.3.1.3 Luftgeschwindigkeit und Turbulenz	.....	29
3.3.2 Individuelle Parameter	.....	30
3.3.2.1 Bekleidung	.....	30
3.3.2.2 Aktivität	.....	31
3.3.2.3 Sonstige individuelle Parameter	.....	31
3.3.3 Behaglichkeitsbewertung nach DIN EN ISO 7730	.....	32
3.3.3.1 Vorausgesagtes mittleres Votum - PMV	.....	32
3.3.3.2 Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener - PPD	.....	33
3.3.4 Lokales thermisches Unbehagen	.....	34
3.3.4.1 Beeinträchtigung durch Zugluft	.....	34
3.3.4.2 Strahlungstemperaturasymmetrie	.....	35
3.3.4.3 Vertikaler Temperaturgradient	.....	36
3.3.4.4 Fußbodentemperatur	.....	37
4 Versuchsaufbau	.....	38
4.1 Versuchshalle und Testraum	.....	38

4.1.1	Geometrie und Abmessung	.....38
4.1.2	Konstruktiver Aufbau	.....38
4.1.3	Luftdichtheit	.....39
4.2	Heiz- und Lüftungstechnik	.....41
4.3	Messtechnik	.....45
4.3.1	Beschreibung des Messaufbaus	.....45
4.3.2	Sensorik und Messdatenerfassung	.....47
5	Versuchsdurchführung	.....48
5.1	Festlegung der Parametervariationen	.....48
5.2	Versuchsablauf	.....48
5.3	Umfang der Versuche	.....51
6	Darstellung der Versuchsergebnisse und ihre Bewertung	.....54
6.1	Einfluß der Außentemperatur	.....54
6.2	Einfluß von Art und Ort der Wärmeübergabe	.....58
6.3	Einfluß der Zuluftmenge	.....61
6.4	Einfluß der Zulufttemperatur	.....62
6.5	Einfluß des Zuluftventils	.....65
7	Parameterbewertung	.....68
7.1	Sensitivitätsuntersuchung des PMV-Modells	.....68
7.2	Bewertung der Parameter mittels PMV-Modell	.....74
7.2.1	Einfluß der Außentemperatur	.....74
7.2.2	Einfluß von Art und Ort der Wärmeübergabe	.....75
7.2.3	Einfluß der Zuluftmenge	.....75
7.2.4	Einfluß der Zulufttemperatur	.....76
7.2.5	Einfluß des Zuluftventils	.....77
7.3	Sensitivitätsuntersuchung des Zugluftrisikos DR	.....78
7.4	Bewertung der Parameter mit dem Zugluftrisiko DR	.....81
7.4.1	Einfluß der Außentemperatur	.....81
7.4.2	Einfluß von Art und Ort der Wärmeübergabe	.....82
7.4.3	Einfluß der Zuluftmenge	.....83
7.4.4	Einfluß der Zulufttemperatur	.....84
7.4.5	Einfluß des Zuluftventils	.....85
8	Zusammenfassung	.....86
9	Literatur	.....90
	Anhang	.....A1
	Dokumentation ausgewählter Versuche	.....A2-A56

Kurzfassung / Abstract

Passivhäuser benötigen aufgrund des sehr guten Dämmstandards und der kontrollierten Lüftung mit Wärmerückgewinnung kein konventionelles Heizsystem mehr. Im Winter betragen die Heizlasten unter Auslegungsbedingungen maximal noch 10 Watt je Quadratmeter Energiebezugsfläche. Zielsetzung bei der Planung eines Passivhauses ist die Deckung dieser Heizlast mit einem möglichst einfachen Wärmevertei- und Wärmeübergabesystem bei Gewährleistung einer maximalen thermischen Behaglichkeit. Die entscheidende Fragestellung ist dabei, welcher Zusammenhang zwischen der Wärmeübergabe und der Zuluft-einbringung besteht und welche Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit daraus resultieren.

Dieser Zusammenhang zwischen thermischer Behaglichkeit und der Anordnung von Heizflächen sowie Lüftungselementen wird in der Literatur bisher nur in Untersuchungen beschrieben, die bei wesentlich schlechteren Baustandards als dem Passivhausstandard durchgeführt wurden.

In dieser Arbeit werden anhand eines Modellraums mit einer Grundfläche von etwa 15 Quadratmetern und einer Raumhöhe von 2,50 m die Parameter der thermischen Behaglichkeit experimentell ermittelt. Mit Hilfe einer zweiachsig verfahrbaren Messvorrichtung mit jeweils fünf über die Raumhöhe verteilten Anemometern und Temperatursensoren werden je Versuchsreihe die Luftgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen an 200 Raumpunkten gemessen. Die Fassade zwischen dem Modellraum und dem dahinter liegenden, künstlichen kalten Außenraum erfüllt den Passivhaus-Standard. Die Temperatur in dem Außenraum kann bis -22°C abgesenkt werden.

Insgesamt werden über einhundert Messungen bei unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt. Variiert werden dabei die Außentemperatur an der Fassade, der Ort und die Art der Wärmeübergabe (Heizkörper neben der Fassade, an der Rückwand und Zuluftheizung), der Luftvolumenstrom, die Zulufttemperatur sowie die Bauart des Zuluftventils.

Die Auswertung der Messergebnisse und eine Sensitivitätsuntersuchung des PMV-Modells zeigen, dass die Einflüsse von Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur sowie Strahlungstemperatur bei niedrigen Außentemperaturen auf den rechnerischen Anteil Unzufriedener PPD bei sehr guten Gebäudedämmstandards äußerst gering sind. Wesentlich signifikanter wirken sich die nicht von den Raumklimaparametern abhängigen Faktoren Bekleidung und Aktivität aus. Die Unterschiede des Zugluftrisikos DR betragen bei den untersuchten Varianten ebenso nur wenige Prozentpunkte. Weiterhin wird aufgezeigt, dass das PMV-Modell zur Differenzierung der thermischen Behaglichkeit in Passivhäusern nur bedingt geeignet ist.

Passive houses need no more conventional heating system because of the very good insulation standard and the controlled ventilation with heat recovery. In the winter the heating loads under design criteria amount to maximally 10 Watts per square meter of energy reference area. When planning of a passive house the objective is the covering of this heating load with an as simple heat distribution and heat delivery system as possible during guarantee of a maximum thermal comfort. The crucial question is which connection exists between the heat delivery and the bringing in of the supply air and which effects result from it on the thermal comfort.

This connection between thermal comfort and the arrangement of heating surfaces as well as ventilation elements becomes described in the literature so far only in investigations which were accomplished with substantially worse building standards than the passive house standard.

In this thesis on the basis of a model room with a ground area by approximately 15 square meters and a room height of 2.50 meters the parameters of the thermal comfort are experimentally determined. With the help of a measuring device which is displaceable biaxial with in each case five anemometers and temperature sensors distributed over the room height for each test series air velocities and the air temperatures are detected on 200 space points. The front between the model room and the artificial cold outside space behind it fulfills the passive house standard. The temperature in the outside space can be lowered to -22°C .

All in all more than one hundred measurements with different basic conditions are accomplished. Thereby the outside temperature at the front, the place and the kind of the heat delivery (heating element beside the front, at the rear wall and supply air heating), the volumetric air flow, the supply air temperature as well as the design of the supply air valve are varied.

The evaluation of the results of measurement and a sensitivity investigation of the PMV model show that the influences of air speed, air temperature as well as radiation temperature are extremely small at low outside temperatures on the predicted percentage of dissatisfied PPD with this very good building insulation standard. Substantially more significant is the impact of the factors clothing and activity which do not depend on the room climate parameters. The differences of the draft risk DR amount to just only a few per cent between the examined variant. Further it is pointed out that the PMV model is only conditionally suitable for the differentiation of the thermal comfort in passive houses.

1 Einleitung

Ab etwa 1980 wurde weltweit mehr Erdöl verbraucht, als durch neue Funde von Lagerstätten hinzugekommen ist. Spätestens seit diesem Zeitpunkt ist offensichtlich, dass der Verbrauch von Energie unter dem Aspekt der Endlichkeit nicht mehr wie bisher weitergeführt werden kann.

Erdölförderung und Neufunde weltweit [Gt]

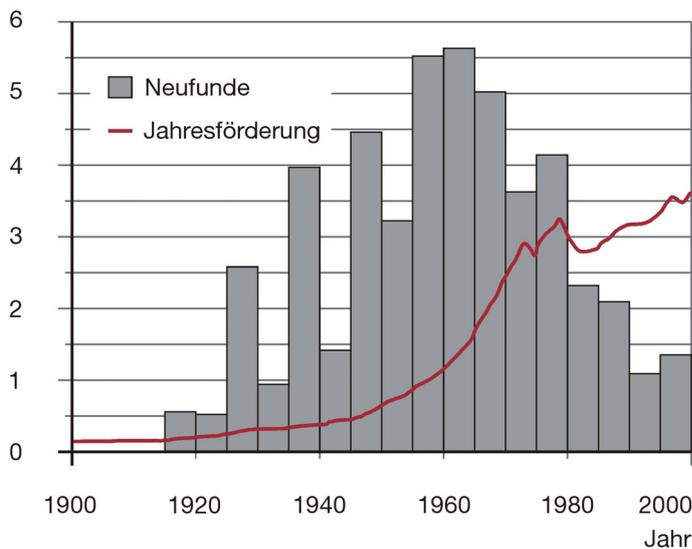
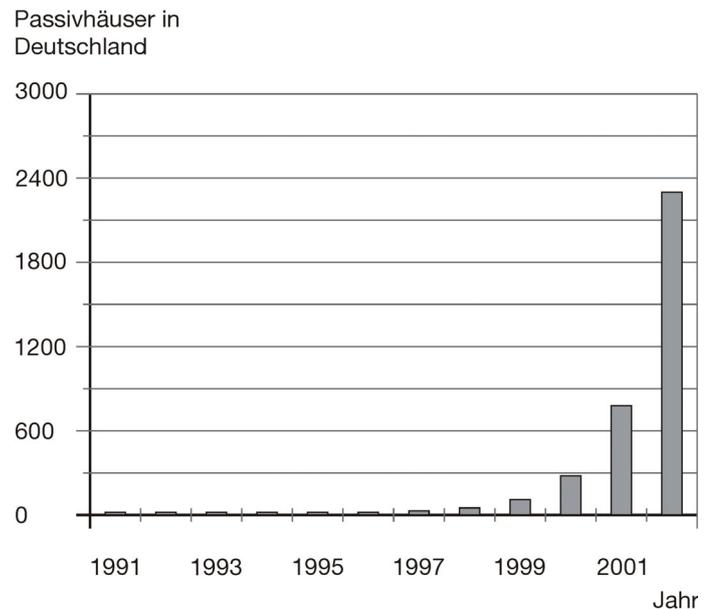


Abb. 1-1: Gegenüberstellung des weltweiten, jährlichen Erdölverbrauchs und Neufunden [Gerling 2005].

Seitdem wurden ganzheitliche Energieeffizienz-Szenarien entwickelt, die eine langfristige Perspektive der Energienutzung aufzeigen. Beispielhaft hierfür ist die in der Schweiz entstandene Vision einer „2000W-Gesellschaft“. Im Durchschnitt stehen heute jedem Mitteleuropäer permanent 6000 W an Energiedienstleistungen zur Verfügung, global sind es 2000 W. Diese 2000 W je Einwohner entsprechen bei uns dem Pro-Kopf-Energieverbrauch von 1960. Ziel des Modells einer 2000W-Gesellschaft ist nun die Verringerung des momentanen Energieverbrauchs um zwei Drittel auf den globalen Durchschnittswert bei gleichem Lebensstandard und ohne Komforteinbußen. Langfristig soll dann der Energiebedarf nur noch zu einem Viertel über fossile Energieträger abgedeckt werden. Die Bereitstellung des verbleibenden Rests wird dann regenerativ erfolgen [Spreng 2001]. Ähnliche erforderliche Effizienzsteigerungen beschreiben Weizsäcker et al. in ihrem Buch „Faktor 4. Doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch“ [Weizsäcker 1999]. Unter der Annahme, dass sich der weltweite Energieverbrauch bis zum Jahr 2050 verdoppeln wird, bedarf es einer durchschnittlichen Effizienzsteigerung sämtlicher Energiedienstleistungen um den Faktor vier, um den Ressourcenverbrauch und damit die Umweltbelastungen zu halbieren.

In Deutschland wird etwa ein Drittel des Energieverbrauchs für den Betrieb von Gebäuden, insbesondere deren Beheizung aufgewendet. Um die angesprochenen Verbrauchsziele zu erreichen, ist deshalb sowohl bei Neubauten als auch im Gebäudebestand eine erhebliche Verringerung des Energieverbrauchs erforderlich. Stand der Technik sind hier die Passivhäuser, die nur noch einen um mehr als den Faktor 10 verringerten Heizwärmebedarf gegenüber dem durchschnittlichen Gebäudebestand benötigen.

Abb. 1-2:
Entwicklung der Zahl der
gebauten Passivhäuser in
Deutschland (fertig gestellte
Wohneinheiten oder 100 m²) [IG
Passivhaus 2003].



Der erste Passivhaus-Prototyp entstand 1991 in Darmstadt-Kranichstein. Bereits wenige Jahre später hatte sich dieser Baustandard etabliert und verzeichnete deutliche Zuwachsraten. Vom Status des „Formel1-Rennwagens“ der Gebäudestandards entwickelte sich das Passivhaus zu einem etablierten und zu vernünftigen Kosten herstellbaren Standard. Diese Entwicklung wird in Abb. 1-2 verdeutlicht. Ende 2006 waren in Deutschland bereits mehr als 6000 Gebäude bzw. Wohneinheiten in Passivhausstandard fertig gestellt. Es wird angenommen, dass der Anteil der Passivhäuser sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungen weiter zunehmen wird [Bühning 2004].

2 Abgrenzung und Zielsetzung

2.1 Zielsetzung dieser Arbeit

Aufgrund der sehr guten baulichen und anlagentechnischen Qualität betragen die erforderlichen Heizleistungen in Passivhäusern nur noch maximal 10 W/m^2 im Auslegungsfall. Diese minimale Leistungsanforderung erfordert kein konventionelles Wärmeversorgungs- und -verteilsystem mehr. Einerseits ist die Positionierung von Heizflächen an der Fassade, insbesondere unter den Fensterflächen, im Normalfall nicht mehr erforderlich. Andererseits kann der verbleibende Wärmebedarf über eine Erwärmung der Zuluft ohne Erhöhung des hygienisch erforderlichen Luftwechsels gedeckt werden. Im Zusammenspiel mit der vorhandenen Wohnungslüftungsanlage mit Zu- und Abluft sowie effizienter Wärmerückgewinnung ergeben sich daraus neue Möglichkeiten für die Anordnung der Heiz- und Lüftungskomponenten.

Im Rahmen dieser Arbeit werden messtechnische Untersuchungen zur thermischen Behaglichkeit in Passivhaus-Wohnräumen durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgen in einem beispielhaften Testraum, dessen umgrenzenden Bauteile Passivhausqualität besitzen und der in seinen Abmessungen einem durchschnittlichen Wohnraum entspricht. Folgende Fragestellungen sollten durch Variation und Untersuchung der Einflussparameter auf die thermische Behaglichkeit beantwortet werden:

- Wie ändern sich die Behaglichkeitsindices in Abhängigkeit von Außentemperatur, Luftwechsel, Art und Ort der Wärmeübergabe, Zulufttemperatur und Bauart des Zuluftventils?
- Gibt es Zustände eingeschränkter Behaglichkeit? Wenn ja, ab wann treten sie auf?
- Welchen Einfluß haben unterschiedliche Anlagenvarianten auf die thermische Behaglichkeit?
- Gibt es lokale Behaglichkeitseinschränkungen?

Zur Vollständigkeit sei hier noch erwähnt, dass eine Untersuchung und Bewertung der Lüftungseffektivität bei den verschiedenen Anlagenkombinationen nicht durchgeführt wurde.

2.2 Stand der Forschung

Die Bewertung thermischer Behaglichkeit bei einem gemäßigten Umgebungsklima in Räumen und Gebäuden ist in der internationalen Norm ISO 7730 beschrieben. Die Kriterien dieser Norm beruhen im Wesentlichen auf der subjektiven Bewertung von Probanden bei unterschiedlichen Umgebungsklimata in einem Versuchsraum [Fanger 1970]. Unterschieden wird dabei zwi-

schen der Ausgeglichenheit der Wärmebilanz am menschlichen Körper als Ganzes und den lokal begrenzten Unbehaglichkeiten wie Zugluft und asymmetrische Entwärmung. Die Ausgabe [DIN EN ISO 7730: 2006] regelt national die Bewertung der thermischen Behaglichkeit. Mindestanforderungen an Instrumente zur Messung physikalischer Größen zur Beschreibung des Umgebungsklimas sowie Verfahren zur Messung dieser Größen sind in [DIN EN ISO 7726] festgelegt.

Vorgaben und Empfehlungen zur Auslegung von Raumheizflächen für Warmwasserheizungen in Aufenthaltsräumen sind in der VDI-Richtlinie 6030 enthalten. Diese Richtlinie erhebt den Anspruch, über die Deckung der Normheizlast hinaus auch die thermische Behaglichkeit im Aufenthaltsbereich zu gewährleisten. Insbesondere das Gegenwirken der Raumheizflächen zu abfallender Kaltluft und Strahlungstemperaturasymmetrie in Fassaden- bzw. Fensternähe wird betont [VDI 6030].

Einige experimentelle Behaglichkeitsuntersuchungen in Klimabilaboren unterschiedlicher Forschungsinstitute (Dänische Technische Universität, Universität Lüttich und belgisches Bauforschungsinstitut BRI) wurden in [Olesen 1998] zusammengestellt und bewertet. Die Testräume hatten Fenster mit U-Werten von 2,9 und 1,5 W/m²K und Außenwände von 0,35 bis 1,4 W/m²K. Die Dämmqualität der Außenbauteile bei diesen Untersuchungen ist aus heutiger Sicht als unterdurchschnittlich und größtenteils nicht einmal mehr den aktuellen Anforderungen der [EnEV 2004] konform anzusehen. Eine Übertragung der erzielten Ergebnisse auf den Passivhausstandard ist aus diesem Grund weder sinnvoll noch möglich.

In weiteren Veröffentlichungen von Olesen wird der Frage nachgegangen, ob „kalte“ Fensterflächen bei heutigem Baustandard noch ein Problem hinsichtlich thermischer Behaglichkeit für die Gebäudenutzer darstellen [Olesen 2002], [Olesen 2003]. Zusammenfassend wird die Aussage getroffen, dass bei einem mittleren Raumwärmebedarf unter 40 W/m², einer Fensterqualität mit $U_w < 1,5$ W/m²K und Fensterhöhen bis 3,00 m keine Probleme hinsichtlich Kaltluftabfall und Asymmetrie der Strahlungstemperaturen auftreten. Dieser Aussage stehen Berechnungsergebnisse in [NBM 1999] gegenüber, dass bereits bei Fensterhöhen von 1,20 m und einem U_w -Wert von 1,20 W/m²K Behaglichkeitseinbußen auftreten. Diesem Berechnungsergebnis liegt die Annahme einer Außentemperatur von -10 °C zugrunde.

Mehrere publizierte Behaglichkeitsuntersuchungen wurden mit Programmen zur Simulation von Raumluftströmungen durchgeführt, teilweise ergänzt mit selbst entwickelten Softwarekomponenten. So wurde in [Meyer 2004] ein als Behaglichkeitsatlas bezeichneter Katalog erstellt, in dem eine Auswahl typischer Wohnräume mit unterschiedlichen Dämmstandards, Fassadengestaltungen und technischen Ausstattungen unter identischen Randbedingungen auf thermische Behaglichkeit untersucht und vergleichend bewertet wurde. Die Simulationen wurden dabei einheitlich nur für eine Außentemperatur von

-3,4 °C durchgeführt. Zwar wurde auch eine Raumvariante mit sehr guter Wärmedämmung betrachtet, die baulichen und anlagentechnischen Randbedingungen entsprachen aber nicht den Anforderungen an Passivhäuser. Auch wurden die Berechnungsergebnisse nicht durch Messungen validiert.

In [Richter 2003] werden verschiedene Baustandards vom Altbau bis zum Passivhaus hinsichtlich thermischer Behaglichkeit mit numerischen Strömungssimulationen untersucht. Die betrachteten Parameter sind dabei die Anordnung von Heizkörpern, unterschiedliche Luftwechsel sowie die Art der Lüftungsanlage (Abluftanlage mit Außenluftdurchlässen, Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung). Für den Passivhausstandard wurden dabei nur zwei Luftheizungssysteme mit einer Zuluft einbringung über der Türe und im Bodenbereich der Außenwand untersucht, sieht man von den im Passivhaus praktisch nicht vorkommenden Systemen mit Luftwechsel $n = 0 \text{ h}^{-1}$ oder einer Zuluftführung über Außenwanddurchlässe ab. Für eine Optimierung der technischen Systeme in einem Passivhaus geben diese Untersuchungen keinen ausreichenden Aufschluss.

Ebenfalls mit Hilfe eines numerischen Strömungssimulationsprogramms wird in [Schwarz 2001] die Anordnung von Zu- und Abluftöffnungen in einem beispielhaften Wohnraum mit einer Fassade in Passivhausqualität untersucht. Neben den behaglichkeitsrelevanten Größen Zugluft, Kaltluftabfall und Temperaturverteilung liegt ein weiterer Schwerpunkt dieser Untersuchung bei der Betrachtung der Schadstoffverteilung und der Lüftungseffektivität im Raum. Aufgrund der im Modell angesetzten untypischen Raumhöhe von 3,80 m für einen Wohnraum sind die Ergebnisse nicht auf übliche Raumhöhen von etwa 2,50 m im Wohnungsbau übertragbar.

In einer Forschungsarbeit zu hochwärmedämmenden Fenstersystemen wurden wiederum mittels numerischer Strömungssimulation das thermische Raumklima und die Behaglichkeitskriterien untersucht. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Behaglichkeitsparameter bei mitteleuropäischem Außenklima im gesamten Aufenthaltsbereich eingehalten werden, wenn der U-Wert des eingebauten Fensters höchstens $0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ beträgt [Pfluger 2003]. Verschiedene Varianten der Wärmeübergabe wurden nicht untersucht.

Von Schnieders et al. wurden vergleichende messtechnische und numerische Untersuchungen zur thermischen Behaglichkeit in einem Reihenhaus-Wohnraum durchgeführt. Die Messung von Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten wurde bei einer Außentemperatur von 10 °C durchgeführt und entspricht damit sicherlich nicht dem winterlichen Extremfall. Die Messergebnisse, die eine gute Übereinstimmung mit der numerischen Simulation aufwiesen, bestätigten ein hohes Behaglichkeitsniveau [Schnieders 2002].

3 Grundlagen

3.1 Energetische Gebäudestandards

3.1.1 Energetische Bilanzierung

Die Grundidee nachhaltiger Gebäude liegt in der effizienten Energieausnutzung. Für die Definition dieser Gebäude ist zunächst der Heizwärmebedarf entscheidend. Während Einfamilienhäuser im Bestand einen durchschnittlichen Bedarf von etwa 250 kWh/m²a aufweisen, benötigen Passivhäuser nur noch maximal 15 kWh/m²a. Zu Forschungszwecken wurden sogar schon Null-Heizenergiehäuser und Null-Energiehäuser gebaut; wegen des hohen anlagentechnischen Aufwands und den damit verbundenen Investitionskosten besitzt dieser Gebäudestandard aber derzeit keine baupraktische Relevanz. In folgender Abbildung sind unterschiedliche bauliche Standards hinsichtlich Ihres Heizwärmebedarfs dargestellt. Je nach Gebäudetyp, baulicher Ausbildung und Anlagentechnik können diese Zahlenangaben variieren.

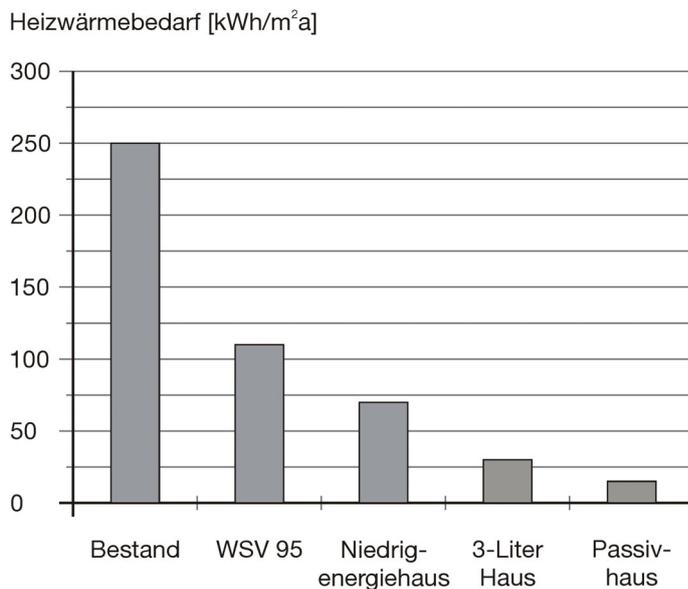
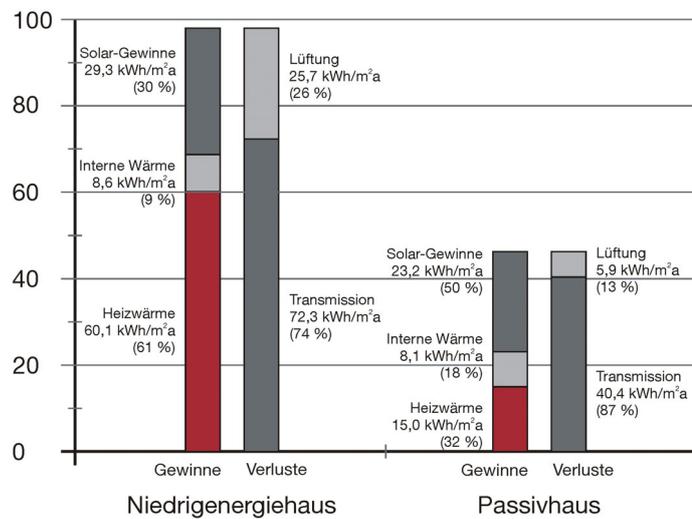


Abb. 3-1:
Heizwärmebedarf von Einfamilienhäusern unterschiedlicher baulicher Standards [Feist 1997], [EnEV 2004], [Kluttig 2001].

Der Heizwärmebedarf lässt sich anhand einer Bilanz von Wärmegewinnen und Wärmeverlusten über eine Heizperiode ermitteln. Die verbleibenden Wärmeverluste, die nicht über interne Gewinne und solare Gewinne gedeckt werden können, müssen durch Heizwärme ausgeglichen werden, die über das Heizsystem zugeführt wird. Mit abnehmendem Heizwärmebedarf ist der Energieumsatz insgesamt verringert, außerdem weist der Heizwärmeanteil einen zunehmend geringeren prozentualen Anteil an der Gesamtbilanz auf (Abb. 3-2).

Abb. 3-2: Energiebilanzen eines Niedrigenergiegebäudes und eines Passivhauses im Vergleich (berechnet mit [PHPP 2004]; Randbedingungen: Einfamilienhaus, Grundfläche 8m x 12m, EG + OG, Fensterflächenanteile N/O/S/W = 6%/15%/40%/15%).

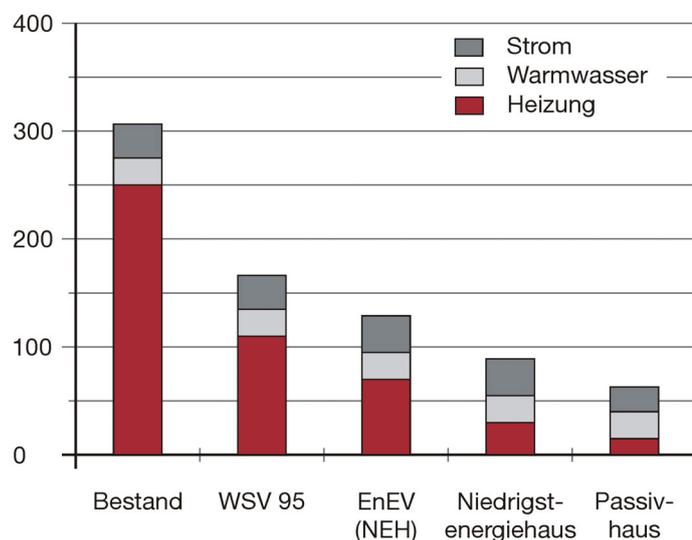
Jahres-Heizwärmebilanz
[kWh/m²a]



Wird der Heizwärmebedarf immer weiter reduziert, nimmt der Anteil des Energiebedarfs für Warmwasserbereitung, Anlagentechnik und Haushaltsstrom am gesamten Nutzenergiebedarf des Gebäudes zu.

Abb. 3-3: Zusammensetzung der Gesamtenergie-Kennwerte (Nutzenergie) verschiedener baulicher Standards [Feist 1997], [Eigene Berechnungen].

Gesamt-Nutzenergiebedarf
[kWh/m²a]



Die Betrachtung des Gesamtenergie-Kennwertes der Nutzenergie von Wohngebäuden bezieht auch den Energiebedarf für Haushaltsstrom, Anlagentechnik (z.B. Pumpen, Lüftung) und Warmwasserbereitung mit ein. Aus Abbildung 3-3 ist erkennbar, dass mit sinkendem Heizwärmebedarf der Gebäude diese Energieverbräuche eine immer größere Bedeutung bekommen. So ist beim Passivhausstandard der Heizwärmebedarf bereits geringer als der Bedarf an Warmwasser oder Haushaltsstrom.

Um die energetische Qualität eines Gebäudes und seiner Energieversorgung zu beurteilen, müssen auch die vorgelagerten Energieketten berücksichtigt werden. Dabei wird für jeden Energieträger der Aufwand an nicht erneuerbaren Energien für Gewinnung, Herstellung, Erzeugung, Transport usw. bewertet und auf die Nutzeneinheit bezogen. So lassen sich die Umwelt- und Klimaauswirkungen des Systems Gebäude angeben.

Primärenergiebedarf
[kWh/m²a]

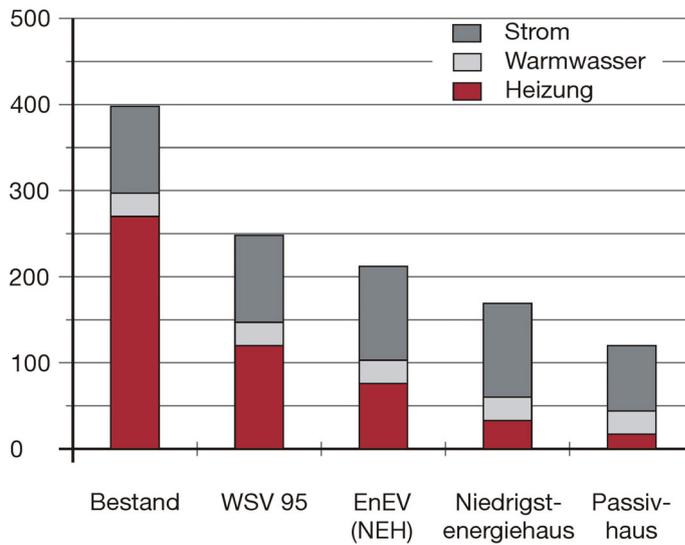


Abb. 3-4: Primärenergiebedarf unterschiedlicher baulicher Standards [Feist 1997], [Eigene Berechnungen].

3.1.2 Einfluß der Luftdichtheit

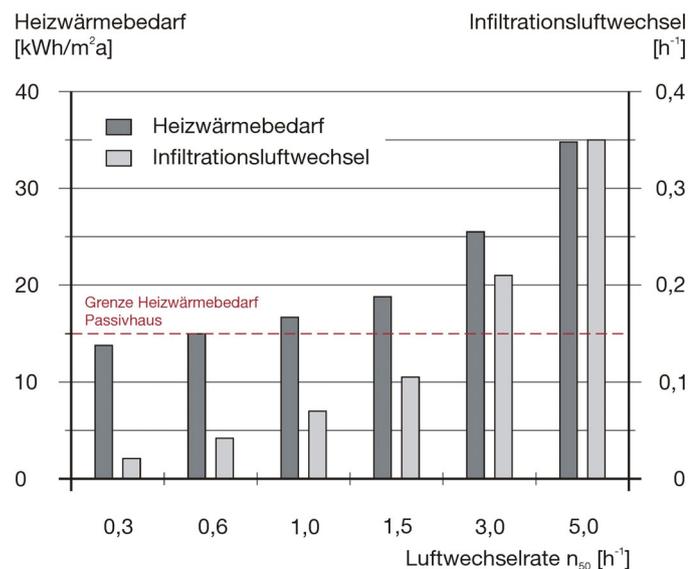
Anforderungen an die Luftdichtheit von Gebäuden werden in der [DIN 4108-7] und in der Energieeinsparverordnung [EnEV 2004] definiert. Als Grenzwert wird in der Regel ein volumenbezogener Leckagestrom n_{50} [h⁻¹], der den Luftwechsel bei einem Prüfdruck von Pa angibt, abhängig von der Art der Lüftung gefordert. Um den projektierten Heizwärmebedarf eines Gebäudes tatsächlich zu erzielen, sind Gebäude mit zunehmend besserem energetischem Standard auch zunehmend luftdichter auszuführen.

Gebäude mit natürlicher Lüftung (Fensterlüftung); (nach DIN 4108-7 und EnEV)	$n_{50} \leq 3,0$ [h ⁻¹]
Gebäude mit raumluftechnischen Anlagen (auch Abluftanlagen); (nach DIN 4108-7 und EnEV)	$n_{50} \leq 1,5$ [h ⁻¹]
Anzustreben insbesondere bei Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (DIN 4108-7)	$n_{50} \leq 1,0$ [h ⁻¹]
für Passivhäuser nach den Kriterien des Passivhausinstituts Darmstadt	$n_{50} \leq 0,6$ [h ⁻¹]

Abb. 3-5: Grenzwerte der Luftdichtheit in verschiedenen technischen Regelwerken [EnEV 2004], [DIN 4108-7].

Je niedriger der für die Gebäudebeheizung erforderliche Wärmebedarf ist, desto schwerwiegender wirkt sich eine fehlerhaft ausgeführte Luftdichtung aus. Den starken Anstieg des Heizwärmebedarfes eines Passivhauses bei zunehmend undichter Gebäudehülle zeigt nachfolgende Grafik. Ursächlich dafür ist der zunehmende Infiltrationsluftwechsel, der einen zusätzlichen Lüftungswärmebedarf – ohne Wärmerückgewinnung – bedeutet.

Abb. 3-6:
Heizwärmebedarf und Infiltrationsluftwechsel bei verschiedenen Luftwechselraten n_{50} [Eigene Berechnungen mit PHPP 2004].



Zur Überprüfung der tatsächlich erreichten Dichtheit eines Gebäudes bzw. einer Wohneinheit sind Differenzdruck-Verfahren (sog. Blower-Door-Tests) geeignet. Mit einem leistungsfähigen Gebläse, das in eine Öffnung der Hülle eingebaut wird, werden definierte Druckdifferenzen in der Regel zwischen 20 und 80 Pa erzeugt. Leckagen zeigen sich als messbarer Druckabfall. Die gewonnenen Messergebnisse werden auf einen Prüfdruck von 50 Pa bezogen und entweder als Leckageluftwechsel pro Raumvolumen (n_{50} -Wert [h^{-1}]) oder zur Beurteilung der Gebäudehülle als Luftvolumenstrom pro Hüllfläche (q_{50} -Wert [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$]) angegeben. Weiterhin werden noch der auf die Nettogrundfläche bezogene Leckagevolumenstrom NBV_{50} [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$] und der auf die Wohnfläche bezogene Leckagevolumenstrom w_{50} [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$] bei mittleren Raumhöhen kleiner 2,60 m verwendet.

3.1.3 Wärmeerzeugung und -übergabe in Passivhäusern

In durchschnittlichen Einfamilienhäusern dauert die Heizperiode etwa 8 Monate von Anfang September bis Ende April. Dagegen benötigt ein Passivhaus nur etwa gute 5 Monate Wärmezufuhr über ein Heizsystem.

Heizwärmebedarf je Monat
[kWh/m²]

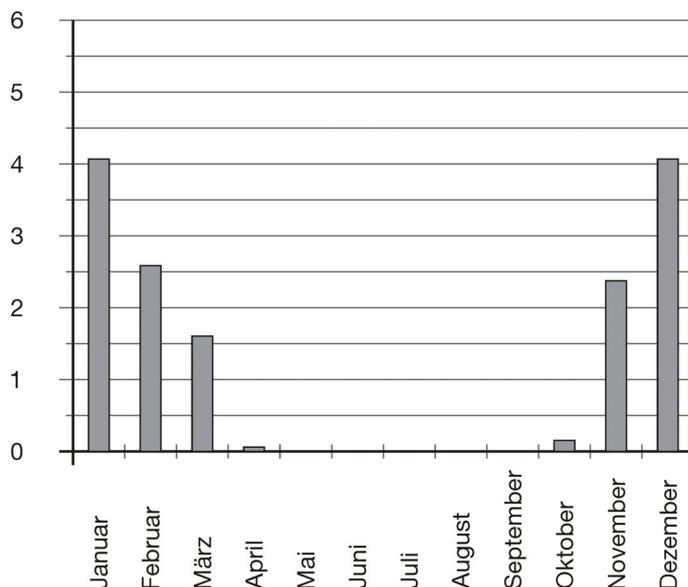


Abb. 3-7:
Spezifischer monatlicher Heizwärmebedarf eines Passivhauses [Feist 2000].

Ein Kriterium für den Passivhausstandard ist eine maximal erforderliche Heizleistung von 10 W/m² Wohnfläche. Die übliche Heizlastberechnung nach [DIN 4701] bzw. [DIN EN 12831] führt in Passivhäusern zu einer Überdimensionierung des Heizsystems. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen und messtechnischen Validierungen an gebauten Gebäuden wurde ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Auslegungheizlast von Passivhäusern entwickelt [Bisanz 1999]. Im wesentlichen unterscheidet es sich von den aktuellen Normen durch:

- die Berücksichtigung von Wärmegewinnen aus elektrischer Abwärme und Personenabwärme sowie solaren Gewinnen.
- die Berücksichtigung von Rückwärmegewinnen einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft.
- die Bilanzierung der Wärmeverlust- und Gewinnströme an zwei verschiedenen Auslegungstagen: einem mit tiefen Außentemperaturen und dafür hoher solarer Einstrahlung und einem mit moderaten Außentemperaturen und minimaler direkter Einstrahlung.
- die Aufteilung von Deutschland in zwölf Wetterregionen (analog der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes).
- eine korrigierte Außentemperatur, welche die großen Zeitkonstanten der Häuser berücksichtigt.

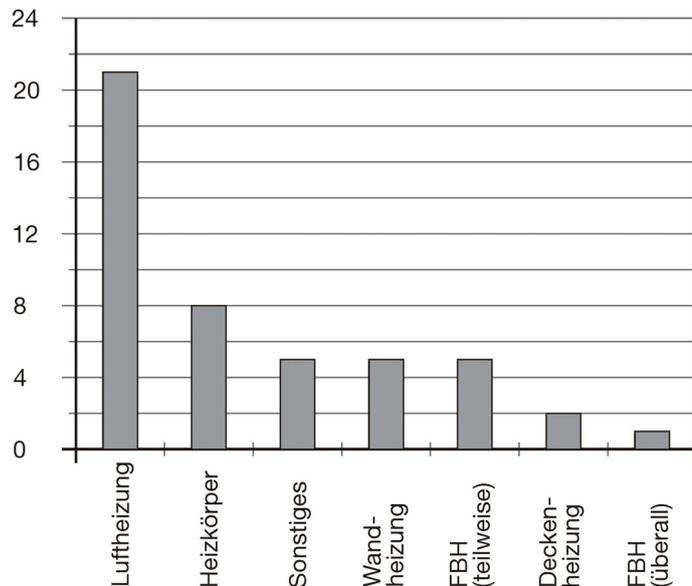
3.1.4 Heizsysteme in gebauten Passivhäusern

Im Rahmen einer Diplomarbeit [Rauscher 2003] zur Technikzufriedenheit in Passivhäusern wurden in Süddeutschland die Bewohner von 27 Einfamilienhäusern mit Passivhausstandard zu den eingesetzten Wärmeübergabesystemen befragt (siehe Abb.

3-8). Die meisten dieser Passivhäuser wurden über die Zuluft beheizt. Bemerkenswert ist aber, dass in vielen dieser Gebäude noch ein oder mehrere zusätzliche Wärmeübergabesysteme eingebaut waren.

Abb. 3-8: Wärmeübergabesysteme in 27 Einfamilienhäusern mit Passivhausstandard; statistische Erhebung [Rauscher 2003].

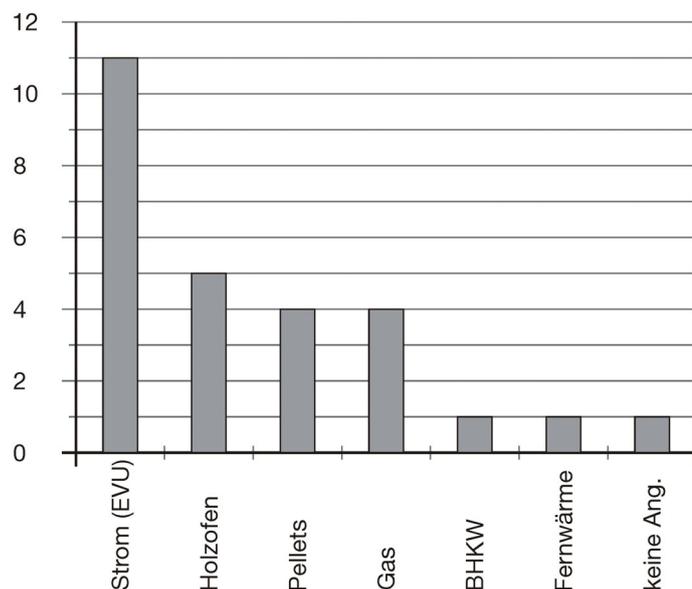
Anzahl aus Stichprobe 27 EFHs
[Mehrfachnennungen möglich]



In dieser Untersuchung wurden die Bewohner auch zu den eingesetzten Wärmeerzeugern befragt. Am häufigsten waren Elektrowärmepumpen eingebaut, ein Drittel der Häuser wurde mit Holz (Stückholz oder Pellets) beheizt (Abb. 3-9). In den elf mit Strom beheizten Passivhäusern wurde keine direktelektrische Beheizung ausgeführt.

Abb. 3-9: Energieversorgung von 27 Einfamilienhäusern mit Passivhausstandard; statistische Erhebung [Rauscher 2003].

Anzahl aus Stichprobe 27 EFHs
[Mehrfachnennungen möglich]



3.2 Lüftung in Wohngebäuden

Das Lüften von Räumen mit frischer Außenluft ist unverzichtbar für das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bewohner. Gleichzeitig aber ist der Austausch von Raumluft gegen Außenluft während der Heizzeit mit Energieverlusten verbunden. Daher ist es sinnvoll, den Luftwechsel auf das hygienisch erforderliche Maß zu reduzieren.

3.2.1 Luftqualität

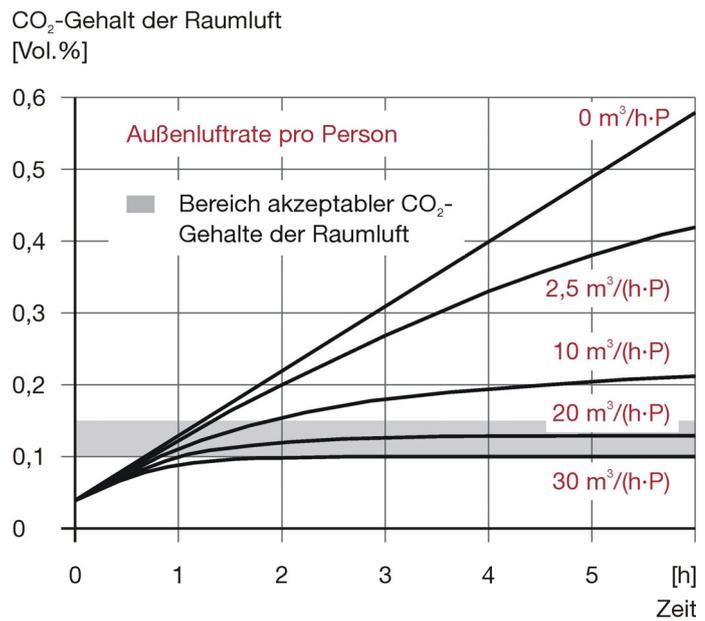
Bereits vor 150 Jahren [Pettenkofer 1858] wurde festgestellt, dass der CO_2 -Gehalt der Raumluft mit dem Grad der durch Personen verursachten Luftverschlechterung ansteigt. Als Grenzwert für eine gute Luftqualität wurde von Pettenkofer ein maximaler CO_2 -Gehalt von 0,10 % in der Raumluft von Aufenthaltsräumen empfohlen. Zum Vergleich dazu hat frische Außenluft einen CO_2 -Gehalt von etwa 0,035 %, in industrie- und verkehrsreichen Gebieten kann er 0,05 % und mehr betragen [Witthauer 1993]. Spätere Normen empfehlen, den CO_2 -Gehalt in der Raumluft nicht über 0,15 % ansteigen zu lassen [DIN 1946-2]. Mittels folgender Gleichung kann aus den CO_2 -Gehalten von Raum- und Außenluft die erforderliche personenbezogene Außenluftmenge errechnet werden.

$$q_{\text{AuL,P}} = \frac{\dot{q}_{\text{CO}_2,\text{P}}}{C_{\text{CO}_2,\text{RaL}} - C_{\text{CO}_2,\text{AuL}}}$$

mit:	$C_{\text{CO}_2,\text{AuL}}$	CO_2 -Gehalt der Außenluft [Vol. %]
	$C_{\text{CO}_2,\text{RaL}}$	CO_2 -Gehalt der Raumluft [Vol. %]
	$q_{\text{AuL,P}}$	erforderlicher Außenluftvolumenstrom je Person [$\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{P}$]
	$\dot{q}_{\text{CO}_2,\text{P}}$	CO_2 -Abgabe je Person [$\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{P}$]

Bei leichter, sitzender Tätigkeit produziert eine Person in der Stunde etwa 18 l/(h·P) CO_2 , im Schlafzustand reduziert sich die CO_2 -Abgabe auf ungefähr 12 l/(h·P). Zur Einhaltung des so genannten Pettenkofer-Maßstabes ist bei einer geringen körperlichen Aktivität eine Frischluftmenge von etwa 30 m^3/h pro Person erforderlich.

Abb. 3-10:
Zeitlicher Verlauf der Zunahme der CO₂-Konzentration in einem Wohnraum (Grundfläche 16 m², lichte Höhe 2,50 m, Luftvolumen 40 m³) in Abhängigkeit von der Außenluft rate [Ehrenfried 2000].

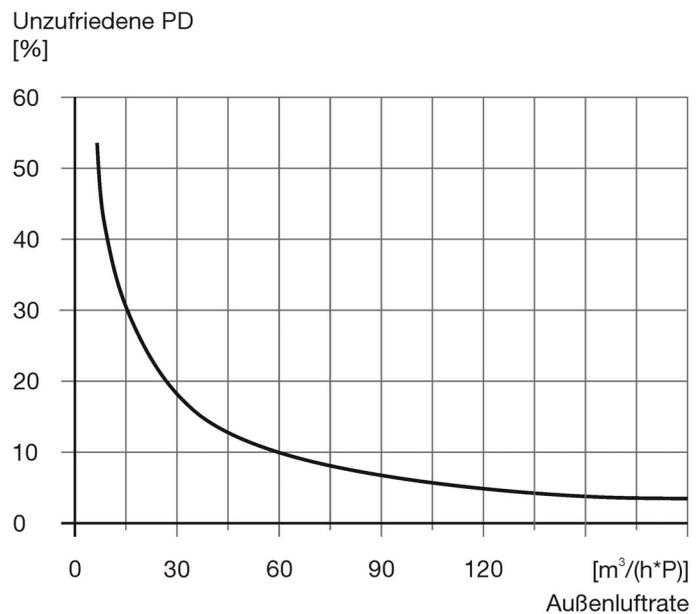


Von Fanger wurden die Indices [olf] und [decipol] benutzt, um die Luftqualität in Innenräumen zu beschreiben und zu quantifizieren [Fanger 1988]. In Versuchen wurde der Zusammenhang zwischen der Luftbelastung durch Personen, der Außenluft rate und der Zufriedenheit von Personen mit der Luftqualität ermittelt und durch folgende Formel dargestellt:

$$PD = 395 \cdot \exp(-1,83 \cdot q_{AuL,P}^{0,25})$$

Die nach dieser Formel erstellte Abb. 3-11 zeigt, dass eine hundertprozentige Zufriedenheit mit der Luftqualität nicht erreichbar ist. Selbst bei der vorher genannten Außenluft rate von 30 m³/h·Person werden demnach noch immer etwa 18 % mit der Luftqualität nicht zufrieden sein.

Abb. 3-11:
Zusammenhang von personenbezogener Außenluft rate und dem Anteil Unzufriedener. [Fanger 1988].



Die Entstehung von Wohnfeuchte, die durch Luftaustausch abtransportiert werden muss, wird durch die Anzahl und dem Wohnverhalten der Personen beeinflusst. Im Durchschnitt kann heute mit einer Feuchtelast von etwa 100 g/h je Bewohner sowohl durch ihn selbst als auch durch haushaltsübliche Tätigkeiten wie Waschen, Kochen und Wäschetrocknen gerechnet werden [Richter 1999]. Die Angaben zu den Feuchtelasten in der Literatur weisen dabei eine Bandbreite von 50 bis 280 g/h je Bewohner auf [Erhorn 1997]. In [Feist 2004] wird gezeigt, dass ein hygienisch erforderlicher Luftwechsel von 25 bis 30 m³/h je Person ausreicht, um diese Feuchtelast abzuführen und im Winter erhöhte Raumluftfeuchten mit der Gefahr von Bauschäden zu vermeiden.

3.2.2 Außenluftbedarf

Ist der erforderliche Grundluftwechsel einer Wohneinheit zu ermitteln, sind zwei Parameter zu betrachten: die personenbezogene Außenlufrate mit 30 m³/(h·Person) und ein auf die Wohnfläche bezogener Mindestluftwechsel von 1 m³/(m²·h). Der größere Wert von beiden wäre maßgebend für den Grundluftwechsel (Abb. 3-12). Gerade im Geschößwohnungsbau ist die Belegungsichte vorab meist nicht bekannt, ebenso können Änderungen durch Mieter- oder Eigentümerwechsel erfolgen.

Luftwechsel [1/h]

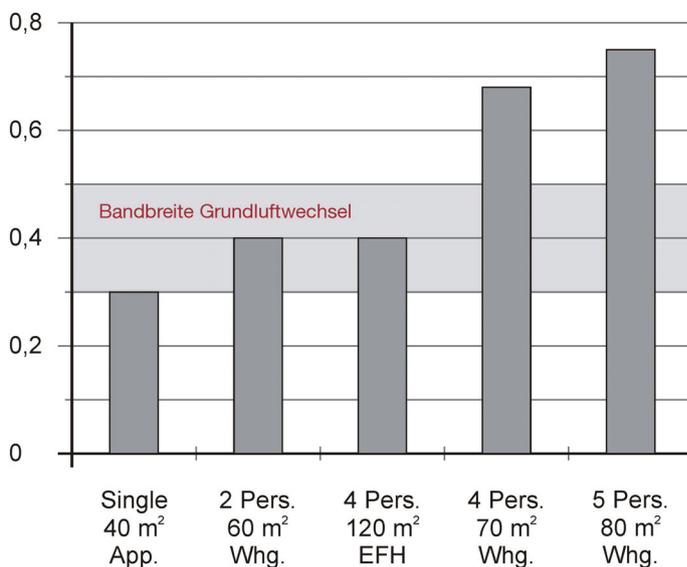


Abb. 3-12: Erforderlicher Grundluftwechsel für unterschiedlich große und verschieden dicht belegte Wohneinheiten [NBM 1999].

Bei ausschließlicher Lüftung über Fenster liegt es an den Bewohnern, durch ihr Lüftungsverhalten den für sie erforderlichen Luftaustausch sicherzustellen. Soll eine Lüftungsanlage zum Einsatz kommen, muss aber vorab bei der Dimensionierung der Anlage eine Entscheidung über ihre Leistung getroffen werden. Empfehlenswert ist ein Grundluftwechsel von 0,3 h⁻¹, der auch bei Abwesenheit aller Bewohner beibehalten wird. Im Bedarfsfall

sollte der Luftwechsel mehrstufig auf einen 0,5 bis 0,8-fachen Luftwechsel erhöht werden können [DIN 1946-6].

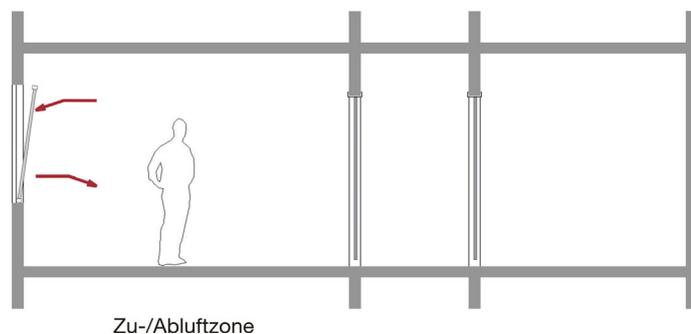
Die Zuluft wird dabei in Abhängigkeit von der zu erwartenden Belegung auf die Wohn-, Schlaf- und Arbeitsräume verteilt und in den Räumen mit erhöhter Geruchs- oder Feuchtebelastung abgezogen.

3.2.3 Lüftungsmethoden und -systeme

Abhängig von den Antriebskräften, die den Luftaustausch in einem Gebäude bewirken, wird zwischen der freien Lüftung und der mechanischen Lüftung unterschieden. Als freie Lüftung wird der Luftaustausch durch die Antriebskräfte Wind und thermischer Auftrieb bezeichnet. In Abhängigkeit von dem Außenklima stellt sich ein willkürlicher Luftaustausch über die Gebäudefugen ein, der durch einen vom Nutzer steuerbaren Luftwechsel über die Fenster ergänzt werden kann. Mechanische Lüftungssysteme ermöglichen einen definierten und regelbaren Luftwechsel. Gebäude, in denen Lüftungsanlagen eingesetzt werden, erfordern eine höhere Luftdichtheit, um den unkontrollierten Luftwechsel über Fugen möglichst gering zu halten.

3.2.3.1 Fensterlüftung

Abb. 3-13:
Lüftung eines einzelnen Raumes
über ein Fenster in Dreh- oder
Kippstellung [Nowak 2005].



Zur Gewährleistung einer Grundlüftung im Winter ist die Querlüftung nicht geeignet. In Abhängigkeit von der Windrichtung kann die Durchströmungsrichtung variieren. Dadurch kann feuchte- und geruchsbelastete Luft aus Bad, Küche und WC in die Wohn- und Schlafräume transportiert werden. Der Luftwechsel, der sich in Abhängigkeit von den resultierenden Winddrücken an den Fassaden und dem Durchströmungswiderstand einstellt, ist nicht dosierbar und kann bis zu einem zwanzigfachen Austausch der Innenluft je Stunde bei zwei gegenüber liegenden Fenstern in Kippstellung führen [Maas 1999]. Während der Heizperiode ist die Querlüftung nur zum kurzzeitigen, intensiven Stoßlüften sinnvoll.

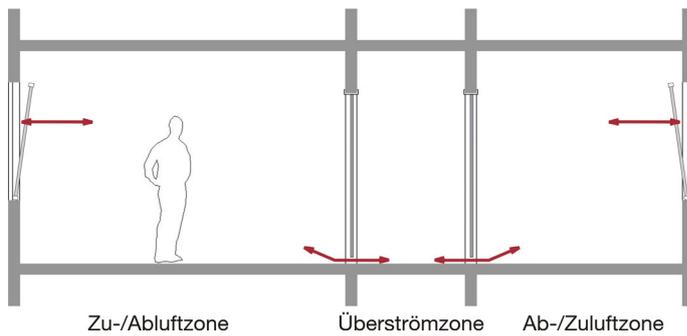


Abb. 3-14:
Querlüftung über Fenster an gegenüberliegenden bzw. über Eck angeordneten Fassaden [Nowak 2005].

3.2.3.2 Abluftanlagen

Abluftanlagen führen aus Räumen wie Küchen, WC's und Bädern, in denen eine erhöhte Geruchs- oder Feuchtebelastung vorliegt, kontinuierlich Raumluft ab. Gleichzeitig wird Frischluft über Außenluftdurchlässe in der Fassade direkt in die Aufenthalts- und Schlafräume eingebracht. Dadurch lässt sich ein witterungsunabhängiger und sämtliche Räume gleichermaßen erfassender Grundluftwechsel herstellen. Oftmals werden Abluftanlagen ausschließlich zur Sicherstellung eines Grundluftwechsels mit einer etwa 0,3- bis 0,5-fachen Luftwechselrate eingesetzt. Anlagen für höhere Komfortansprüche besitzen eine mehrstufige Regelung, um den Bewohnern eine Anpassung des Luftwechsels an den momentanen Bedarf zu ermöglichen. Ebenso sind selbsttätige Regelungen einsetzbar, die durch die Erfassung des CO₂-Gehalts der Raumluft als Maßstab für eine Luftverschlechterung oder durch die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit im Bedarfsfall einen höheren Luftwechsel bewirken.

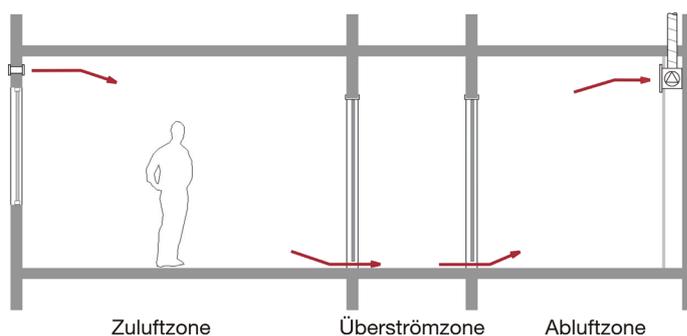


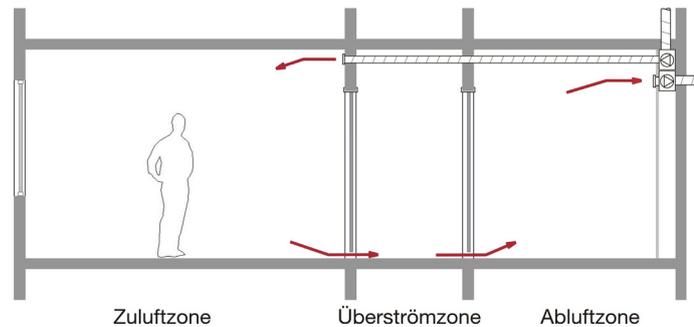
Abb. 3-15:
Durchströmungsverlauf beim Betrieb einer Abluftanlage mit Außenluftdurchlässen in der Fassade [Nowak 2005].

Beim Einsatz einer Abluftanlage tritt im Winter kalte Frischluft über die Außenluftdurchlässe direkt in die Aufenthaltsräume ein. Hier sollte ein Heizkörper so unter der Zuluftöffnung angeordnet werden, dass die einströmende Luft in die Warmluftwalze eingebunden wird. Ansonsten würde durch Zugscheinungen und Kaltluftabfall eine unbehagliche Zone an der Fassade entstehen [Markfort 2004].

3.2.3.3 Lüftungsanlagen mit Zu- und Abluft

Im Vergleich mit den reinen Abluftanlagen benötigen Wohnlüftungsanlagen mit Zu- und Abluft ein zweites Kanalnetz zum Transport der Zuluft. Da diese in jeden Wohn- und Schlafrum verteilt wird, ergibt sich zunächst ein höherer Installationsaufwand.

Abb. 3-16:
Luftführung und Installationen
beim Einsatz einer Anlage zur
Be- und Entlüftung [Nowak
2005].



Ein wesentlicher Vorteil der Lüftungsanlagen mit Zu- und Abluft liegt in der Möglichkeit der Wärmerückgewinnung. Da sowohl Zu- und Abluftströme über das Lüftungsgerät transportiert werden, kann mit Hilfe eines Wärmetauschers die in der Abluft enthaltene Wärme auf die kalte Außenluft übertragen werden. In Abhängigkeit von der Bauart des Wärmetauschers können auf diese Weise 60 bis 90 % der Lüftungswärmeverluste rückgewonnen werden. Die Zuluft wird dann nicht mehr mit Außentemperatur in die Räume eingebracht, ihre Temperatur liegt nur noch einige Grade unter der Raumtemperatur. Wegen der zunächst hohen Investitionskosten werden Zu- und Abluftanlagen vorwiegend in energetisch hochwertigen Gebäuden wie Niedrigenergie- und Passivhäusern eingesetzt.

3.2.3.4 Dezentrale Lüftungsgeräte

Dezentrale Lüftungsgeräte werden in jedem Aufenthaltsraum an einer Außenwand installiert (Abb. 3-17). Neben den Außen- und Fortluftleitungen, die direkt hinter dem Gerät durch die Fassade geführt werden, sind sämtliche Komponenten wie Ventilatoren, Filter, Regelung und meist auch Wärmerückgewinnung integriert. Außer einem elektrischen Anschluss sind keine weiteren Installationen und Leitungszuführungen erforderlich. Wegen des geringen Platzbedarfes und Installationsaufwandes eignen sich diese Geräte besonders für die Nachrüstung von Lüftungstechnik in Altbauten, die nicht vollständig umgebaut oder saniert werden sollen. Diese Technik bietet sich auch an, wenn eventuell nur ein einzelner Raum – z.B. ein Schlafzimmer – mechanisch gelüftet werden soll. Ein wesentlicher Vorteil dieser Geräte besteht in der Möglichkeit, den Luftwechsel raumweise dem individuellen und momentanen Bedürfnis anzupassen. Über mehrstufige Schalter können so beispielsweise Zu- und Abluftmengen von 15, 30 oder 60 m³/h eingestellt werden.

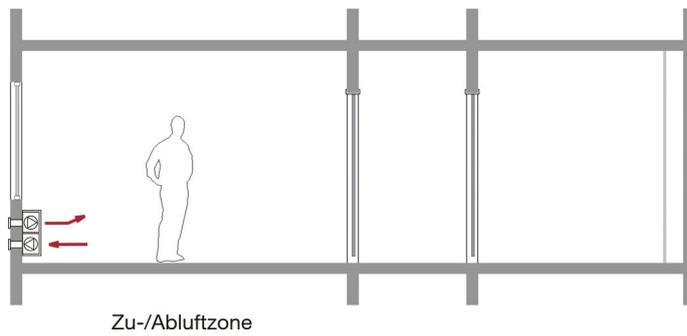


Abb. 3-17:
Dezentrales Wohnungslüftungs-
gerät für Einzelräume an einer
Außenwand [Nowak 2005].

Das Prinzip der Lüftungszonierung ist mit dezentralen Geräten nicht möglich. Die Wohn- und Schlafräume sind sowohl Zu- als auch Ablufträume, Überströmbereiche gibt es nicht. Klassische Ablufträume wie Bäder, Küchen oder WC's müssen durch separate Geräte be- und entlüftet werden. Schalltechnisch sind dezentrale Geräte schlechter einzustufen als zentrale Anlagen. Da sich die Einzelraumgeräte direkt in den Wohn- und Schlafräumen befinden, kann die Geräuschentwicklung der Ventilatoren von sensiblen Bewohnern als störend empfunden werden.

3.2.4 Anforderungen an Lüftungssysteme in Passivhäusern

Ohne ein Be- und Entlüftungssystem mit Wärmerückgewinnung kann der Passivhaus-Standard nicht erreicht werden. Grund dafür sind die Lüftungswärmeverluste, die in einem Wohngebäude mit einem mittleren Luftwechsel in der Heizperiode von $0,4 \text{ h}^{-1}$ etwa $30 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ betragen.

In Abb. 3-18 sind die Bilanzen von Wärmegewinnen und -verlusten eines sehr gut wärmedämmten Gebäudes mit und ohne

Jahres-Heizwärmebilanz
[kWh/m²a]

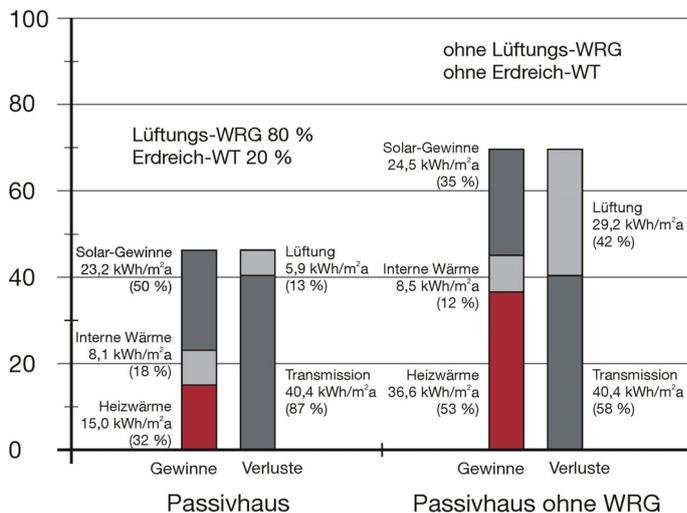


Abb. 3-18:
Einfluß der Lüftungswärme-
rückgewinnung auf den Heiz-
wärmebedarf in Passivhäusern
(berechnet mit dem statischen
Berechnungsverfahren [PHPP
2004]; Randbedingungen:
Einfamilienhaus, Grundfläche
8m x 12m, EG + OG, Fen-
sterflächenanteile N/O/S/W =
6%/15%/40%/15%).

Lüftungswärmerückgewinnung dargestellt. Das linke Säulenpaar steht für ein Passivhaus mit einem Lüftungsgerät und hocheffizienter Wärmerückgewinnung sowie einem Erdreichwärmetauscher. Für die Berechnung wurden die Dämmstärken der einzelnen Bauteile so gewählt, dass in der Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarfs mit [PHPP 2004] genau der Grenzwert von $15 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ für Passivhäuser eingehalten wird. Stellt man die Heizwärmebilanz des gleichen Gebäudes ohne Lüftungswärmerückgewinnung und Erdreichwärmetauscher gegenüber (rechtes Säulenpaar), wird die Beutung der Lüftungswärmerückgewinnung ersichtlich. Die Erhöhung des nun mehr als doppelt so hohen Heizwärmebedarfs könnte durch eine weitere Verbesserung des Dämmstandards nicht mehr kompensiert werden.

Einige Untersuchungen aus den neunziger Jahren haben ergeben, dass durch den Einsatz von Anlagen zur kontrollierten Wohnungslüftung oftmals keine Primärenergieeinsparung erzielt wird. Teilweise wurden sogar erhöhte Verbräuche ermittelt. Außerdem wurde mehrfach der ökonomische Sinn der Wohnungslüftung und insbesondere der Wärmerückgewinnung angezweifelt [Richter 1998], [Erhorn 1998]. Für Lüftungsanlagen

Abb. 3-19:
Anforderungen an Lüftungsanlagen in Passivhäusern [Feist 1999].

Anforderungskriterium	
Komfort-Kriterium: Zulufttemperatur	$\geq 16,5^\circ\text{C}$
Effizienz-Kriterium Wärmeübertrager: effektiver Wärmebereitstellungsgrad	$\geq 75\%$
Stromeffizienz-Kriterium: spezifischer Strombedarf je m^3 geförderter Luft	$\leq 0,45 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$
Begrenzung der Leckagen der Luftleitungen	$\leq 3\%$
Wärmedämmung des Gerätes:	$\leq 5 \text{ W/K}$
Abgleichbarkeit: Disbalance durch Filterverschmutzung	$\leq 10\%$
Regelbarkeit: Volumenstromregelung	0, 100 und z.B. 70, 130%
Raumlufthygiene: Zuluftfilter Abluftfilter	F7 G4
Frostschutz ohne Balancestörung	
Schallschutz: im Geräteaufstellraum Wohnräume	$\leq 35 \text{ dB(A)}$ $\leq 25 \text{ dB(A)}$

in Passivhäusern werden deshalb konkrete Anforderungen gestellt, um eine Einsparung von Primärenergie zu erzielen. Diese Anforderungen sind in Abb. 3-19 zusammengestellt.

3.3 Thermische Behaglichkeit – Einflussfaktoren und Bewertungsmodelle

Als thermische Behaglichkeit wird der Zustand bezeichnet, bei dem eine Person mit ihrem Umgebungsklima zufrieden ist, sich thermisch neutral fühlt und weder eine wärmere noch eine kältere Umgebung wünscht. Dieser Zustand hängt von dem Gleichgewicht zwischen der eigenen Wärmeproduktion und der Wärmeabgabe dieser Person ab. Dabei wird die Wärmeproduktion vorwiegend vom körperlichen Aktivitätsgrad bestimmt; individuelle Parameter wie Alter, Geschlecht oder körperliche Konstitution haben nur einen geringen Einfluß. Die Wärmeabgabe wird einerseits durch den Dämmwert Ihrer Bekleidung, andererseits durch die Raumklimaparameter Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte bestimmt. Aufgrund individueller Unterschiede der Empfindung und der Wahrnehmung von Menschen ist jedoch ein thermisches Raumklima, in welchem Wohlbefinden für alle erreicht wird, nicht herstellbar. Ein gewisser Prozentsatz an Personen wird immer unzufrieden sein. Von [Fanger 1970] wurde dieser Prozentsatz Unzufriedener bei optimalem Raumklima mit 5 % ermittelt; andere Untersuchungen [Mayer 1998] kamen zu dem Ergebnis, dass nur ein minimaler Prozentsatz Unzufriedener von 16 % erreichbar ist.

3.3.1 Raumklimatische Parameter

3.3.1.1 Temperatur von Raumluft und Umschließungsflächen

In Innenräumen beeinflussen sowohl die Lufttemperatur als auch die Oberflächentemperaturen der raumumschließenden Flächen das Temperaturempfinden einer Person. Als zusammengefasste Größe wird die resultierende empfundene Temperatur als operative Raumtemperatur bezeichnet.

Als operative Raumtemperatur t_o wird die gleichmäßige Temperatur eines imaginären schwarzen Raumes definiert, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden nicht gleichmäßigen Umgebung [DIN EN ISO 7730: 1995].

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_r$$

mit:	t_o	örtliche operative Raumtemperatur [°C]
	t_a	örtliche Lufttemperatur [°C]
	$t_r = \sum_{K=1}^n \varphi_K \cdot t_K$	örtliche Strahlungstemperatur [°C]
	φ_K	Einstrahlzahl zwischen dem Raumpunkt und der Fläche K

t_K	Temperatur der Fläche K [°C]
A	= 0,5 für $\bar{v} < 0,2$ m/s = 0,6 für $0,2 < \bar{v} < 0,6$ m/s = 0,7 für $0,6 < \bar{v} < 1,0$ m/s

In den meisten, für die Praxis relevanten Fällen, in denen die mittlere Luftgeschwindigkeit unter 0,20 m/s beträgt, wird die operative Raumtemperatur aus dem arithmetischen Mittel der örtlichen Luft- und Strahlungstemperatur errechnet [DIN 1946-2], [DIN EN ISO 7730: 1995]. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten wird der erhöhte Einfluß der Raumlufftemperatur durch Konvektion durch einen Gewichtungsfaktor A berücksichtigt.

3.3.1.2 Luftfeuchte

Der Einfluß der Luftfeuchte auf die thermische Behaglichkeit im Winter ist als gering einzustufen. Ein Anstieg der relativen Raumlufffeuchte um 10 % ist gleichwertig einer Erhöhung der Raumlufftemperatur um 0,3 K [Fanger 1970]. Allerdings hat die Luftfeuchte andere Auswirkungen auf den Menschen, die sich mehr auf die empfundene Raumluffqualität auswirken als auf das thermische Empfinden [Fanger 1996].

Die im Winter relevante untere Grenze der zulässigen Luftfeuchte wird in Normenwerken mit 30 % angegeben [DIN 1946-2], [DIN EN ISO 7730: 2006]; gelegentliche Unterschreitungen werden jedoch als unbedenklich angesehen. Bei Sommerbedingungen werden maximal 70 % relative Luftfeuchte empfohlen.

3.3.1.3 Luftgeschwindigkeit und Turbulenz

Die Bewegung der Raumluff beeinflusst über den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten den Wärmeaustausch eines Menschen mit seiner Umgebung. Dadurch können Luftbewegungen besonders bei sitzenden Personen mit geringer körperlicher Aktivität das Gefühl von Zug hervorrufen. Wesentlich sind dabei sowohl der Mittelwert der Luftgeschwindigkeit als auch der Turbulenzgrad T_u , der als Quotient aus Standardabweichung und mittlerer Luftgeschwindigkeit definiert ist und den Grad der Geschwindigkeitsschwankungen über den zeitlichen Verlauf darstellt.

Grundsätzlich werden – unter gleichen Temperaturbedingungen - bei niedrigeren Turbulenzgraden der Raumluff höhere mittlere Luftgeschwindigkeiten akzeptiert. So wird beispielsweise eine mittlere Luftgeschwindigkeit von 0,13 m/s mit einem Turbulenzgrad von 20 % gleich empfunden wie eine mittlere Luftgeschwindigkeit von 0,10 m/s mit einem Turbulenzgrad von 60 %.

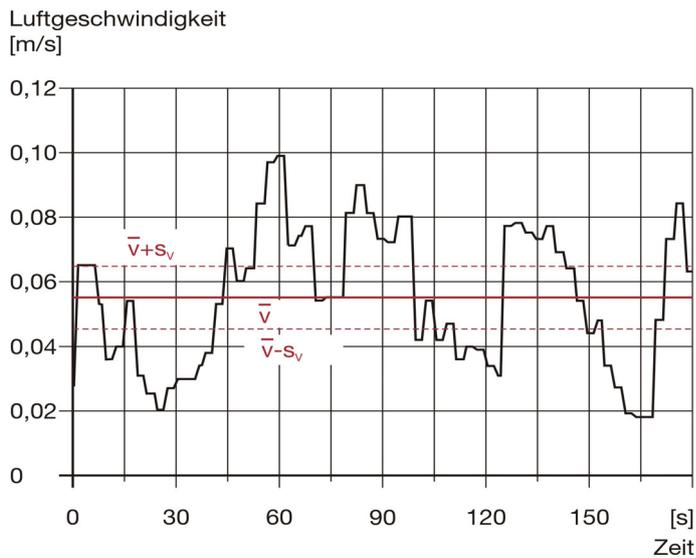


Abb. 3-20:
Verlauf der Luftgeschwindigkeit über eine Zeitdauer von 180 Sekunden in einem Raumpunkt 1,70 m über Fußboden.

3.3.2 Individuelle Parameter

3.3.2.1 Bekleidung

Die Bekleidung eines Menschen wirkt als Wärmedämmung zwischen ihm und seiner Umgebung und beeinflusst dadurch die Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion. Damit spielt die Art der Bekleidung eine entscheidende Rolle bei der Frage, ob der Wärmehaushalt einer Person insgesamt ausgeglichen ist oder ob mehr Wärme als gewünscht bzw. weniger Wärme als erforderlich abgegeben wird. In Normen werden die Dämmwerte einzelner Kleidungsstücke sowie von Bekleidungskombinationen in $[m^2K/W]$ sowie in $[clo = \text{clothing factor}]$ angegeben. Ein clo entspricht dabei einem Wärmedurchlasswiderstand von $0,155 m^2K/W$.

Bekleidungskombination	Dämmwert	
	$[m^2K/W]$	$[clo]$
Nackt	0,0	0
Leichte Sommerkleidung	0,08	0,5
Leichte Arbeitskleidung	0,11	0,7
Winterbekleidung (für Innenräume)	0,155	1,0

Für die Ermittlung und Bewertung der thermischen Behaglichkeit ist im Sommerfall eine Bekleidungskombination mit 0,5 clo, im Winter mit 1,0 clo anzunehmen. Andere Bekleidungskombinationen als in Abb. 3-20 angegeben können aus den in [DIN EN ISO 7730: 2006] angegebenen Dämmwerten einzelner Kleidungsstücke berechnet werden.

3.3.2.2 Aktivität

Die Wärmeerzeugung im menschlichen Körper wird neben dem Grundumsatz wesentlich vom Grad der Aktivität bestimmt. Dieser Grundumsatz zur Erhaltung der Körpertemperatur beträgt lediglich etwa 46 W/m^2 Hautoberfläche, hingegen kann der zusätzliche Energieumsatz bis etwa 500 W/m^2 bei dauerhafter, schwerer körperlicher Tätigkeit ansteigen. In [DIN EN ISO 7730: 2006] werden in Anlehnung an die [DIN EN ISO 28996] für einige wohn- und büroübliche Tätigkeiten die Energieumsätze angegeben.

Tätigkeit	Energieumsatz	
	[W/m ²]	[met]
Ruhend	46	0,8
Sitzend, entspannt	58	1,0
Stehend, entspannt	70	1,2
Sitzend, leichte Tätigkeit (Büro, Wohnung, etc.)	70	1,2
Stehende, leichte Tätigkeit	93	1,6
Stehende, mittelschwere Tätigkeit (Hausarbeit, Maschinenbedienung)	116	2,0

Für diese Tätigkeiten sind in Abb. 3-21 der Energieumsatz sowohl in Watt je m^2 Hautoberfläche als auch relativ bezogen auf den Energieumsatz einer entspannt sitzenden Person in [met = metabolic rate] angegeben. Die gesamte Hautoberfläche einer dabei angenommenen Standardperson beträgt etwa $1,75 \text{ m}^2$ [Fanger 1970].

3.3.2.3 Sonstige individuelle Parameter

Neben den individuellen Parametern Bekleidung und Aktivität wurde der Einfluß weiterer Parameter auf das thermische Behaglichkeitsempfinden untersucht. Teilweise Widersprüche in diesen Untersuchungen haben allerdings dazu geführt, dass diese Parameter im Normenwerk nicht zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit herangezogen werden.

So wurde die Abhängigkeit des Alters zu der bevorzugten Raumtemperatur von [Nevins 1966] untersucht und als lediglich geringfügig befunden. In [Rholes 1971] hingegen wurde herausgefunden, dass Personen über 40 Jahre eine um $0,5 \text{ K}$ höhere, Kindern unter 12 Jahren eine um $0,5 \text{ K}$ niedrigere Raumtemperatur gegenüber dem Durchschnitt als behaglich empfinden.

Von [Nevins 1966] durchgeführte Versuche ergaben, dass Frauen durchschnittlich bis zu 1 K höhere Raumtemperaturen benötigen als Männer. Untersuchungen von [Aschoff 1971] ergaben,

dass Frauen eine um 2 K höhere Lufttemperatur bevorzugen als Männer.

Den Einfluss der Konstitution untersuchte [Läge 1983] und fand signifikante Unterschiede im Wärmehaushalt bei Personen mit unterschiedlichem Körpergewicht.

Der Einfluss dieser diskutierten individuellen Parameter werden in [Fanger 1970] und [Olesen 1982] insgesamt als gering eingeschätzt. Ihrer Auffassung nach liegen festgestellte Unterschiede in der Art der Bekleidung (geschlechtliche Unterschiede) und in der Bewegungsintensität (Alter, Konstitution).

3.3.3. Behaglichkeitsbewertung nach DIN EN ISO 7730

Das menschliche Wärmeempfinden hängt im Wesentlichen vom thermischen Gleichgewicht des Körpers als Ganzem ab. Dieses Gleichgewicht wird durch die Parameter des Umgebungsklimas – Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte – sowie durch die Intensität der körperlichen Tätigkeit und der Bekleidung beeinflusst [DIN EN ISO 7730: 2006].

Von [Fanger 1970] wurde die Behaglichkeitsgleichung abgeleitet. Diese gibt die Kombination von Raumklimaparametern an, die im Durchschnitt von Personen als thermisch neutral empfunden werden. Da reale Bedingungen aber meistens von dieser idealen Kombination abweichen, wurden der PMV und der PPD-Index definiert.

Das vorausgesagte mittlere Votum PMV und der vorausgesagte Prozentsatz Unzufriedener PPD sind Durchschnittswerte für die Klimabeurteilung einer großen Personenzahl, die dem gleichen Umgebungsklima ausgesetzt sind. Diese beiden Kennzahlen wurden in Versuchen zur Klimabeurteilung mit über 1300 Testpersonen ermittelt und definiert [Fanger 1970] und in das internationale Normenwerk aufgenommen. Da es sich in beiden Fällen um Durchschnittswerte handelt, können einzelne Klima-urteile um ein ermitteltes PMV oder PPD streuen.

3.3.3.1 Vorausgesagtes mittleres Votum - PMV

Das PMV („Predicted Mean Vote“) ist eine in der [DIN EN ISO 7730: 2006] definierte Kennzahl, die die Beurteilung eines Raumklimas durch eine große Anzahl Personen auf einer Skala von -3 bis +3 vorhersagt und ein individuelles thermisches Empfinden von „kalt“ bis „heiß“ wiedergibt.

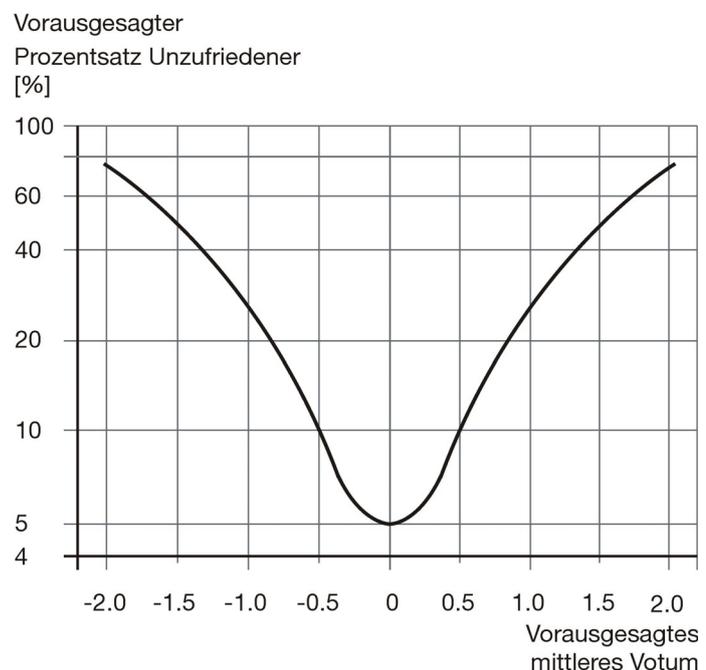
PMV	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Klima-Urteil	kalt	kühl	etwas kühl	neutral	etwas warm	warm	heiß
PPD	-	75	25	5	25	75	-

Der PMV-Index wurde experimentell aus der subjektiven Beurteilung von Probanden ermittelt, die zu einem gegebenen Raumklima ihr persönliches Klima-Urteil abgeben mussten. Zwar wurde der PMV-Index für stationäre Raumklimazustände ermittelt. Bei geringen Schwankungen ein oder mehrerer Raumklimaparameter kann er aber mit ausreichender Genauigkeit aus den Mittelwerten der letzten Stunde ermittelt werden.

3.3.3.2 Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener - PPD

Der PPD („Predicted Percentage Dissatisfied“) stellt eine quantitative Voraussage der Anzahl mit einem bestimmten Umgebungsklima unzufriedener Personen dar und ist als prozentualer Anteil einer großen Personengruppe definiert, der es als zu warm oder zu kalt empfindet. Mit folgender Gleichung kann der PPD aus dem PMV errechnet werden.

Abb. 3-21:
Vorhergesagter Prozentsatz mit dem Raumklima unzufriedener Personen (PPD) als Funktion des vorhergesagten mittleren Votums (PMV) [DIN EN ISO 7730: 2006].



Der niedrigste erzielbare PPD-Index liegt also nach [DIN EN ISO 7730: 2006] bei 5% Unzufriedenen. Trotz optimal abgestimmter Raumklimaparameter ist es folglich grundsätzlich unmöglich, ein allgemein zufrieden stellendes Raumklima zu schaffen. Die Berechnung des PPD ist für PMV-Werte von -2 bis +2 gültig.

3.3.4 Lokales thermisches Unbehagen

Neben einer ausgeglichenen Wärmebilanz des menschlichen Körpers stellt thermische Behaglichkeit auch lokale Bedingungen an das Raumklima. Selbst wenn der PMV-Index für eine Person eine ausgeglichene Wärmebilanz vorhersagt, kann durch lokalen Wärmeentzug oder übermäßige lokale Erwärmung Unbehagen entstehen. Große vertikale Lufttemperaturgradienten, kalte oder warme Fußböden, zu hohe Luftgeschwindigkeiten oder übermäßige Strahlungstemperaturasymmetrien lassen diese lokalen Unbehaglichkeiten entstehen.

3.3.4.1 Beeinträchtigung durch Zugluft

Durch örtlich zu hohe Luftbewegung kann eine unerwünschte Abkühlung am Körper erfolgen. Diese Beeinträchtigung durch Zugluft wird durch den vorausgesagten Prozentsatz von Menschen DR ausgedrückt, die sich durch Zugluft belästigt fühlen. Durch nachfolgende Gleichung [DIN EN ISO 7730: 2006] kann der Prozentsatz dieser Personen berechnet werden; neben der mittleren lokalen Luftgeschwindigkeit haben die örtliche Lufttemperatur und der Turbulenzgrad Einfluß auf das Zugluftrisiko.

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

mit: DR Prozentsatz von Menschen, die aufgrund von Zugluftempfinden unzufrieden sind [%]

t_a lokale Lufttemperatur [°C]

\bar{v}_a lokale mittlere Luftgeschwindigkeit [m/s]

Tu lokaler Turbulenzgrad [%]

$$Tu = \frac{1}{\bar{v}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad \bar{v} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i$$

mit: Tu Turbulenzgrad [%]

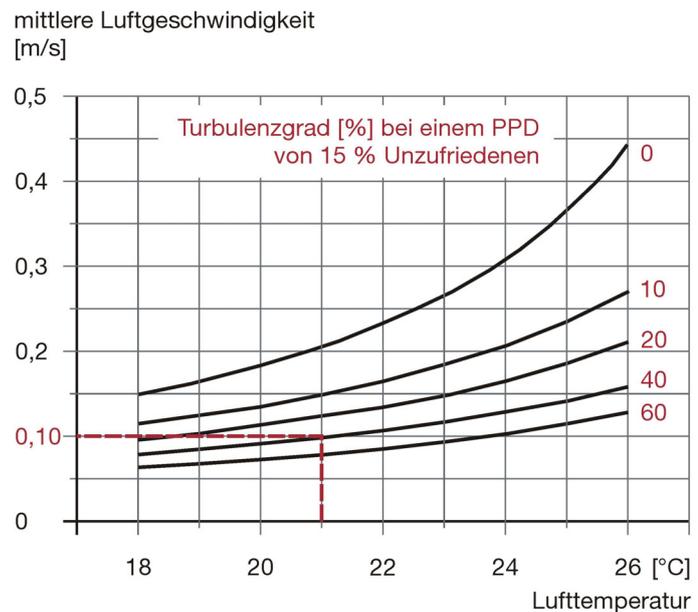
s_v Standardabweichung der Momentanwerte der Luftgeschwindigkeit

\bar{v} mittlere Luftgeschwindigkeit [m/s]

n Anzahl der Messpunkte

v_i Momentanwert der Luftgeschwindigkeit [m/s]

Abb. 3-22:
Grenzwerte der mittleren Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Turbulenzgrad und Lufttemperatur bei einem zu erwartenden Anteil Unzufriedener aufgrund Zugluft von 5 %.



Legt man die Empfehlung der [DIN EN ISO 7730: 2006] von höchstens 15 % Unzufriedenen aufgrund Zugluft zugrunde, wären bei einer im Winter üblichen Lufttemperatur von 21 °C und einem durchschnittlichen Turbulenzgrad der Luftströmung von 40 % maximal eine mittlere Luftgeschwindigkeit von 0,10 m/s zulässig (s. Abb. 3-24).

3.3.4.2 Strahlungstemperaturasymmetrie

Unterschiede in den Oberflächentemperaturen gegenüberliegenden Raumumschließungsflächen einschließlich eventuell vorhandener Heizflächen führen zu einer asymmetrischen Strahlungswärmeabgabe einer im Raum befindlichen Person. Fanger und Olesen haben dafür den Begriff der Strahlungstemperaturasymmetrie eingeführt [Fanger 1985], [Olesen 1985]. Diese ist die Differenz der Strahlungstemperatur auf ein kleines Flächenelement aus zwei gegenüber liegenden Halbräumen. Zur Bewertung einer sitzenden Person wird dieses Flächenelement in 0,60 m Höhe angenommen, für eine stehende Person in 1,10 m Höhe. Warme Decken und kalte Wände bzw. Fenster werden bei gleicher Differenz der Halbraumstrahlungstemperatur unangenehmer empfunden als kalte Decken und warme Wände. Diesen Zusammenhang zwischen dem Anteil Unzufriedener und der Strahlungstemperaturasymmetrie für kalte bzw. warme Deckenflächen und Wände zeigt Abb. 3-25.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen von Fanger und Olesen wurden in [DIN EN ISO 7730: 1995] als konkrete Anforderungen an vertikale und horizontale Strahlungstemperaturasymmetrien aufgenommen:

- Die Unterschiede in der Strahlungstemperatur an Fenstern oder anderen kalten senkrechten Flächen müssen – bezo-

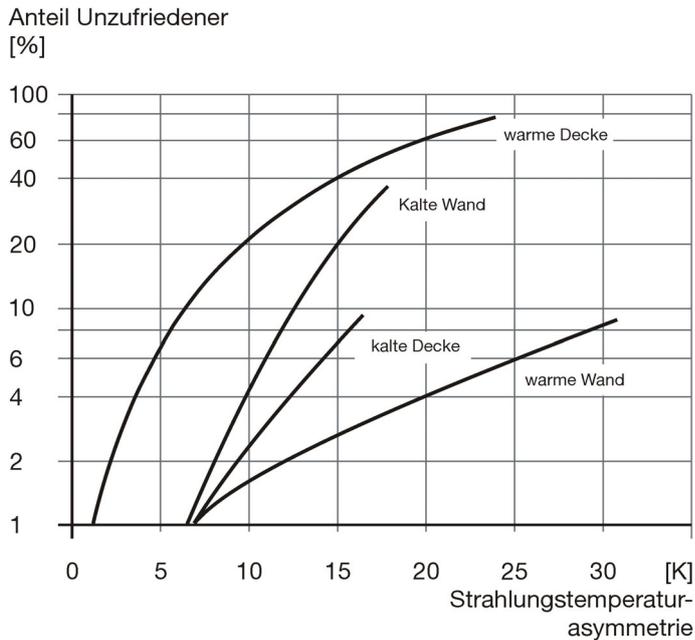


Abb. 3-23: Anteil Unzufriedener als Funktion der Strahlungstemperaturasymmetrie für Personen nahe kalten oder warmen Wänden bzw. unter kalten oder warmen Decken [DIN EN ISO 7730: 2006].

gen auf eine kleine senkrechte Fläche 0,60 m über dem Fußboden – weniger als 10 °C betragen.

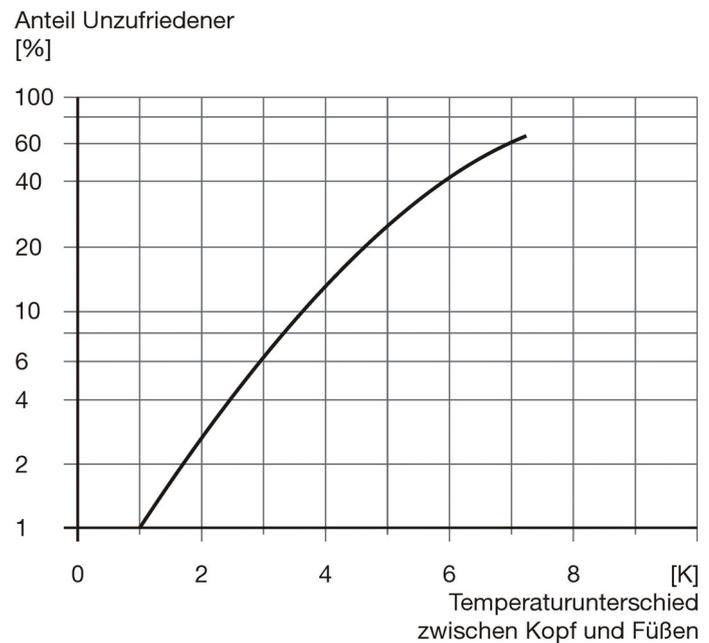
- Die Unterschiede in der Strahlungstemperatur bei einer warmen (beheizten) Decke dürfen – bezogen auf eine kleine horizontale Fläche 0,60 m über dem Fußboden – höchstens 5 °C betragen.

In den zurückgezogenen VDI-Lüftungsregeln [DIN 1946-2] wurden für die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit noch höhere Anforderungen gestellt. Als Grenzwerte für die Differenz der Halbraum-Strahlungstemperaturen wurden bei warmen Deckenflächen 3,5 K und bei kalten Wandflächen 8 K zugelassen.

3.3.4.3 Vertikaler Temperaturgradient

Hohe Lufttemperaturunterschiede zwischen Kopf- und Fußbereich führen insbesondere bei niedrigeren Werten im Fußbereich zu Unbehagen. Wird beispielsweise eine Temperaturdifferenz von 3 K zwischen Kopf (1,10 m über Fußboden) und Knöchel (0,10 m über Fußboden) zugelassen, so ist mit einem Anteil von 5 % Unzufriedenen zu rechnen (s. Abb. 3-26). In [DIN EN ISO 7730: 1995] wird ein maximaler vertikaler Lufttemperaturunterschied zwischen 0,10 und 1,10 m über Fußboden sowohl unter Winterbedingungen während der Heizperiode als auch im Sommerfall in der Kühlperiode von höchstens 3 K gefordert. Die zurückgezogene [DIN 1946-2] verlangt sogar eine Beschränkung des vertikalen Lufttemperaturgradienten auf höchstens 2 K/m im Aufenthaltsbereich.

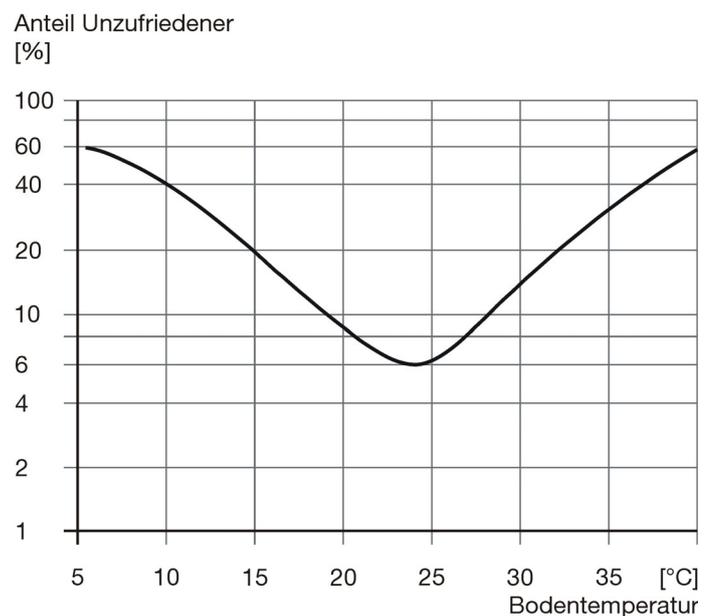
Abb. 3-24:
Anteil Unzufriedener in Abhängigkeit vom vertikalen Lufttemperaturunterschied zwischen Kopf (1,10 m) und Füßen (0,10 m) einer sitzenden Person [Olesen 1979].



3.3.4.4 Fußbodentemperatur

Für die thermische Behaglichkeit der Füße von Personen mit leichtem Schuhwerk ist die Oberflächentemperatur des Fußbodens ausschlaggebend, weniger die Materialität des Bodenbelagmaterials. Aus Untersuchungen von [Olesen 1977] geht hervor, dass es keine allgemein zufrieden stellende Fußbodentemperatur gibt. Der geringste Anteil Unzufriedener ist bei einer Bodentemperatur von etwa 24 °C zu erwarten (s. Abb. 3-27).

Abb. 3-25:
Anteil Unzufriedener als Funktion der Bodentemperatur (gilt für Personen mit leichter Fußbekleidung) [Olesen 1977].



4 Versuchsaufbau

4.1 Versuchshalle und Testraum

4.1.1 Geometrie und Abmessung des Testraumes

Für die Durchführung der Versuche wurde ein Messraum errichtet, der im Grundriss eine Innenabmessung von 3,75 m x 3,75 m bei einer lichten Höhe von 2,50 m aufweist. Dieser Raum entspricht in Fläche und Geometrie einem nutzungsneutralen Wohnraum [Faller 1999]. In einer Wand ist ein zweiflügelig öffnbares Fenster mit einer Breite von 1,60 m und einer Höhe von 2,24 m eingebaut. Die Wandseite mit Fenster entspricht der Außenfassade dieses Messraumes. Daran angeschlossen ist ein Klimaraum, in dem Außentemperaturen bis unter -20 °C erzeugt werden können. Der Messraum entspricht somit einem typischen Wohn- oder Schlafräum einer Geschößwohnung mit einer Außenwand.

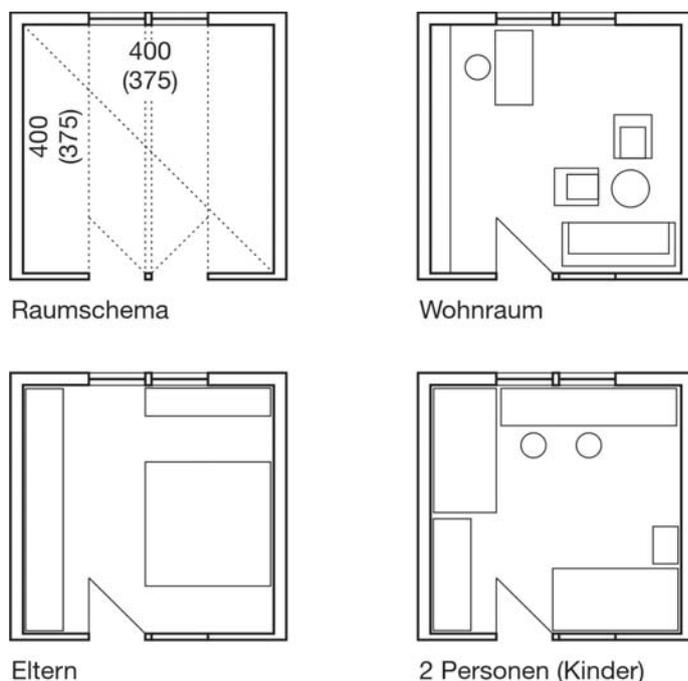


Abb. 4-1:
Mindestgrößen nutzungsneutraler Räume und alternative Nutzungen [Faller 1999].

4.1.2 Konstruktiver Aufbau

Wände, Decke und Boden des Testraumes bestehen aus beidseitig mit OSB-Platten beplankten Holz-Doppelstegträgern mit einer Höhe von 24 cm. Die Zwischenräume sind vollständig mit Mineralwolle der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 035 gedämmt. Für die Beplankung wurden OSB-Platten in einer Stärke von 12 mm eingesetzt; lediglich für die Oberseite der Bodenelemente wurden aus statischen Gründen 18 mm dicke Platten verbaut. Alle Umschließungsflächen des Testraumes - ausschließlich der

transparenten Bauteile - weisen einen U-Wert von $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf. Diese sehr gute Wärmedämmung wurde gewählt, um den Einfluß von Temperaturschwankungen in der Versuchshalle auf die Messergebnisse im Testraum gering zu halten.

Abb. 4-2 (links): Außenwandmodul des Testraums mit erst einseitiger Beplankung und ohne Dämmung.



Abb. 4-3 (rechts): lückenlose Dämmung im Stegbereich und zwischen den Ständerprofilen.



Durch Bohlen unter den Längswänden lag die Bodenplatte des Testraums nicht mehr unmittelbar auf dem Hallenboden auf (Abb. 4-4). Diese 5 cm hohe Hinterlüftungsebene reduzierte mögliche thermische Einflüsse auf den Messraum durch den nicht beheizten Keller unter der Versuchshalle.

Abb. 4-4 (links): Aufständerung des Testraums vom Hallenboden.



Abb. 4-5 (rechts): Gedämmte Rahmenprofile der 3-Scheibenverglasungen.



Sowohl die Eingangstertüre als auch das zweiflügelige Fenserelement in der Fassade zum kalten Außenraum wurden als 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit gedämmten Rahmenprofilen ausgeführt (Abb. 4-5). Die Blendrahmen wurden zusätzlich etwa 5 cm überdämmt. Die Fenster weisen im eingebauten Zustand einen Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{W, \text{eingebaut}}$ einschließlich Einbauwärmebrücke unter $0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf und erfüllen damit Passivhaus-Anforderungen.

4.1.3 Luftdichtheit

Um einen geringen Fehlereinfluss durch unkontrollierten Luftwechsel zwischen dem Testraum und der Umgebungsluft sowie der kalten Luft aus der Klimakammer zu erreichen, war eine hohe Luftdichtheit des Testraumes erforderlich. Zielvorgabe war eine Luftdichtheit, wie sie mindestens für Passivhäuser erforderlich ist.



Abb. 4-6 (links):
Luftdichte Abklebung der Fenster-
türe.

Abb. 4-7 (rechts):
Abdichtung der Wandkanten
und -ecken.

In der Fläche wurde die Dichtheit durch die OSB-Beplankung erreicht, die an sämtlichen innenseitigen Plattenstößen, Kanten und Ecken mit Dichtungsbändern der Firma SIGA luftdicht abgeklebt wurden (Abb. 4-6 und 4-7). Durch sorgfältiges rechtwinkliges Anbringen der Klebebänder an den Blendrahmen der Eingangstür und dem Fensterelement wurden auch diese Anschlüsse zur flächigen Bauteilebene luftdicht hergestellt. Für die Abdichtung der Rohrleitungs- und Kabeldurchführungen durch die luftdichte Plattenebene wurden Dichtmanschetten der Firma proclima in unterschiedlichen Abmessungen eingesetzt.

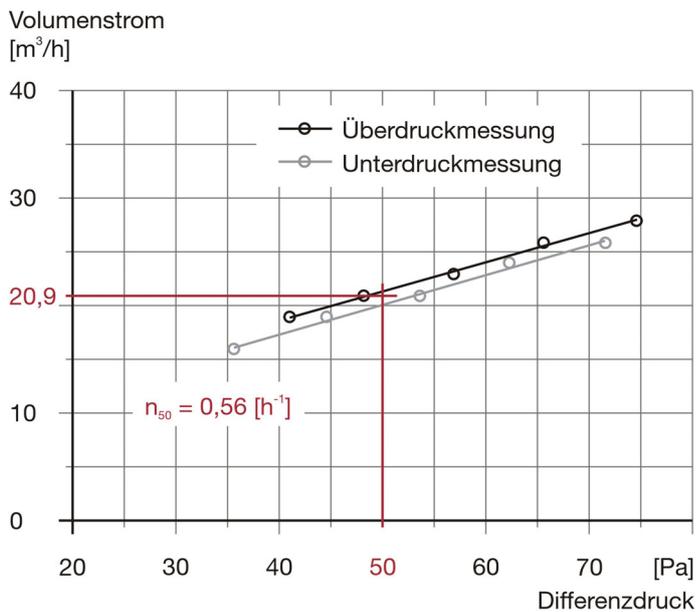
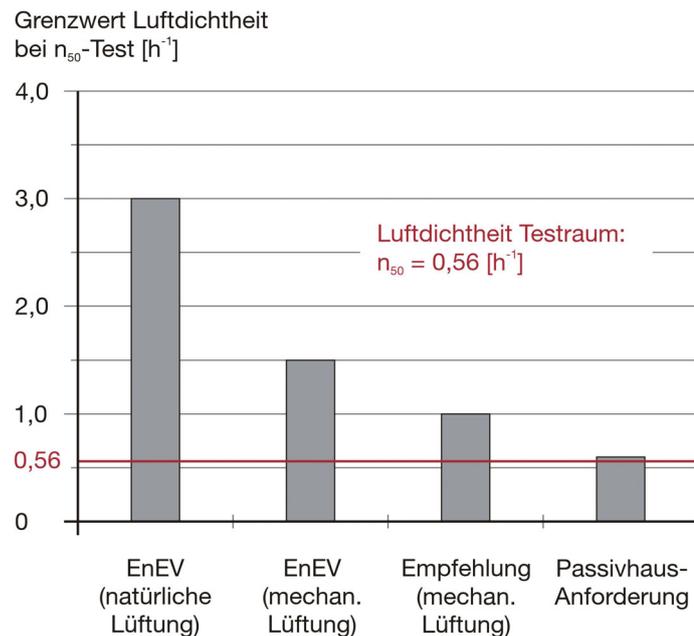


Abb. 4-8:
Messkurven bei Unter- und
Überdruckmessung des Blower-
Door-Tests.

Der Nachweis der Luftdichtigkeit des Testraumes wurde durch eine BlowerDoor-Messung erbracht. Die Messung vor Beginn der Versuchsreihen hatte einen Leckageluftwechsel $n_{50} = 0,56 \text{ h}^{-1}$ ergeben (s. Grafik, rote Linie). Damit wurde das Luftdichtheitskriterium für Passivhäuser von $n_{50} = 0,60 \text{ h}^{-1}$ unterschritten. Mit einer zweiten BlowerDoor-Messung nach Beendigung der Versuche wurde geprüft, ob die Luftdichtigkeit des Testraums im Laufe der Zeit abgenommen hatte. Dies war nicht der Fall, die Nachmessung ergab ebenfalls einen n_{50} -Wert unter $0,60 \text{ h}^{-1}$.

Abb. 4-9:
Grenzwerte der Luftdichtheit
in verschiedenen technischen
Regelwerken [EnEV 2004],
[DIN 4108-7] und gemessener
 n_{50} -Wert (rote Linie).



Aufgrund der Messungenauigkeit der BlowerDoor insbesondere bei kleinen Räumen wird vermutet, dass der tatsächliche n_{50} -Wert noch deutlich geringer ist als der gemessene Wert von $0,56 h^{-1}$.

4.2 Heiz- und Lüftungstechnik

Das zentrale Lüftungsgerät, Wärmeerzeugung und -verteilung sowie die Komponenten zur Zuluftheizung waren vor dem Testraum aufgebaut (Abb. 4-10). Direkt im Messraum befanden sich nur die Zuluft- und Wärmeübergabeeinrichtungen.

Abb. 4-10:
Frontansicht des Testraums;
Eingangsbereich mit Mess-
datenerfassung, Warmwasser-
bereitung mit Verteilsystem und
Lüftungsanlage einschließlich
Lufterhitzer/-kühler.



Für die Beheizung des Messraums standen drei Möglichkeiten zur Verfügung. Je ein Plan-Ventilkompaktheizkörper in einreihiger Bauweise mit einem Konvektorblech waren an der Raumrückwand (s. Abb. 4-12) und neben der Fassade (Abb. 4-11) montiert. Diese Heizkörper waren 90 cm hoch, 40cm breit und mit einem Bodenabstand von 15 cm montiert. Eine dritte Beheizungsvariante war die Wärmeeinbringung über die Zuluft. Dazu war ein leistungsfähiger Wasser-Luft-Wärmetauscher im Zuluftkanal eingebaut.

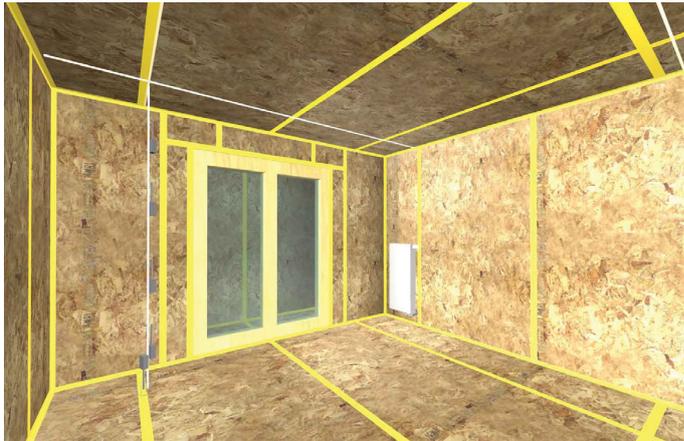


Abb. 4-11:
Innenansicht des Testraums;
Blick durch die Fassade in den
kalten „Außenraum“ und Heiz-
körperanordnung.

Die Wärmeerzeugung erfolgte in einem Edelstahl-Warmwasserspeicher mit einem Wasserinhalt von 200 l durch eine integrierte Elektroheizpatrone (Abb. 4-10). Die Speicher- und damit auch die Vorlauftemperatur wurden in Abhängigkeit von dem gewählten Wärmeübergabesystem sowie der Parameter Außentemperatur, Zulufttemperatur und Luftmenge eingestellt. Die Heizkörper wurden im Auslegungsfall bei einer Außentemperatur von -16 °C mit einer Vorlauftemperatur von 50 °C betrieben, das Zuluft-Heizregister benötigte je nach eingestellter Zuluftmenge zwischen 45 und 30 °C . Die Regelung der Wärmeübergabe erfolgte mit Thermostatventilen. Diese waren bei den Plattenheizkörpern bereits integriert. Für das Zuluftheizregister war ein Thermostatventil in der Vorlaufleitung eingebaut, das mit einem Fernfühler an der Innenwand des Messraums über eine Kapillarleitung verbunden war.

Die Wärmeverteilung erfolgte mittels einer Umwälzpumpe über das Rohrnetz. Wegen der sehr geringen Wassermassenströme war eine Trinkwasser-Zirkulationspumpe ausreichend. An einem Heizungsverteiler konnten die momentan nicht benötigten Heizkreise durch Kugelventile vom Verteilnetz getrennt werden.

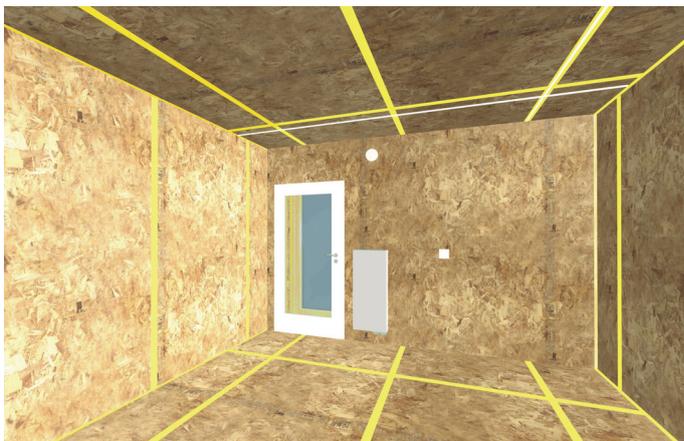


Abb. 4-12:
Innenansicht des Testraums;
Blick durch die Innentüre in den
Überströmspalt.

Im Messraum waren über eine zentrale Anlage zur kontrollierten Be- und Entlüftung (Abb. 4-13) Luftwechsel bis etwa $140\text{ m}^3/\text{h}$ möglich. Da dies ein Mehrfaches des hygienisch erforderlichen

Luftwechselfür den Messraum gewesen wäre, wurden nur Luftwechsel bis $60 \text{ m}^3/\text{h}$ untersucht. Die gewünschten Zu- und Abluftmengen waren an der digitalen Regeleinheit des Lüftungsgerätes auf einer zehnstufigen Skala grob voreinstellbar. Die Feineinregulierung erfolgte an Drosselventilen, die in der Zu- und Abluft- und Abluftleitung eingebaut waren (Abb. 4-14). Über eine Volumenstrom-Messhaube wurden die Luftmengen direkt an den Ventilen gemessen und dementsprechend Einstellungen an den Drosselventilen vorgenommen.

Abb. 4-13 (links):
Zentrales Lüftungsgerät mit
Kreuz-Gegenstromwärmetau-
scher (hier ohne Abdeckplatte).

Abb. 4-14 (rechts):
Einregulierung der Zu- und Ab-
luftvolumenströme über Dros-
selklappen.



Bei den Parametervariationen wurden drei unterschiedliche Ventilbauformen eingesetzt. Charakteristisch für das LowNoise-Tellerventil (Abb. 4-15, oben links) ist das Ausblasen der Zuluft durch den umlaufenden Ventilspalt nach beiden Seiten und nach oben entlang der Wand. Dort wird der Luftstrahl umgelenkt und läuft entlang der Decke. Im Ventil ist ein Luftleitblech integriert, das ein Ausblasen nach unten direkt in den Aufenthaltsbereich verhindert. Der Ventilspalt ist in seiner Breite variabel, um definierte Zuluftmengen und Druckdifferenzen einstellen zu können. Die Eindringtiefe des Luftstrahls in den Raum ist bei diesem Ventil am geringsten, da durch die Ventilgeometrie der Zuluftstrahl stark aufgeweitet wird und die Strahlgeschwindigkeit deshalb schnell abnimmt. Das Weitwurfventil (Abb. 4-15, rechts oben) bläst durch einen horizontalen, in der Höhe verstellbaren Schlitz die Luft in den Raum ein. Der Zuluftstrahl weist dabei annähernd die Form eines Halbkreises auf.

Abb. 4-15:
Untersuchte Zuluftventile:
LowNoise-Tellerventil (oben
links), Weitwurfdüse (oben
rechts), Lochblech-Ventil (unten
links) und Standard-Tellerventil
(unten rechts).



Durch eine Vielzahl kleiner Öffnungen wird beim Lochblech-Ventil (Abb. 4-15, links unten) die Zuluft in den Raum eingebracht. Zum Einregulieren können im Ventil die unteren Lochreihen durch einen Magnetstreifen abgedeckt werden. Da sich die vielen Einzelstrahlen aneinander legen, bildet sich im Raum ein kompakter Einzelstrahl aus. Die Eindringtiefe ist bei diesem Ventil deshalb am größten. Als viertes Ventil wurde ein Tellerventil untersucht (Abb. 4-15, rechts unten), welches normalerweise nur als Abluftventil eingesetzt wird. Die Luft wird dabei über den gesamten Kreisringquerschnitt und somit auch direkt in den Aufenthaltsbereich ausgeblasen. Wie beim LowNoise-Tellerventil kann die Luftmenge durch ein- oder herausdrehen des Ventiltellers eingeregelt werden.

Die Lage der Zuluftventile – alle vier hatten die Nenngröße DN100 – war bei sämtlichen Versuchen identisch. Der Einbau erfolgte in einer Höhe von 2,25 m über dem Fußboden mittig über dem Plattenheizkörper an der Innenwand.

Für definierte und einheitliche Zulufttemperaturen bei Versuchen mit untertemperierter Zuluft wurde die Luft im Wasser-Luft-Wärmetauscher abgekühlt. Die Kälteerzeugung leistete ein Wasserumlaufkühler mit einstellbarer Vorlauftemperatur. Diese Vorlauftemperatur konnte über eine digitale Regelung in Zehntelgradschritten verstellt werden und wurde solange angepasst, bis die gewünschte Zulufttemperatur erreicht war. Alternativ konnte der Wärmetauscher bei Versuchen mit warmer Zuluft mit Heizwasser beaufschlagt werden. Die individuell erforderlichen Vorlauftemperaturen wurden nach rechnerischer Abschätzung am Wärmeerzeuger eingestellt und über das Raumthermostatventil ausgeregelt.



Abb. 4-16 (links):
Innenansicht der Testraumfassade mit montiertem dezentralem Lüftungsgerät.

Abb. 4-17 (rechts):
Außen- bzw. Fortluftverbindung des dezentralen Lüftungsgerätes in die Klimakammer.

Zum Vergleich wurden einige Versuche mit einem dezentralen Lüftungsgerät durchgeführt. Dieses Gerät war mit Zu- und Abluftventilatoren, Filtern sowie einem Kreuzstromplattenwärmetauscher ausgestattet. Mit einer Fernbedienung konnten am Gerät Luftmengen zwischen 15 und 100 m³/h eingestellt werden. Montiert war es an der Außenwand in einer Höhe von ungefähr 2,00 m links neben dem zweiflügeligen Fensterelement (Abb. 4-16). Die Anschlüsse für Außenluft und Fortluft wurden hinter dem Gerät durch die Wand in den Klimaraum geführt (Abb. 4-17). Der wesentliche Unterschied zur zentralen Lüftungs-

anlage lag neben der Montage und damit auch der Luftführung an der Fassade in der fehlenden Möglichkeit der Zulufterwärmung. Folglich stellte sich die Zulufttemperatur in Abhängigkeit von Innentemperatur, Außentemperatur und Wirkungsgrad des Wärmetauschers ein.

Abb. 4-18:
Rückseitenansicht des Testraums; Tiefkühlaggregat (hier sichtbar: Kondensatoreinheit).



In dem an den Messraum angrenzenden Klimaraum konnten Temperaturen bis etwa -25 °C durch ein Split-Tiefkühlaggregat erzeugt werden. Über eine digitale Bedieneinheit am Kondensator, der an der Rückseite des Klimaraums montiert ist (Abb. 4-18), waren Soll-Temperaturen in Eingradabstufung und Abtauzyklen des Aggregates einstellbar. Aus dem Verdampferteil im Klimaraum wurde die abgekühlte Luft durch einen Ventilator horizontal ausgeblasen. Dadurch wurde einerseits eine weitgehend homogene Kälteverteilung erreicht, andererseits bildeten die resultierenden mittleren Luftgeschwindigkeiten von ungefähr 1 m/s die reale winterliche Gebäudeumströmung und damit auch den konvektiven Anteil des Wärmeübergangs hinreichend genau ab.

4.3 Messtechnik

4.3.1 Beschreibung des Messaufbaus

Das Kernstück der Raumklimamessung war eine zweiachsig im Raum verfahrbare Stange, an der je fünf Sensoren zur Erfassung von Luftgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen angebracht waren (Abb. 4-19). Diese Sensoren waren in folgenden für die Behaglichkeitsmessung [DIN EN ISO 7726] relevanten Höhen montiert:

- Im Knöchelbereich einer sitzenden oder stehenden Person in einer Höhe von $0,10\text{ m}$ über dem Boden;

- 0,60 m über Fußboden, der Unterleibshöhe bzw. dem Körperschwerpunkt eines sitzenden Menschen;
- Der Kopfhöhe beim Sitzen und der Unterleibshöhe beim Stehen in 1,10 m Höhe;
- Die Messebene 1,70 m entspricht der Kopfhöhe einer stehenden Person.

Zusätzlich wurden die Werte für Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur in 2,20 m Höhe erfasst, um erweiterte Erkenntnisse über die Temperaturschichtung im Raum und über die Luftgeschwindigkeitsverteilung in der Ebene der Zuluftbringung zu gewinnen.

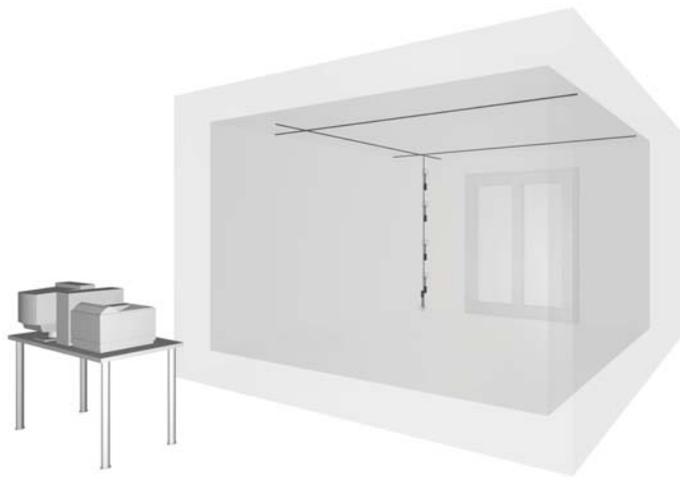


Abb. 4-19:
Verfahrbare Sensorik und Mess-
wertaufzeichnung.

Im Innenraum wurde ein Messraster mit einer Seitenlänge im Grundriss von 0,625 m definiert. Dieses Raster hatte zur Innen- und zur Außenwand einen Abstand von 0,315 m und zu den beiden Seitenwänden 0,625 m. Vor Fassade und Innenwand war das Messpunktenetz nochmals verdichtet, da hier größere Veränderungen erwartet wurden. Im Grundriss ergaben sich so 40 Messstellen, insgesamt wurde bei jedem Versuch an 200 Raumpunkten gemessen (Abb. 4-20).

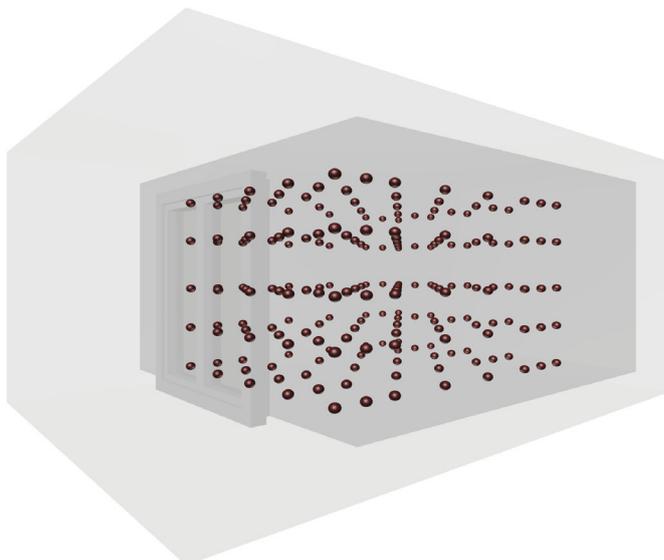


Abb. 4-20:
Vermessene Raumpunkte
(Blickrichtung auf die Mess-
raumfassade).

Zur Überwachung und Bewertung der Versuche wurden weitere Parameter gemessen und aufgezeichnet. Dieses waren:

- Jeweils die Vor- und Rücklauftemperaturen der beiden Plattenheizkörper – gemessen vor den Anschlussverschraubungen (Abb. 4-22). Aus diesen Messwerten wurde unter anderem über den Heizkörperexponenten die Wärmeabgabe abgeschätzt;
- Die Temperaturen von Zu- und Abluft (Abb. 4-21), um die Heiz- oder Kühlleistung des Zuluftvolumenstroms ermitteln zu können;
- Die Außentemperatur an der Rückwand des kalten Klimaraums in 1,25 m Höhe;
- Als Referenz die Temperatur in der Versuchshalle in einer Höhe von 2,50 m außerhalb des Messraums;
- Die Vor- und Rücklauftemperaturen am Wasser- Luft-Wärmetauscher bei Versuchen sowohl mit kalter als auch mit warmer Zuluft.

Abb. 4-21:
Messung der Zulufttemperatur
(Abluft analog).



Abb. 4-22:
Messung der Vor-/Rücklauftemperaturn an den Plattenheizkörpern.

4.3.2 Sensorik und Messdatenerfassung

Zur Messung der Luftgeschwindigkeiten in den fünf gewählten Höhenschichten wurden Thermoanemometer des Typs FV A605 der Firma Ahlborn eingesetzt. Damit konnten Luftgeschwindigkeiten im Bereich von 0,010 bis 1,000 m/s mit einer Genauigkeit von $\pm 1,0\%$ des Endwertes oder $\pm 1,5\%$ des Messwerts erfasst werden [Ahlborn 2005]. Über die Kugelspitzen der Anemometer wurden die Luftgeschwindigkeiten richtungsunabhängig erfasst. Für den Messzeitraum lagen gültige Kalibrierzertifikate vor. Die Raumlufttemperaturen wurden mit NTC-Sensoren der Firma Ahlborn Typ FNA405 gemessen. Im Bereich von 0 bis 70 °C weisen diese Sensoren eine Messgenauigkeit von $\pm 0,1$ °C auf. Die Vor- und Rücklauftemperaturen der Heizkreise wurden direkt kurz vor den Verschraubungen an den Plattenheizkörpern mit aufgeklebten NiCr-Ni-Thermodrähten erfasst. Zur Erhöhung der Genauigkeit wurden diese Messstellen mit PU-Dämmschläuchen isoliert. In gleicher Weise erfolgte die Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen des Heiz-/Kühlregisters im Zuluftstrang. Zusätzlich wurden auch die Zu- und Ablufttemperaturen jeweils kurz hinter dem Zu- bzw. Abluftventil mit NTC-Fühlern Typ FNA2061 der Firma Ahlborn ermittelt. Sämtliche eingesetzten NTC-Fühler waren werkseitig kalibriert. Operative Raumtemperaturen wurden mit Globethermometern gemessen, die aus geschwärzten Hohlkugeln mit integrierten Pt100-Elementen bestanden.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Festlegung der Parametervariationen

Die Variation der fünf Parameter Außentemperatur, Art und Ort der Wärmeübergabe, Zuluftmenge, Zulufttemperatur und Bauart des Zuluftventils ermöglichen eine sehr große Anzahl von Einzelmessungen. Um diese Anzahl auf einen bewältigbaren Umfang zu reduzieren, wurden vorab folgende Einschränkungen getroffen:

- Die Messungen wurden bei Außentemperaturen von -6, -11 und -16 °C durchgeführt; bei je zwei Messungen waren Außentemperaturen von -1 und -26 °C eingestellt.
- Beheizt wurde alternativ über einen Plattenheizkörper neben der Fassade oder an der Innenwand bzw. über die Zuluft.
- Die untersuchten Zuluftmengen betragen 20, 40 oder 60 m³/h; einige wenige Messungen wurden mit 80 m³/h durchgeführt.
- Im Falle der Beheizung über einen der Heizkörper wurden Zulufttemperaturen von etwa 21 °C (dies entspricht der mittleren Raumtemperatur), 16 °C, 14 °C und 12 °C untersucht.
- Zum Einsatz kamen drei unterschiedliche Ventilbauformen: eine Weitwurfdüse mit schnabelförmiger Ausblasöffnung, ein Tellerventil und ein Lochblech-Ventil.

Trotz dieser Reduzierung der Parameter waren noch immer über vierhundert Variationen möglich. Im Laufe der Versuchsreihen wurde dieses Spektrum soweit eingeschränkt, dass letztlich etwa einhundert Messungen durchgeführt wurden.

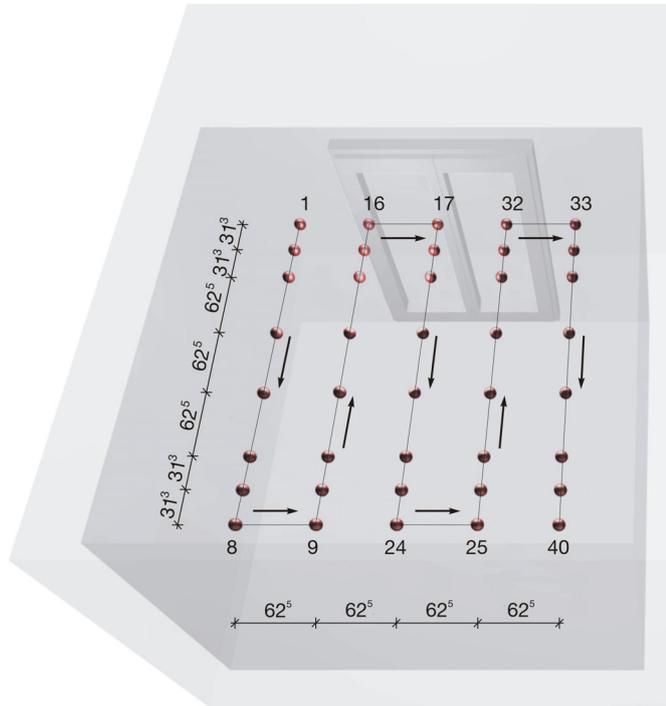
5.2 Versuchsablauf

Sämtliche Messungen wurden bei stationärem und eingeschwungenem Zustand der Anlagen- und Raumklimagrößen durchgeführt. Vorversuche hatten gezeigt, dass stationäre Bedingungen zwischen ein und zehn Stunden nach einer Parameteränderung vorherrschten. Eine Änderung der Außentemperatur (in der Kältekammer) erforderte die längste Einschwingzeit, nach einem Austausch des Zuluftventils konnten bei ansonsten gleicher Zuluftmenge und -temperatur bereits nach einer Stunde Messungen erfolgen.

Die Messungen wurden immer am Messpunkt 1 links neben der Fassade begonnen. Über ein zweiachsiges Schienensystem wurde von dort die Messstange mit den Sensoren mäanderförmig durch den Aufenthaltsbereich zu insgesamt 40 Messstellen verfahren (Abb. 5-1). Dieses Verfahren der Messstange erfolgte manuell durch ein Seilzugsystem. Der Messbereich war in ein Punktraster mit einer Seitenlänge von 0,625 m aufgeteilt. Vor Fassade und Innenwand wurde der Abstand der Messpunkte

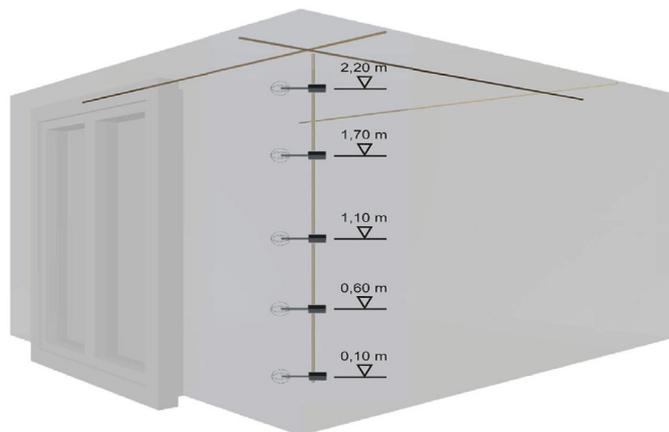
auf 0,315 m halbiert, da dort die größten Änderungen von Lufttemperaturen sowie Luftströmungsgeschwindigkeiten erwartet wurden. Der Abstand der äußeren Messstellen zu den Seitenwänden betrug ebenfalls 0,625 m, zu Fassade und Innenwand 0,315 m. Aus den 40 Messstellen mit jeweils über die Höhe verteilten 5 Sensorenpaaren ergaben sich im Raum insgesamt 200 Messpunkte.

Abb. 5-1: Abstände und Abfolge der Messpunkte im Grundriss; dargestellt sind nur die Messpunkte in der Höhe $h=1,70$ m.



An jeder der vierzig Messstellen wurden drei Minuten lang die Messwerte im Sekundentakt aufgenommen. Anschließend wurde die Vorrichtung mit den Sensoren zum nächsten Messpunkt verfahren. Mit dem erneuten Beginn der Messwertaufzeichnung wurde nun zweieinhalb Minuten gewartet. Diese Zeitspanne war erforderlich, damit die Pendelbewegungen der Messvorrichtung abklingen konnten und die Temperatursensoren mit erforderlicher Genauigkeit die neue lokale Temperatur anzeigten.

Abb. 5-2: Messhöhen von Luftgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen.



In [DIN EN ISO 7726] werden Anforderungen an die Dauer von Raumklimamessungen gestellt. Luftgeschwindigkeitsmessungen sollen demnach über mindestens 3 Minuten erfolgen, für die Mittelwertbildung der Lufttemperaturen werden Messzeiträume von mindestens einer Minute gefordert. Ob mit diesen Anforderungen ausreichend genaue Werte erzielt werden können, wurde in Vorversuchen ermittelt. Beispielhaft sind in Abb. 5-3 die Häufigkeitsverteilungen der Luftgeschwindigkeiten bei verschieden langer Messdauer dargestellt (dünne Linien).

Häufigkeit bei einem Messwert je Sekunde

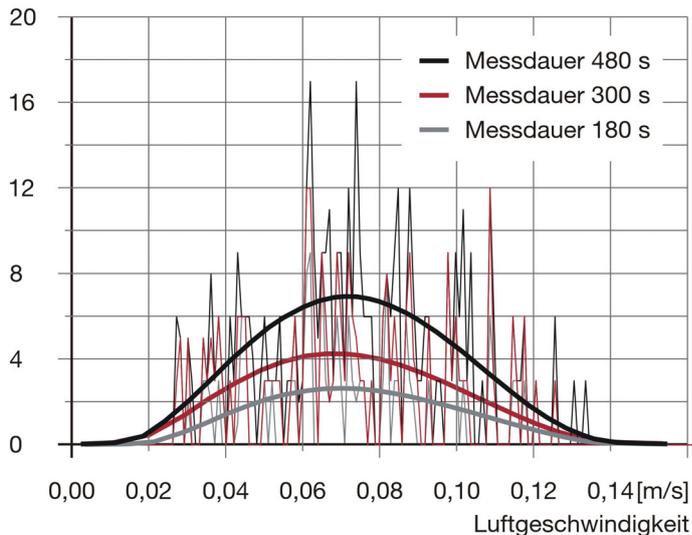


Abb. 5-3: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Luftgeschwindigkeiten bei unterschiedlicher Messdauer; gemessene Werte (dünne Linien) und Interpolationspolynome (dicke Linien).

Durch eine längere Messdauer und der damit verbundenen Erhöhung der Anzahl an Messwerten ist keine signifikante Verbesserung der Messgenauigkeit erkennbar. Die Interpolationspolynome über die Häufigkeitsverteilung der Luftgeschwindigkeiten ergeben mit guter Genauigkeit Normalverteilungen mit identischen Symmetrieachsen. Eine größere Anzahl von Messwerten führt also zu keiner verbesserten Genauigkeit bei der Mittelwertbildung der Raumklimaparameter.

In nachfolgender Tabelle sind nochmals tabellarisch die Mittelwerte, Minima und Maxima sowie die Turbulenzgrade der lokalen Luftgeschwindigkeit bei drei unterschiedlichen Messdauern verglichen.

	Messdauer		
	8 min	5 min	3 min
Mittelwert [m/s]	0,074	0,071	0,074
Minimum [m/s]	0,026	0,026	0,029
Maximum [m/s]	0,133	0,125	0,15
Turbulenzgrad [%]	33,9	34,8	32,5

Tab. 5-1: Extrema, Mittelwerte und Turbulenzgrade der Raumluftströmung bei unterschiedlicher Messdauer.

Nach diesen Vorversuchen wurde deshalb für alle Messpunkte eine Messdauer von 180 Sekunden mit sekundlicher Messwerterfassung festgelegt.

Durch weitere Vorversuche wurde die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bestätigt. An zwei aufeinanderfolgenden Tagen wurde jeweils ein Messdurchgang unter gleichen Randbedingungen durchgeführt. Die Messergebnisse zeigten eine sehr gute Übereinstimmung.

5.3 Umfang der Versuche

Insgesamt wurden etwa einhundert Versuche bei unterschiedlichen Parametervarianten durchgeführt. Die durchgeführten Versuche sind in den folgenden Tabellen aufgelistet, wobei die Zahlen lediglich Ordnungsnummern der Versuche darstellen und sonst keine weitere Bedeutung haben.

Tab. 5-2:
Übersicht der Versuche bei Beheizung über die Zuluft.

$T_A [^{\circ}\text{C}] =$	Zuluftheizung									
	Weitwurfdüse				LowNoise-Ventil			Lochblech-Ventil		
	-6	-11	-16	-26	-6	-11	-16	-6	-11	-16
$V_{\text{Zul.}} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$	87	-	49	26	86	-	48	101	-	81
$V_{\text{Zul.}} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$	30	85	42	-	29	84	41	-	100	43
$V_{\text{Zul.}} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	32	-	45	28	31	-	44	-	-	46
$V_{\text{Zul.}} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$	-	-	47	-	-	-	-	-	-	-

Die Beheizung über die Zuluft ist in Passivhäusern die häufigste Art der Wärmeübergabe. Da per Definition des Passivhausstandards die erforderliche Heizleistung bei dem hygienisch erforderlichen Luftwechsel erbracht werden kann, bedingt die reine Zuluftheizung den geringsten anlagentechnischen Aufwand. Aus diesen Gründen wurden die Versuchsvarianten mit Zuluftheizung umfassend untersucht (Tab. 5-2).

Tab. 5-3:
Übersicht der Versuche bei Beheizung über einen der Heizkörper und Zuluft einbringung mit einem Tellerventil.

$T_A [^{\circ}\text{C}] =$	Tellerventil, Zulufttemperatur 21°C			
	Heizkörper Fassade		Heizkörper Türe	
	-6	-16	-6	-16
$V_{\text{Zul.}} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$	3	9	6	12
$V_{\text{Zul.}} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$	4	10	7	13
$V_{\text{Zul.}} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	5	11	8	14

Da nach den ersten Versuchsserien erkennbar war, dass die Außentemperatur nur einen geringen Einfluß auf die Raumklimagrößen ausübt, wurden alle weiteren Messungen einheitlich bei einer Außentemperatur von -16 °C durchgeführt.

$T_{Zul.} =$	Weitwurfdüse, Außentemperatur -16°C							
	Heizkörper Fassade				Heizkörper Türe			
	21°C	16°C	14°C	12°C	21°C	16°C	14°C	12°C
$V_{Zul.} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$	-	91	92	69	34	99	52	53
$V_{Zul.} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$	89	96	95	80	37	98	55	56
$V_{Zul.} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	20	64	63	-	16	57	58	-
$V_{Zul.} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$	22	-	-	-	24	59	-	-

Tab. 5-4:
Übersicht der Versuche bei Beheizung über einen der Heizkörper und Zuluft einbringung mit der Weitwurfdüse.

Weitwurfdüsen und Tellerventile sind die am häufigsten eingebauten Zuluftventilarten bei Wohnungslüftungsanlagen mit Zu- und Abluft. Bei den meisten Versuchen wurden deshalb diese beiden Ventile eingesetzt.

$T_{Zul.} =$	LowNoise-Ventil, Außentemperatur -16°C							
	Heizkörper Fassade				Heizkörper Türe			
	21°C	16°C	14°C	12°C	21°C	16°C	14°C	12°C
$V_{Zul.} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$	-	90	93	-	33	-	-	-
$V_{Zul.} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$	88	97	94	-	36	-	-	-
$V_{Zul.} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	19	82	83	-	15	-	-	-
$V_{Zul.} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$	21	-	-	-	23	-	-	-

Tab. 5-5:
Übersicht der Versuche bei Beheizung über einen der Heizkörper und Zuluft einbringung mit dem LowNoise-Ventil.

Eine Zulufttemperatur von 12 °C ist bei einer Außentemperatur von -16 °C nur möglich, wenn der Wirkungsgrad des Wärmetauschers bei 75 % oder darunter liegt und keine Vor- oder Nacherwärmung der Zuluft erfolgt. Da die meisten Wärmetauscher in neueren Geräten bereits Wirkungsgrade von 80 % und mehr leisten und außerdem bei sehr niedrigen Außenlufttemperaturen Heizeinrichtungen zum Schutz vor Vereisung des Wärmetauschers aktiviert werden, ist eine derart niedrige Zulufttemperatur kaum zu erwarten. Deshalb wurde nur bei wenigen Versuchen mit Standardluftmengen von 20 und 40 m³/h und mit der Weitwurfdüse (Tab. 5-4) diese Zulufttemperatur eingestellt.

$T_{Zul.} =$	Lochblech-Ventil, Außentemperatur -16°C							
	Heizkörper Fassade				Heizkörper Türe			
	21°C	16°C	14°C	12°C	21°C	16°C	14°C	12°C
$V_{Zul.} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$	-	68	67	-	35	60	-	-
$V_{Zul.} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$	-	66	61	-	38	-	-	-
$V_{Zul.} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	-	65	62	-	39	-	-	-
$V_{Zul.} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$	-	-	-	-	40	-	-	-

Tab. 5-6:
Übersicht der Versuche bei Beheizung über einen der Heizkörper und Zuluft einbringung mit dem Lochblech-Ventil.

In einigen Versuchen wurde im Testraum eine Zuluftmenge von 80 m³/h eingeblasen. Diese Luftmenge entspricht dem Mehrfachen des hygienisch erforderlichen Luftwechsels und besitzt keine praktische Relevanz. Trotzdem wurden diese Versuche für sinnvoll erachtet, um die Grenzen behaglicher Raumklimazustände zu ermitteln.

Tab. 5-7:
Übersicht der Versuche mit
einem Dezentralen Lüftungs-
gerät.

T_A [°C]=	Dezentrales Lüftungsgerät							
	Heizkörper Fassade				Heizkörper Türe			
	-1	-6	-11	-16	-1	-6	-11	-16
$V_{Zul.} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$	-	77	-	-	-	-	-	-
$V_{Zul.} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$	76	73	75	-	71	72	74	70
$V_{Zul.} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$	-	78	-	-	-	-	-	-

Mit dem dezentralen Lüftungsgerät wurden nur 9 Versuche durchgeführt. Ursache dafür war, dass bei den niedrigen Außentemperaturen von -11 und -16 °C teilweise aufgrund des vereisenden Wärmetauschers vom Gerät nur noch reduzierte Luftmengen ausgetauscht wurden. Außerdem führte das Gerät häufig selbsttätig Abtauvorgänge des Wärmetauschers durch. Eine kontrollierte Versuchsdurchführung war aus diesen Gründen dann nicht mehr möglich.

Ein dezentrales Lüftungsgerät dieser Bauart ist in einem Passivhaus nicht einsetzbar. Insbesondere die Forderung einer balancierten Lüftung kann – bei niedrigen Außentemperaturen – nicht eingehalten werden. Aufgrund dieser Erkenntnis wird in der folgenden Versuchsauswertung das dezentrale Lüftungsgerät nicht weiter diskutiert.

6 Darstellung der Versuchsergebnisse und ihre Bewertung

In der nachfolgenden Diskussion der Versuchsergebnisse werden die qualitativen und quantitativen Unterschiede bei den fünf variierten Parametern durch Vergleiche und Gegenüberstellungen einzelnen Versuchen herausgearbeitet. Verglichen werden insbesondere die gemessenen Größen Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur sowie die daraus abgeleiteten Indices Zugluftrisiko und vertikaler Temperaturgradient.

Damit lokale Lufttemperaturen aus verschiedenen Versuchen miteinander besser vergleichbar sind, wurden sämtliche Lufttemperaturen eines Versuches normiert. Als Bezugsebene diente die Ebene 1,10 m über Fußboden. Die dort gemessenen 40 Lufttemperaturen wurden alle um den gleichen Betrag erhöht oder vermindert, so dass die mittlere Temperatur in dieser Ebene 21,0 °C ergab. Um den gleichen Betrag wurden dann die gemessenen Lufttemperaturen der anderen Ebenen angepasst.

6.1 Einfluß der Außentemperatur

Eine Auswirkung sinkender Außentemperatur ist der erhöhte Wärmebedarf im Innenraum. Die erforderlichen Heizleistungen, um die Raumtemperatur auf 21 °C konstant zu halten, sind in Tabelle 6-1 zusammengestellt. Aufgrund der U-Wert-Unterschiede ist der Wärmeverlust über das Fenster trotz eines geringeren Flächenanteils um mehr als das vierfache höher. Behaglichkeits-einbußen sind deshalb insbesondere im Nahbereich vor der Fassade zu erwarten.

	Außentemperatur		
	-1°C	-6°C	-16°C
Wärmeverlust Fenster [W]	67	82	113
Wärmeverlust Wand [W]	19	23	32
Wärmeverlust gesamt [W]	86	105	145

Tab. 6-1:
Berechnete Wärmeverluste über Außenwand und -fenster des Versuchsraums.

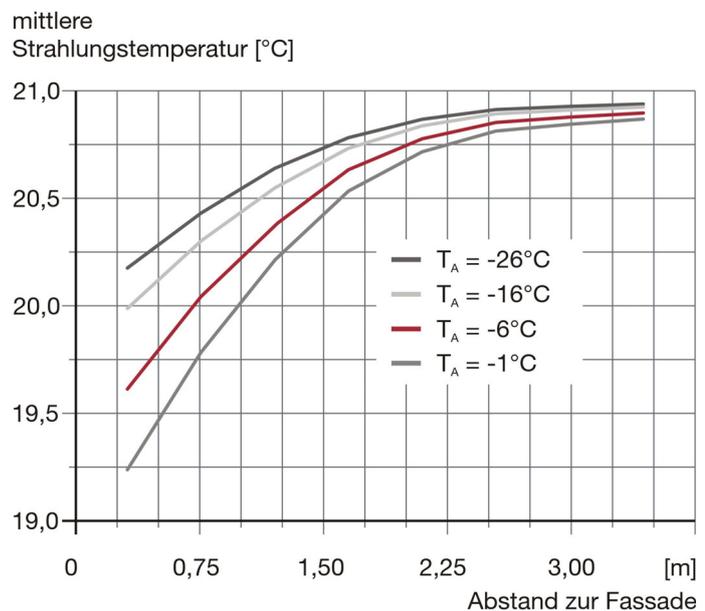
Mit sinkender Außentemperatur nehmen die inneren Oberflächentemperaturen der Außenbauteile ab. Diese wiederum bewirken eine Abkühlung der Raumluft im Nahbereich und einen damit verbundenen Kaltluftabfall. Zusätzlich wirken sich die

Oberflächentemperaturen auf die mittlere Strahlungstemperatur und die vorhandene Strahlungstemperatursymmetrie an sämtlichen Raumpunkten aus.

Der Zusammenhang zwischen der mittleren Strahlungstemperatur und dem Abstand zur Fassade in der Raummittelachse ist in Abb. 6-1 dargestellt. Als Bezugshöhe wurde bei vier unterschiedlichen Außentemperaturen die Ebene 1,10 m über Fußboden gewählt. Die durchschnittliche Lufttemperatur betrug 21 °C bei einer ausschließlichen Beheizung über die Zuluft.

Selbst bei einer Außentemperatur von -16 °C liegt die Strahlungstemperatur im Abstand von 0,30 m mittig vor der Fassade mit etwa 19,5 °C nur um 1,5 K unter der mittleren Raumlufttemperatur.

Abb. 6-1:
Verlauf der Strahlungstemperatur im Versuchsraum zwischen Fassade und Innenwand bei verschiedenen Außentemperaturen. Bezugshöhe ist 1,10 m über Fußboden bei einer mittleren Lufttemperatur von 21 °C.



An gleicher Stelle und bei gleicher Außentemperatur beträgt die Strahlungstemperatursymmetrie knapp 4 K (Abb. 6-2). Im Vergleich zu einem Punkt 0,30 m vor der Außenwand ist die Strahlungstemperatursymmetrie vor dem Fenster zwar um etwa den Faktor 6 höher. Gemäß [DIN EN ISO 7730: 2006] wird eine thermische Unbehaglichkeit erst ab einer Strahlungstemperatursymmetrie von 6 K empfunden (Abb. 3-25).

maximale Strahlungstemperaturasymmetrie [°C]

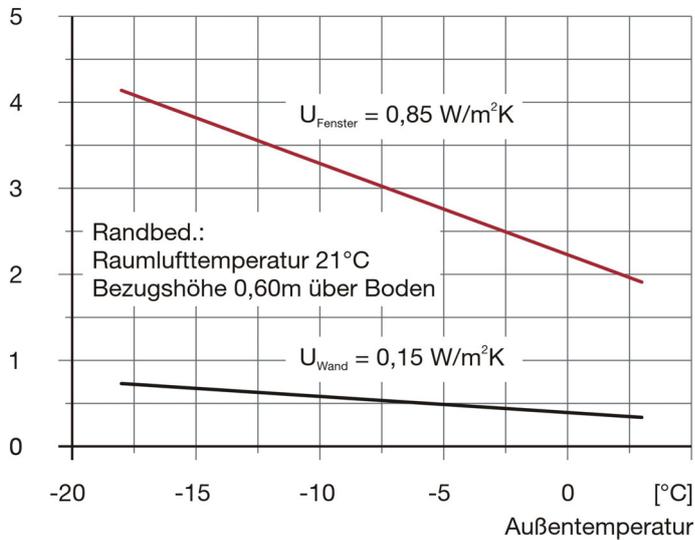


Abb. 6-2: Maximale Strahlungstemperaturasymmetrien im Versuchsraum 0,30 m vor dem Fenster (rote Kurve) bzw. vor der Außenwand (schwarze Kurve) in Abhängigkeit von der Außentemperatur.

Die ersten Versuche haben nur geringe Veränderungen der Raumklimaparameter bei unterschiedlichen Außentemperaturen erkennen lassen. Deswegen wurden die weiteren Messungen bei niedrigen Außentemperaturen von -16 °C und bei einigen wenigen Versuchen auch bei -6 und -11 °C durchgeführt.

Bandbreite der Luftgeschwindigkeiten [m/s]

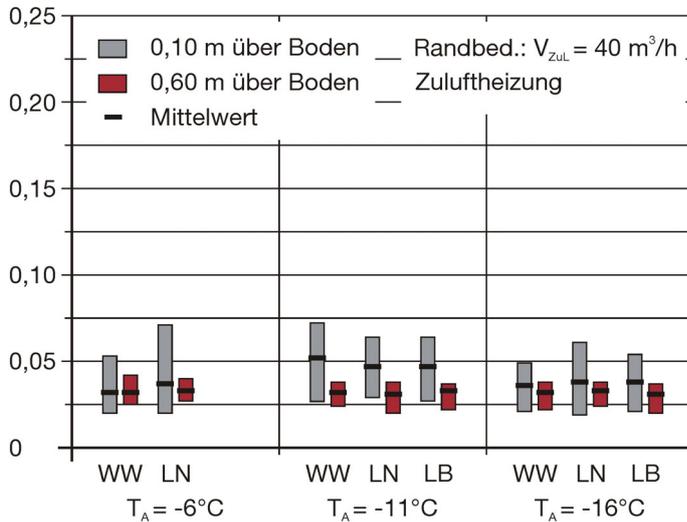
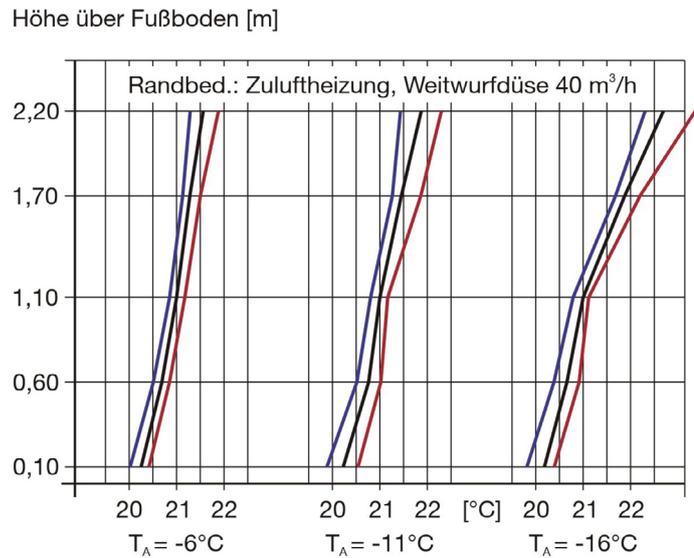


Abb. 6-3: Bandbreite der Luftgeschwindigkeiten in 0,10 m und 0,60 m über Fußboden bei Beheizung über die Zuluft und einer Zuluftmenge von 40 m³/h (WW = Weitwurfdüse, LN = LowNoise-Ventil, LB = Lochblechventil).

Zu vermuten wäre, dass aufgrund des verstärkten Kaltluftabfalls an der Fassade die Luftgeschwindigkeiten in Bodennähe bei sinkenden Außentemperaturen zunehmen müssten. Aus einem Vergleich von Versuchen mit verschiedenen Zuluftventilen bei diesen drei Außentemperaturen (s. Abb. 6.1) ist allerdings kein signifikanter Einfluß erkennbar. Weder die Maxima der gemessenen Luftgeschwindigkeiten noch die Mittelwerte der unteren Messebenen unterscheiden sich entsprechend oben stehender Vermutung.

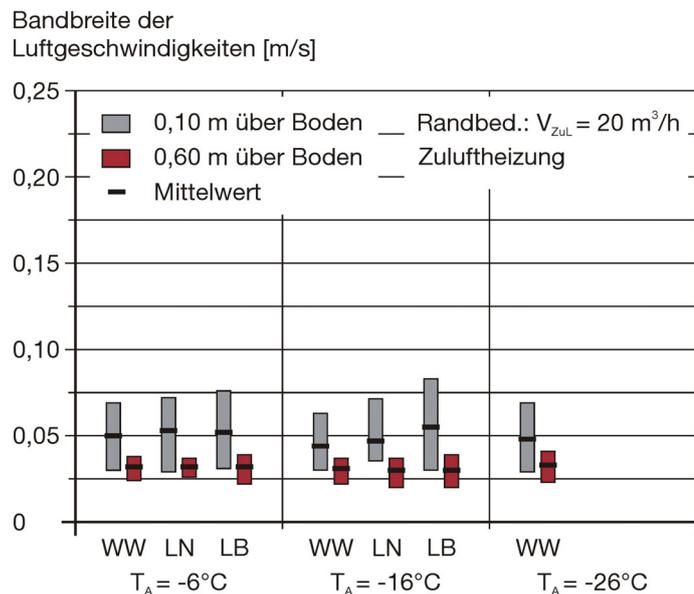
Ein Vergleich der Temperaturschichtung im Raum bei den unterschiedlichen Außentemperaturen zeigt im Bereich bis etwa 1,10 m Höhe kaum Unterschiede. Nur in der oberen Raumhälfte nehmen die Temperaturen zu, da die Zuluft aufgrund der höheren erforderlichen Heizleistung wärmer eingebracht wird. Die maximalen vertikalen Temperaturgradienten von etwa 1,2 K/m im Behaglichkeitsbereich liegen immer noch deutlich unter der Anforderung von höchstens 3 K/m.

Abb. 6-4: Temperaturschichtung über die Raumhöhe bei Beheizung über die Zuluft und einer Zuluftmenge von 40 m³/h (blaue Linien = minimale, schwarze Linien = mittlere, rote Linien = maximale in der Ebene gemessenen Temperaturen).



Um festzustellen, ob äußerst niedrige Außentemperaturen überhaupt die Behaglichkeitsparameter verschlechtern können, wurde bei einer weiteren Versuchsreihe eine Untersuchung bei einer Außentemperatur von -26 °C durchgeführt. Selbst bei diesem Extremfall ist keine nennenswerte Beeinträchtigung im Aufenthaltsbereich erkennbar (Abb. 6-5 und 6-6).

Abb. 6-5: Bandbreite der gemessenen Luftgeschwindigkeiten in 0,10 und 0,60 m über Boden bei variierter Außentemperatur, Beheizung über die Zuluft und einer Zuluftmenge von 20 m³/h bei verschiedenen Zuluftventilen (WW = Weitwurfdüse, LN = LowNoise-Ventil, LB = Lochblechventil).



Bandbreite der vertikalen Temperaturgradienten [K/m]

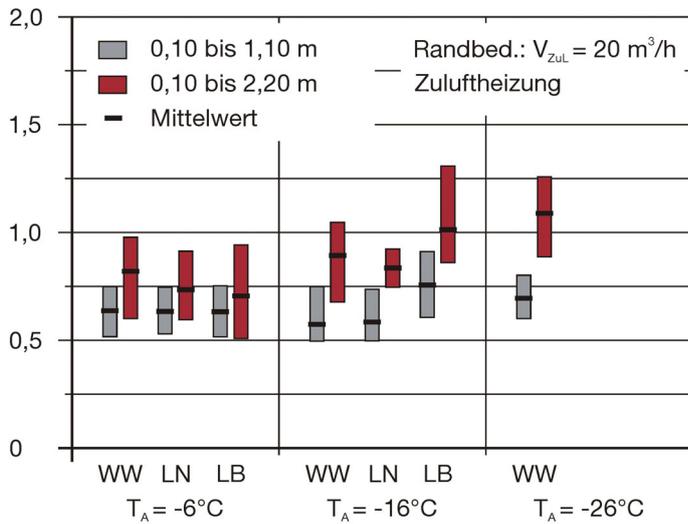


Abb. 6-6: Bandbreite der vertikalen Temperaturgradienten bei variiertem Außentemperatur, Beheizung über die Zuluft und einer Zuluftmenge von $20 \text{ m}^3/\text{h}$ bei verschiedenen Zuluftventilen (WW = Weitwurfdüse, LN = LowNoise-Ventil, LB = Lochblechventil).

6.2 Einfluß von Art und Ort der Wärmeübergabe

In den nachfolgenden drei Grafiken sind die Lufttemperaturverteilungen in den 5 vermessenen Raumebenen bei Beheizung über die Zuluft (Abb. 6-7), über einen Plattenheizkörper an der Innenwand (Abb. 6-8) und neben der Außenfassade (Abb. 6-9) dargestellt. Bei allen drei Varianten beträgt die Zuluftmenge $40 \text{ m}^3/\text{h}$, als Zuluftventil ist die Weitwurfdüse gewählt; die Außentemperatur beträgt -16°C .

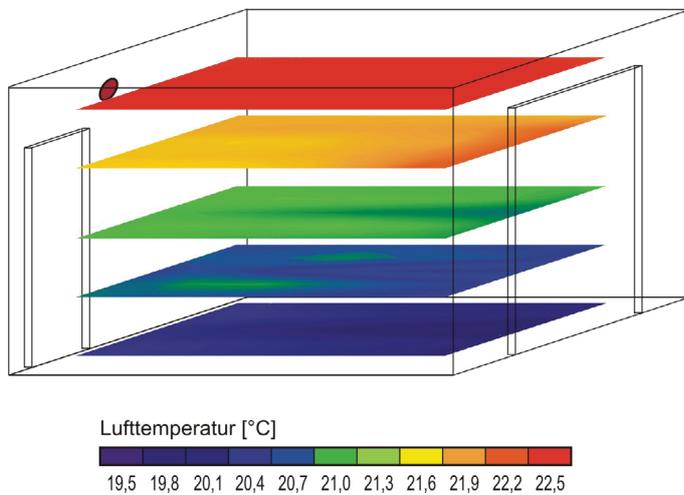
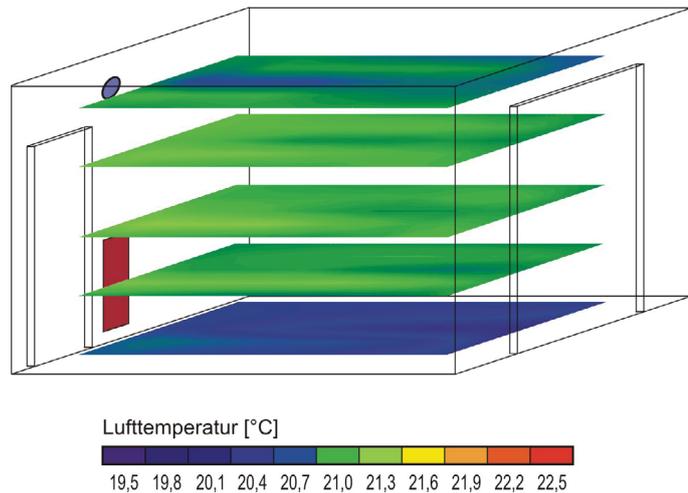


Abb. 6-7: Lufttemperaturverteilung im Raum bei Zuluftheizung; die Zulufttemperatur beträgt etwa 36°C bei $40 \text{ m}^3/\text{h}$ Zuluft über die Weitwurfdüse (Versuch 42).

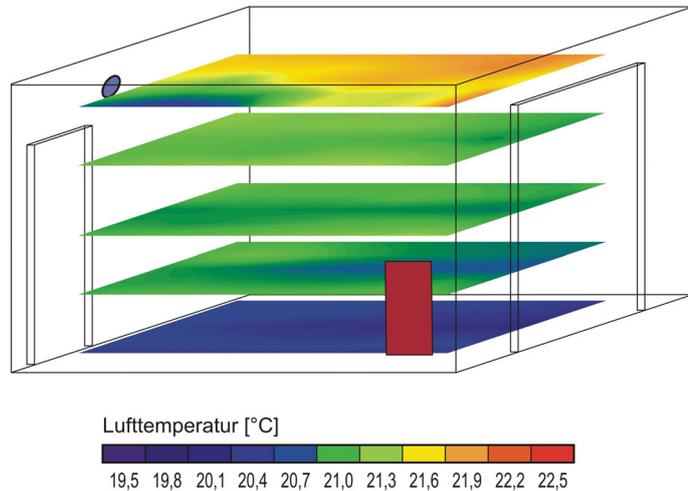
Charakteristisch für den Fall der Beheizung über die Zuluft (Abb. 6-7) ist die annähernd homogen ausgeprägte Temperaturschichtung über die Raumhöhe. Die durchschnittliche Lufttemperatur im Kopfbereich einer stehenden Person in 1,70 m Höhe beträgt 21,9 °C, im Bodenbereich 20,1 °C. Im Vergleich der drei Beheizungsvarianten treten bei der Zuluftheizung die höchsten vertikalen Temperaturgradienten auf. Diese liegen aber immer noch weit im unkritischen Bereich.

Abb. 6-8:
Lufttemperaturverteilung im Raum bei Beheizung über den Heizkörper an der Innenwand; Zulufttemperatur 16 °C (Versuch 98).



Am gleichmäßigsten ist die Temperaturverteilung bei einem Heizkörper an der Innenwand. Durch die Vermischung der untertemperierten Zuluft mit der vom Heizkörper aufsteigenden Warmluft erfolgt eine gute Wärmeverteilung im Raum (Abb. 6-8).

Abb. 6-9:
Lufttemperaturverteilung im Raum bei Beheizung über den Heizkörper neben der Fassade; Zulufttemperatur 16 °C (Versuch 96).



Durch die Anordnung des Heizkörpers neben der Fassade wird die Wärme weniger gut im Raum verteilt. Unter der Decke entsteht ein Wärmepolster, aufgrund der geringen zugeführten Wärmeleistung beträgt die Temperaturerhöhung dort aber nur etwa 1 K gegenüber der Heizkörpervariante an der Rückwand. Behaglichkeitsrelevant ist diese höhere Temperatur nicht, da es sich nur um einen kleinen Bereich unterhalb der Decke und damit außerhalb des Aufenthaltsbereichs handelt.

Bandbreite der vertikalen Temperaturgradienten [K/m]

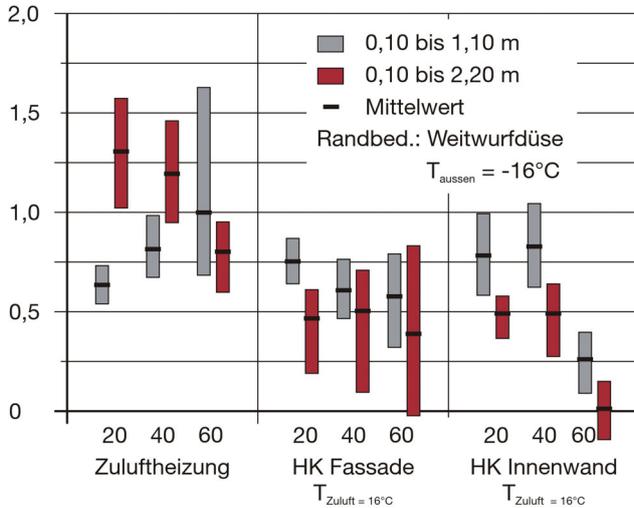


Abb. 6-10: Einfluß der Beheizung auf den vertikalen Temperaturgradienten bei Zuluftmengen von 20, 40 und 60 m³/h; Zulufttemperatur 16 °C bei Beheizung über Heizkörper.

Zusammenfassend sind in Abb. 6-10 die vertikalen Temperaturgradienten bei den drei untersuchten Beheizungsvarianten und Zuluftmengen von 20, 40 und 60 m³/h dargestellt. Im Fall der Beheizung über einen der Plattenheizkörper wird die Zuluft mit 16 °C eingeblasen.

Bandbreite der Luftgeschwindigkeiten [m/s]

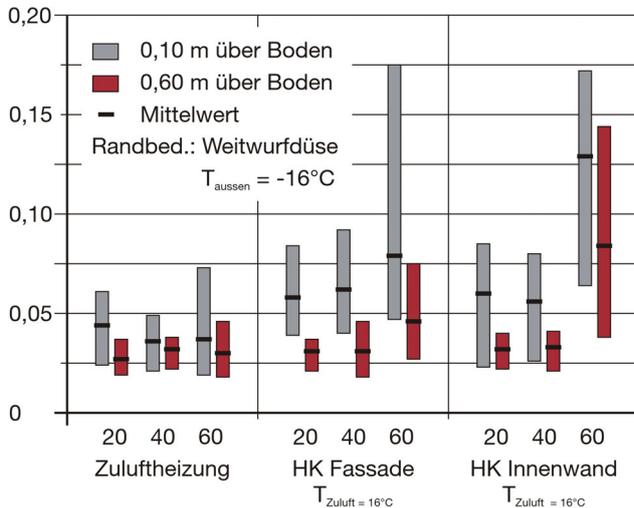


Abb. 6-11: Einfluß der Beheizung auf die Luftgeschwindigkeiten in 0,10 und 0,60 m über Fußboden bei Zuluftmengen von 20, 40 und 60 m³/h, Zulufttemperatur 16 °C bei Beheizung über Heizkörper.

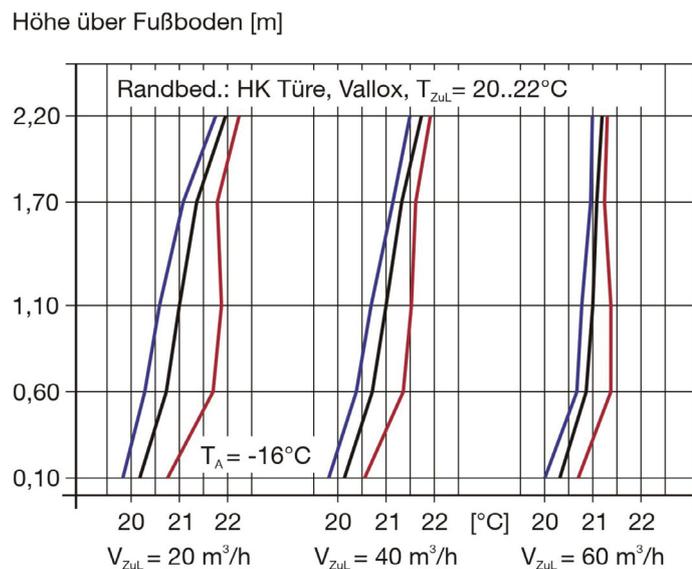
In [DIN EN ISO 7730: 1995] werden für das höhenmäßige Gefälle der Lufttemperatur zwischen 0,10 und 1,10 m oberhalb des Fußbodens weniger als 3 K gefordert. Alle drei Varianten der Beheizung erfüllen diese Bedingung. Sowohl Mittel- als auch Maximalwerte der Temperaturgradienten überschreiten bei keiner der Beheizungsvarianten 1,0 K/m; lediglich die Variante Zuluftheizung bei einer Zuluftmenge von 60 m³/h weist lokale Gradientenmaxima bis knapp 1,7 K/m auf.

Die gemessenen Luftgeschwindigkeiten sind bei den für die Testraumgröße sinnvollen Luftmengen von 20 und 40 m³/h deutlich unter 0,10 m/s und damit unkritisch. Im Vergleich zu den Heizkörpervarianten treten bei der Zuluftheizung niedrigere Luftgeschwindigkeiten auf.

6.3 Einfluß der Zuluftmenge

Aus den Messergebnissen sind bei verschiedenen Zuluftmengen abhängig von der Beheizung unterschiedliche Aussagen ableitbar. So wird bei der Zuluftheizung der Temperaturgradient im Bereich zwischen 0,10 m und 1,10 m mit steigender Zuluftmenge größer (Abb. 6-10). Betrachtet man die gesamte Raumhöhe, wird der Temperaturgradient kleiner. Erfolgt die Beheizung über den Heizkörper im Fassadenbereich, sinkt der mittlere Temperaturgradient minimal bei zunehmendem Volumenstrom; beim Betrieb eines Heizkörpers an der Innenwand ist eine wesentlich stärkere Abnahme des Temperaturgradienten zu beobachten.

Abb. 6-12:
Temperaturschichtung über die Raumhöhe bei Beheizung über den Heizkörper neben der Türe und einer Zulufttemperatur in Höhe der Raumlufthöhe (blaue Linien = minimale, schwarze Linien = mittlere, rote Linien = maximale in der Ebene gemessenen Temperaturen).



Die drei Linien je Versuch stellen die minimalen (blau), mittleren (schwarz) und maximalen (rot) Lufttemperaturen in den vermessenen Raumebenen dar (Abb. 6-12). Bei höheren Luftvolumenströmen tritt eine Verringerung des Temperaturgradienten über die Raumhöhe auf. Die intensivere Durchmischung der Raumluft aufgrund der erhöhten Zuluftgeschwindigkeit vermindert die Temperaturschichtung. Grundsätzlich ist noch zu beobachten, dass Luftvolumenströme über 40 m³/h zu einer deutlich höheren Luftbewegung insbesondere im Bodenbereich führen (Abb. 6-13, Abb. 6-14).

Höhe über Fußboden [m]

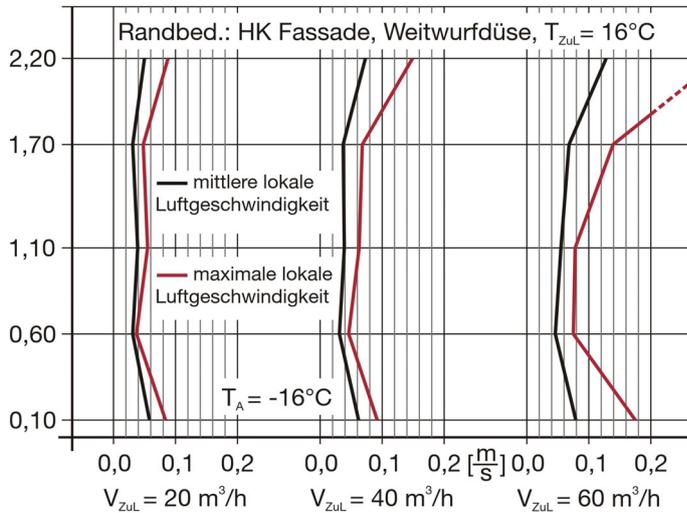


Abb. 6-13: Vertikale Profile der mittleren und maximalen lokalen Luftgeschwindigkeiten bei Zuluftmengen von 20, 40 und 60 m³/h und Beheizung über den Heizkörper an der Fassade.

Höhe über Fußboden [m]

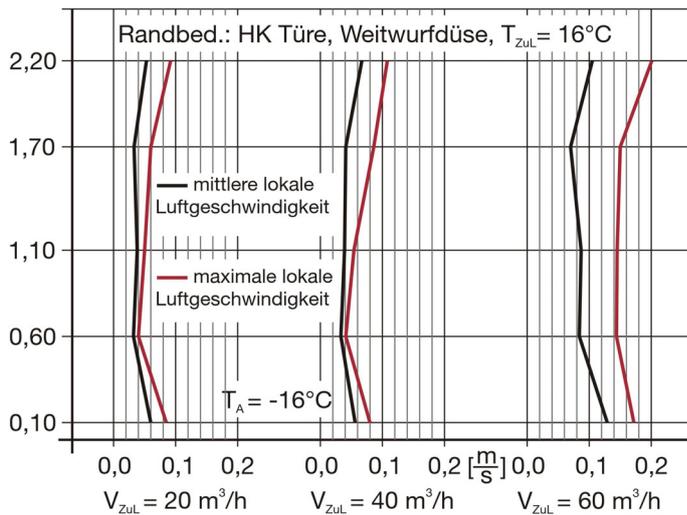
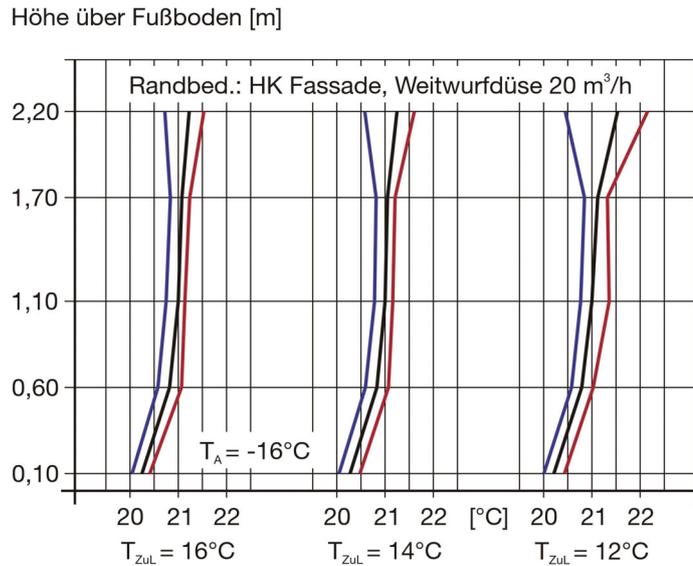


Abb. 6-14: Vertikale Profile der mittleren und maximalen lokalen Luftgeschwindigkeiten bei Zuluftmengen von 20, 40 und 60 m³/h und Beheizung über den Heizkörper an der Innenwand.

6.4 Einfluß der Zulufttemperatur

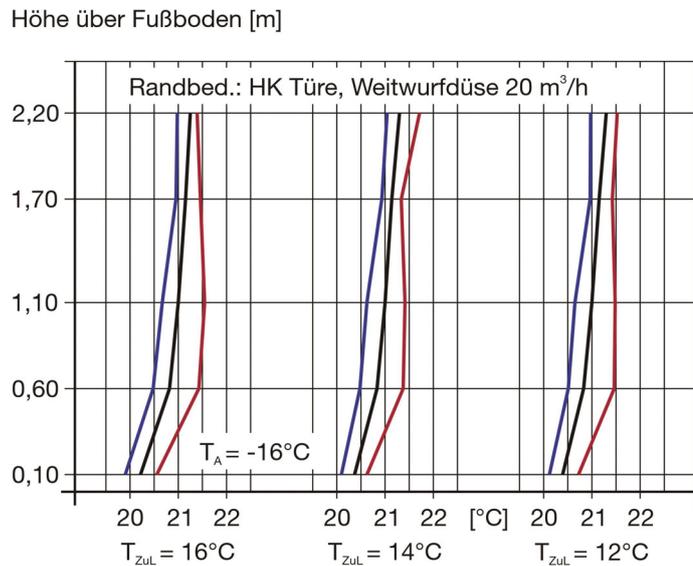
Bei dieser Messreihe wurde die Auswirkung unterschiedlicher Zulufttemperaturen auf die Raumklimaparameter untersucht. Die Messungen wurden bei Zulufttemperaturen von 12, 14 und 16 °C durchgeführt. Aus nachfolgender Grafik ist erkennbar, dass niedrigere Zulufttemperaturen zu geringeren Temperaturgradienten in vertikaler Richtung führen. Bei einer Zulufttemperatur von 12 °C wurden an einigen singulären Stellen sogar negative Temperaturgradienten gemessen (bei Betrachtung über die gesamte Raumhöhe).

Abb. 6-15:
Vertikale Temperaturprofile bei Zulufttemperaturen von 16, 14 und 12 °C und Beheizung über den Heizkörper an der Fassade (blaue Linien = minimale, schwarze Linien = mittlere, rote Linien = maximale in der Ebene gemessenen Temperaturen).



Die drei Linien je Versuch stellen die minimalen (blau), mittleren (schwarz) und maximalen (rot) Temperaturen in den jeweiligen Raumebenen dar (Abb. 6-15, Abb. 6-16).

Abb. 6-16:
Vertikale Temperaturprofile bei Zulufttemperaturen von 16, 14 und 12 °C und Beheizung über den Heizkörper an der Innenwand (blaue Linien = minimale, schwarze Linien = mittlere, rote Linien = maximale in der Ebene gemessenen Temperaturen).



In den nächsten drei Abbildungen sind die Lufttemperaturschichtungen dargestellt, die sich bei einem Heizkörper an der Rückwand und einer Zuluftmenge von 40 m³/h bei den Zulufttemperaturen von 16, 14 und 12 °C einstellen. Als Schlussfolgerung kann die Aussage getroffen werden, dass die Zulufttemperatur nur einen geringen Einfluss auf die Temperaturschichtungen im Raum ausübt. Diese Aussage gilt sowohl bei den beiden unterschiedlichen Heizkörperanordnungen als auch bei verschiedenen Zuluftmengen.

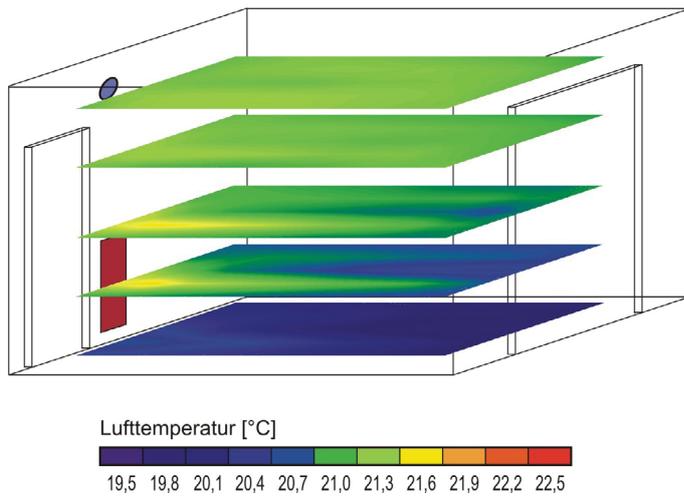


Abb. 6-17:
Lufttemperaturverteilung im Raum bei Beheizung über den Heizkörper an der Innenwand; Zulufttemperatur 16 °C (Versuch 98).

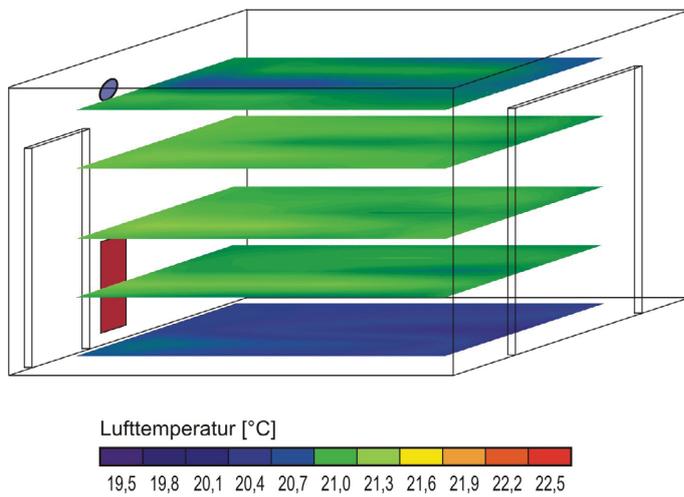


Abb. 6-18:
Lufttemperaturverteilung im Raum bei Beheizung über den Heizkörper an der Innenwand; Zulufttemperatur 14 °C (Versuch 55).

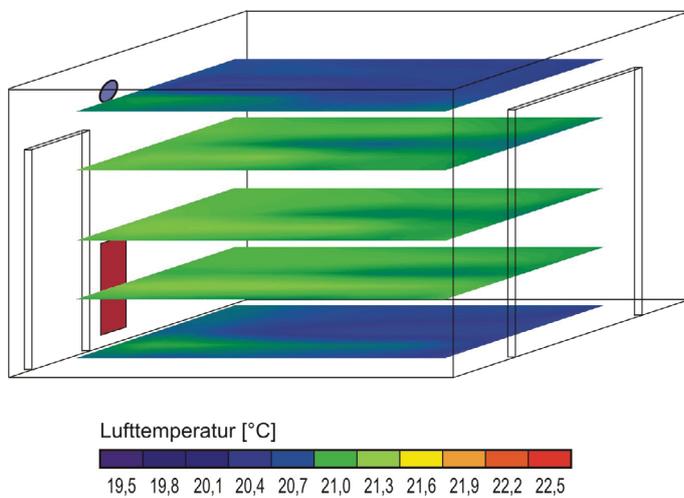


Abb. 6-19:
Lufttemperaturverteilung im Raum bei Beheizung über den Heizkörper an der Innenwand; Zulufttemperatur 12 °C (Versuch 56).

Die folgenden drei Abbildungen zeigen das Zugluftrisiko DR in vertikalen Raumschnitten in Raummitte senkrecht zur Fassade und in der Ebene 0,10 m über Boden bei einer Zuluftmenge von 40 m³/h. Deutlich erkennbar ist der Anstieg des Zugluftrisikos bei sinkender Zulufttemperatur insbesondere im Bodenbereich und in Fassadennähe. Die Auswirkungen dieses Effektes sind umso ausgeprägter, je niedriger die Zulufttemperatur gewählt wird.

Abb. 6-20:
Einfluß der Zulufttemperatur auf das Zugluftrisiko in einer Höhe von 0,10 m über Fußboden und in einem Vertikalschnitt in Raummitte bei einer Zulufttemperatur von 16 °C.

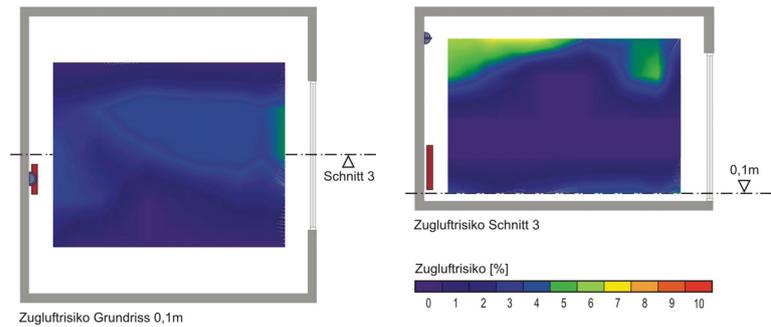


Abb. 6-21:
Einfluß der Zulufttemperatur auf das Zugluftrisiko in einer Höhe von 0,10 m über Fußboden und in einem Vertikalschnitt in Raummitte bei einer Zulufttemperatur von 14 °C.

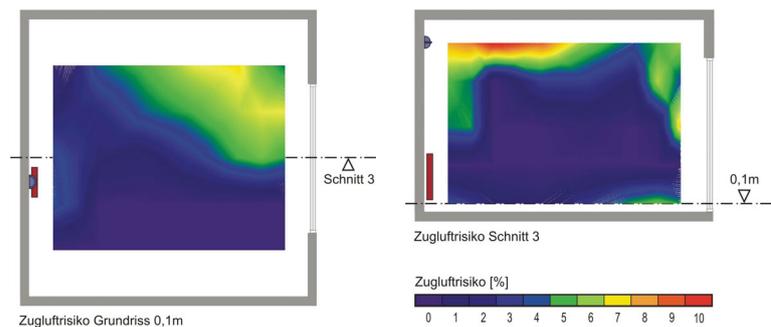
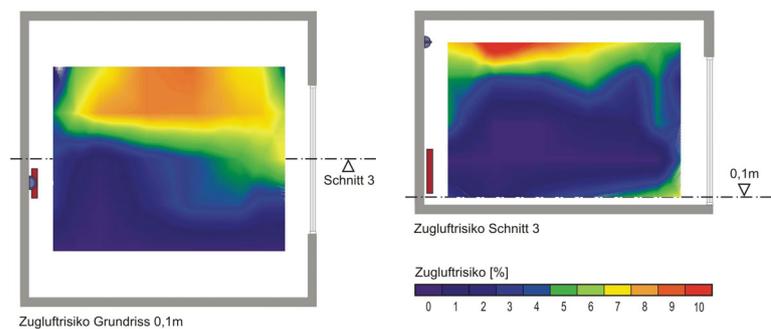


Abb. 6-22:
Einfluß der Zulufttemperatur auf das Zugluftrisiko in einer Höhe von 0,10 m über Fußboden und in einem Vertikalschnitt in Raummitte bei einer Zulufttemperatur von 12 °C.



6.5 Einfluß des Zuluftventils

Die drei untersuchten Zuluftventile unterscheiden sich in ihrer Ausblasrichtung und der Form des Zuluftstrahls. Durch die Weitwurfdüse und das Lochblech-Ventil wird die Zuluft horizontal in den Raum eingeblasen, wobei sich der Zuluftstrahl der Weitwurfdüse in einem Winkel von etwa 150° im Raum ausbreitet.

Durch das Lochblech-Ventil wird ein Zuluftkegel mit einem Öffnungswinkel von etwa 30° ausgebildet. Beim Tellerventil tritt die Zuluft seitlich und nach oben an der Wand entlang aus. Ein Ausströmen der Luft nach unten wird durch ein integriertes Luftleitblech verhindert.

Bandbreite der vertikalen Temperaturgradienten [K/m]

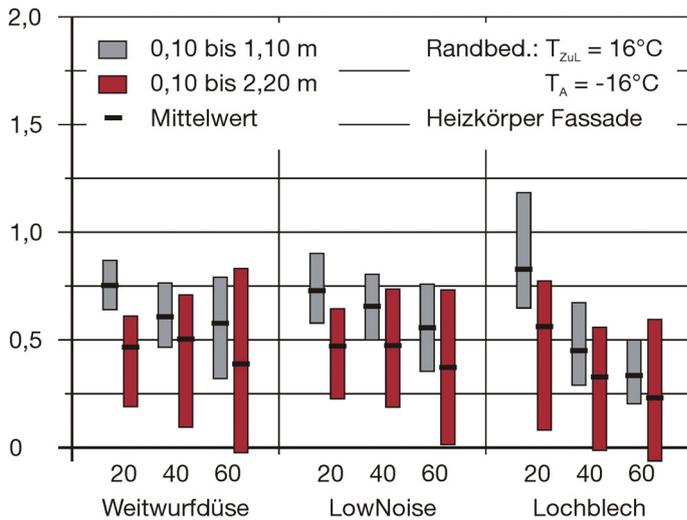


Abb. 6-23: Bandbreite der vertikalen Temperaturgradienten bei Beheizung über einen Heizkörper neben der Fassade und einer Zulufttemperatur von 16 °C.

In den Abbildungen 6-23 und 6-24 sind für die untersuchten Ventile vertikale Temperaturgradienten sowie Luftgeschwindigkeiten in 0,10 m und 0,60 m Höhe bei unterschiedlichen Zuluftmengen gegenüber gestellt. Trotz der unterschiedlichen Lufteinströmungen und Strahlformen sind im Aufenthaltsbereich keine wesentlichen Unterschiede erkennbar. Untersuchungen bei veränderter Heizkörperanordnung, Beheizung über die Zuluft oder geänderten Zulufttemperaturen bestätigen diese Erkenntnis.

Bandbreite der Luftgeschwindigkeiten [m/s]

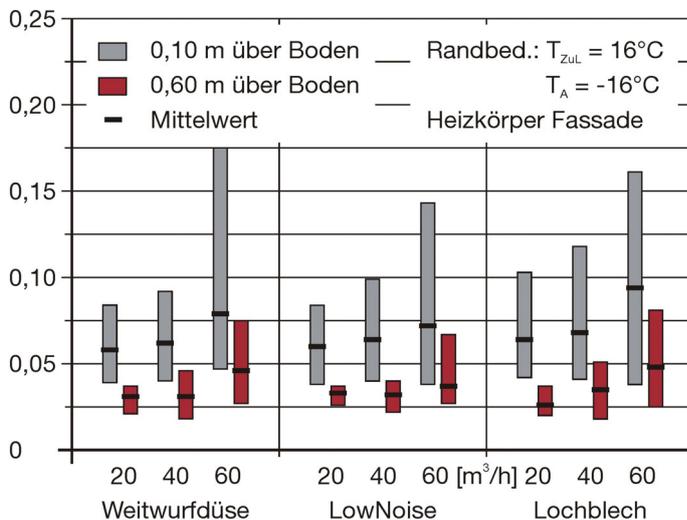


Abb. 6-24: Bandbreite der Luftgeschwindigkeiten in 0,10 m und 0,60 m über Fußboden bei Beheizung über einen Heizkörper neben der Fassade und einer Zulufttemperatur von 16 °C.

Nachfolgende Thermografieaufnahmen zeigen eine Weitwurfdüse (Abb. 6-24) und ein Tellerventil (Abb. 6-25) in gleicher Einbausituation bei identischen Randbedingungen. Die Beheizung erfolgt über die Zuluft, wobei die Zulufttemperatur jeweils etwa 18 K über der Raumlufthtemperatur liegt. Im unteren Bild werden die das Ventil umgebenden Wand- und Deckenbereiche durch das Tellerventil mit der warmen Zuluft angeblasen. Die Oberflächentemperaturen sind in diesem Bereich gegenüber der durchschnittlichen Wandtemperatur um bis zu 8 K höher. Bei Verwendung einer Weitwurfdüse (oberes Bild) ist dieser Effekt wesentlich schwächer ausgeprägt; hier wurde eine maximale Erhöhung der Oberflächentemperaturen von etwa 4 K gemessen, außerdem ist die erwärmte Wandfläche erheblich kleiner.

Abb. 6-25:
Thermografieaufnahme der umgebenden Wand-/Deckenoberflächen bei Zulufttheizung mit der Weitwurfdüse.

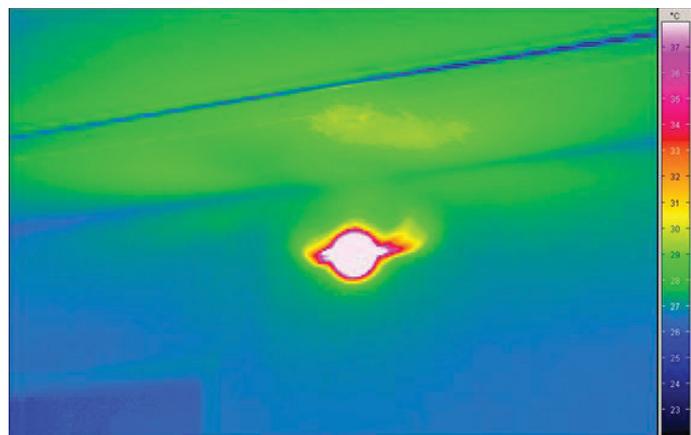
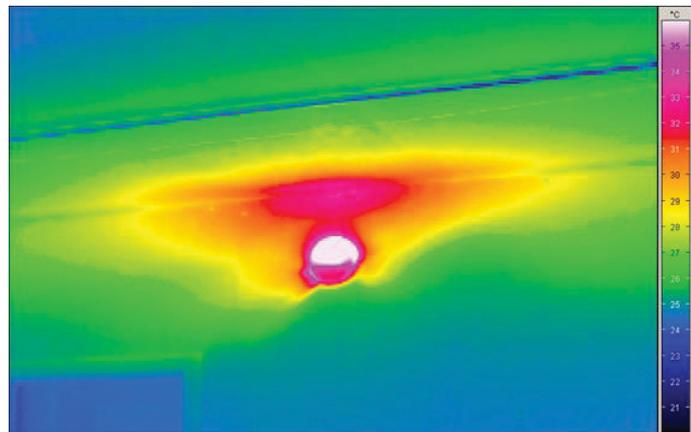


Abb. 6-26:
Thermografieaufnahme der umgebenden Wand-/Deckenoberflächen bei Zulufttheizung und LowNoise-Ventil.



Bei der Beheizung über die Zuluft wird die Heizwärme folglich nicht ausschließlich konvektiv im Raum verteilt. Durch ein Zuluftventil, das entlang einer Wand oder der Decke einbläst, wird über die Erwärmung dieser Bauteiloberflächen ein Teil der Heizwärme über Strahlung im Raum verteilt.

7 Parameterbewertung

Nachfolgend werden die fünf in den Messreihen variierten Parameter Außentemperatur, Wärmeübergabe, Zuluftmenge, Zulufttemperatur und Ventilbauform qualitativ sowie quantitativ bewertet und ganzheitlich miteinander verglichen. Als Bewertungsmassstäbe werden das vorausgesagte mittlere Votum PMV und der daraus abgeleitete vorausgesagte Prozentsatz Unzufriedener sowie das Zugluftrisiko DR verwendet.

7.1 Sensitivitätsuntersuchung des PMV-Modells

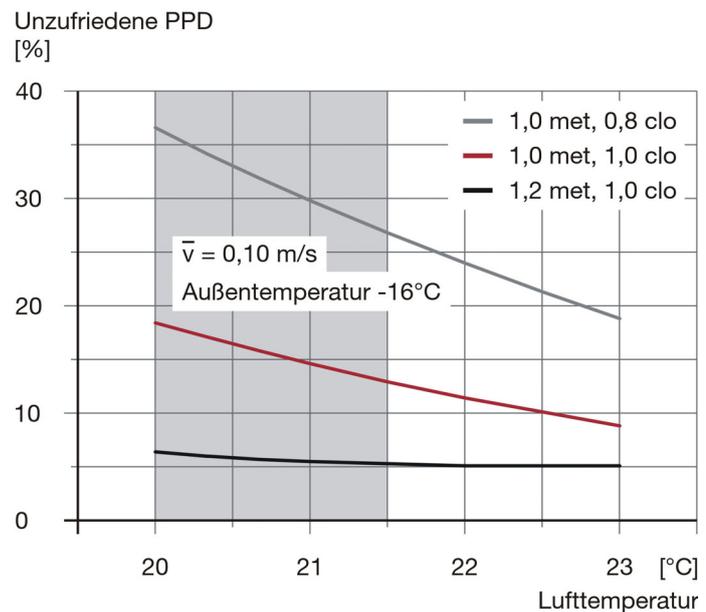
In die Berechnung der durchschnittlichen Klimabeurteilung fließen der Isolationswert der Bekleidung, der Energieumsatz aufgrund körperlicher Tätigkeit und die Umgebungsparameter Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftfeuchte und mittlere Strahlungstemperatur ein. Aus dieser Klimabeurteilung kann der Anteil an Personen ermittelt werden, die mit dem Umgebungs-klima unzufrieden sein werden. Im Folgenden wird analysiert, wie sich der Einfluß der genannten sechs Parameter auf die berechnete Unzufriedenheitsrate PPD auswirkt. Als Standard für den Dämmwert der Bekleidung bei Winterbedingungen wird der Wert 1,0 clo nach [DIN EN ISO 7730: 2006] verwendet; der angenommene Aktivitätsgrad von 1,0 met entspricht einer entspannt sitzenden Person. Für die relative Luftfeuchtigkeit wird in allen Berechnungen 50 % relative Feuchte angesetzt. Die baulichen Randbedingungen wurden in den nachfolgenden Betrachtungen von dem Passivhaus-Testraum übernommen. Der Einfluß der Außentemperatur auf die mittlere Strahlungstemperatur im Raum wurde dabei rechnerisch ermittelt.

In Abb. 7-1 wird der Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und dem zu erwartenden Prozentsatz an Personen, die mit ihrem Umgebungs-klima unzufrieden sind, aufgezeigt. Zum Vergleich sind drei Kombinationen von Aktivitätsgrad und Bekleidungs-faktor gegenübergestellt. Als weitere Randbedingung ist eine mittlere Luftgeschwindigkeit von 0,10 m/s angesetzt. Bei den praxisrelevanten Versuchen wurden lokal Luftgeschwindigkeiten bis etwa 0,12 m/s gemessen, über den Aufenthaltsbereich gemittelt lagen die durchschnittlichen Luftgeschwindigkeiten bei 0,04 m/s. Der Ansatz mit 0,10 m/s stellt daher mehr eine Worst-Case- als eine Mittelwertbetrachtung dar. Allerdings wirken sich Luftgeschwindigkeiten unter 0,10 m/s so gut wie nicht auf die Berechnung des PPD aus (s. Abb. 7-2).

Die Spanne der gemessenen Temperaturen im Aufenthaltsbereich lag zwischen 20,0 und 21,5 °C (Abb. 7-1, grau hinterlegter Bereich). Mit den zuvor definierten Randbedingungen errechnet sich für den durch die rote Kurve gekennzeichneten Standardfall ein PPD zwischen 13 und 18 %. Ein etwas höherer Aktivitätsgrad – der schwarzen Kurve liegt ein Aktivitätsgrad von

1,2 met zugrunde, das entspricht einer leichten sitzenden Tätigkeit – vermindert die Rate an Unzufriedenen auf ungefähr ein Drittel. Wird dagegen der Isolationswert der Kleidung um 0,20 clo reduziert, das entspricht einem dünnen Pullover, verdoppelt sich der Anteil Unzufriedener (Abb. 7-1, graue Kurve).

Abb. 7-1:
Rechnerischer Einfluß der Lufttemperatur auf den Prozentsatz Unzufriedener PPD bei einer mittleren Luftgeschwindigkeit von 0,10 m/s, einer Außentemperatur von -16 °C und verschiedenen Aktivitäts- und Bekleidungsgraden; die bauliche Qualität entspricht Passivhaus-Standard. Grau hinterlegt ist der Bereich der in den Versuchen gemessenen Lufttemperaturen.



Der Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf den zu erwartenden Prozentsatz Unzufriedener ist in Abb. 7-2 dargestellt. Als Randbedingungen sind eine Lufttemperatur von 21 °C und Strahlungstemperatureinflüsse infolge einer Außentemperatur von -16 °C gegeben. Der grau hinterlegte Bereich stellt das Spektrum der in sämtlichen Versuchen gemessenen Luftgeschwindigkeiten bis etwa 0,125 m/s dar. Betrachtet man die rote Kurve als Standardfall für Winterbedingungen, variiert der PPD aufgrund lokal unterschiedlicher Luftgeschwindigkeiten gerade mal zwischen etwa 14 und 17 %, relativ ausgedrückt um +/- 10 % vom Durchschnittswert. Ein etwas höherer Aktivitätsgrad von 1,2 met, das entspricht einer leichten sitzenden Tätigkeit, reduziert die Rate an Unzufriedenen auf ungefähr ein Drittel. Wird dagegen der Isolationswert der Kleidung um 0,20 clo reduziert, das entspricht einem dünnen anstatt einem dicken Pullover, verdoppelt sich der Anteil Unzufriedener (Abb. 7-2).

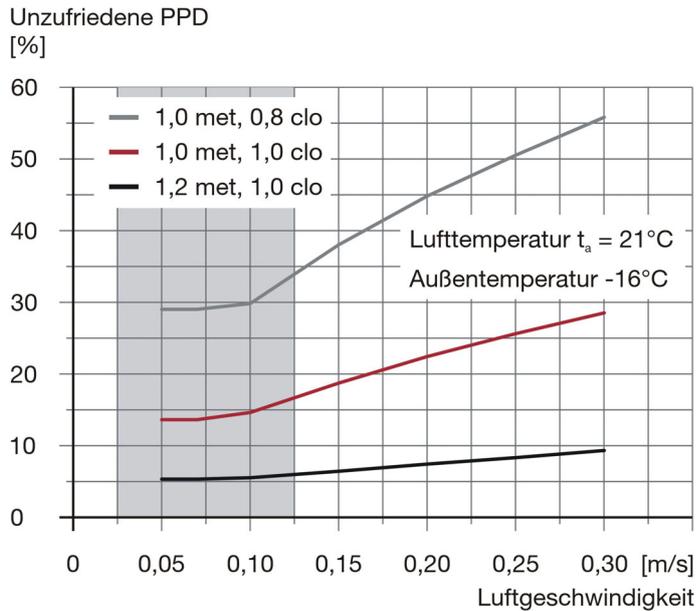


Abb. 7-2: Rechnerischer Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf den Prozentsatz Unzufriedener PPD bei einer Lufttemperatur von $21,0^\circ\text{C}$, einer Außentemperatur von -16°C und verschiedenen Aktivitäts- und Bekleidungsgraden; die bauliche Qualität entspricht Passivhaus-Standard. Grau hinterlegt ist der Bereich der in den Versuchen gemessenen Luftgeschwindigkeiten.

In Abhängigkeit von dem Dämmstandard der Fassadenbauteile und der Außentemperatur werden die Strahlungstemperaturen im Raum beeinflusst. Für einen Aktivitätsgrad von 1,0 met, einem Bekleidungsfaktor von 1,0 clo, einer Luftgeschwindigkeit von 0,10 m/s und einer Lufttemperatur von $21,0^\circ\text{C}$ ist dieser Zusammenhang in Abbildung 7-3 dargestellt. Die Kurven stellen die Mittelwerte der Strahlungstemperaturen im Aufenthaltsbereich eines Referenzraumes mit Passivhaus- und EnEV-Standard sowie mit Bestandsniveau dar. Dieser in den Berechnungen gewählte Referenzraum ist in Geometrie und Abmessungen identisch mit dem Messraum.

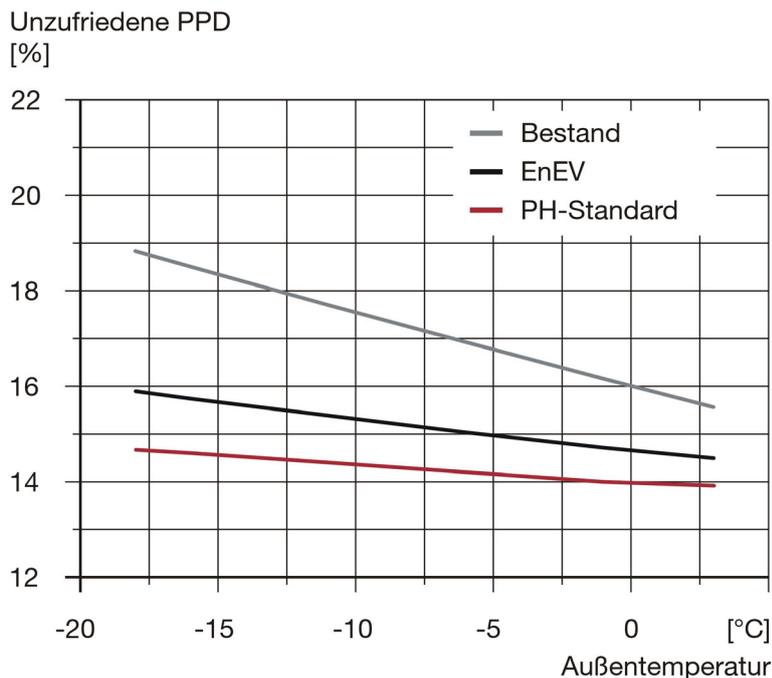
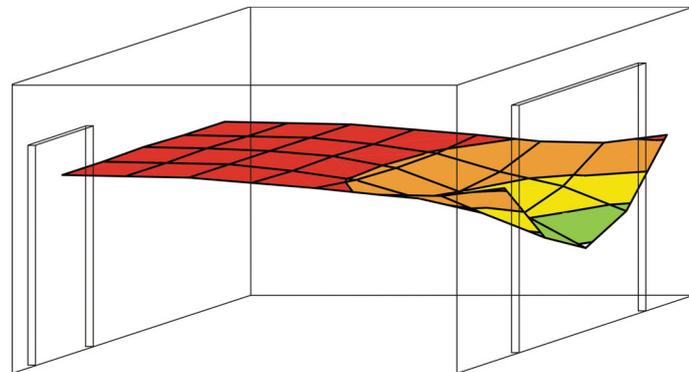


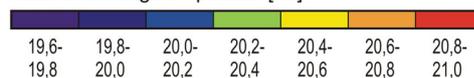
Abb. 7-3: Rechnerischer Einfluß der Außentemperatur auf den zu erwartenden Prozentsatz Unzufriedener PPD bei verschiedenen baulichen Standards.

Mit zunehmender Qualität des Dämmstandards sinkt der Einfluß des Außenklimas auf den vorhergesagten Prozentsatz Unzufriedener (Abb. 7-3). Im Beispiel mit Passivhaus-Standard verändert sich der Mittelwert des PPD bei Außentemperaturen zwischen +3 °C und -16 °C um weniger als ein Prozent. Bei Bestandsgebäuden ist diese absolute Änderung etwa dreimal so hoch.

Abb. 7-4:
Berechnete Strahlungstemperaturverteilung im Grundriss des Messraums in einer Höhe von 0,60 m über Fußboden bei einer Außentemperatur von -1 °C und Beheizung über die Zuluft.

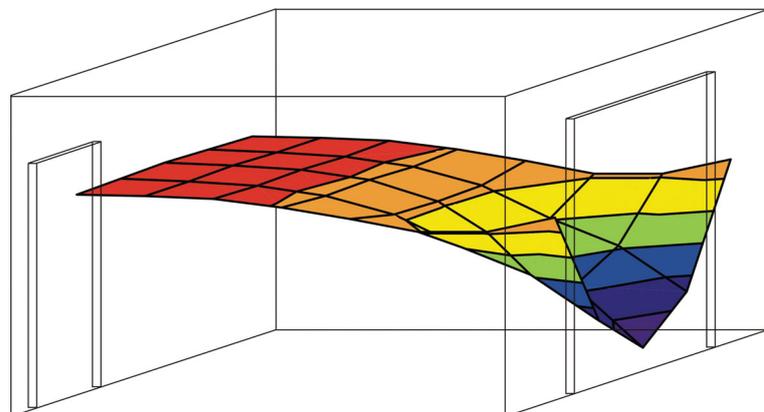


Mittl. Strahlungstemperatur [°C]

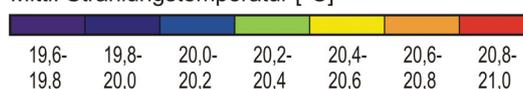


In den Abbildungen 7-4 und 7-5 sind für den Referenzraum in Passivhaus-Standard die Strahlungstemperaturverteilungen im Raum bei Außentemperaturen von -1 °C und -16 °C dargestellt. Während die Strahlungstemperaturen in der inneren Raumhälfte annähernd gleich bleiben, sinken sie bei niedrigerer Außentemperatur in Fensternähe stärker ab. Bei schlechteren Dämmstandards ist dieser Effekt deutlich ausgeprägter, da sich die innenseitigen Oberflächentemperaturen der Außenbauteile indirekt proportional zum U-Wert dieser Bauteile verhalten und infolge dessen die Strahlungstemperaturen insbesondere nahe dieser Außenbauteile sinken.

Abb. 7-5:
Berechnete Strahlungstemperaturverteilung im Grundriss des Messraums in einer Höhe von 0,60 m über Fußboden bei einer Außentemperatur von -16 °C und Beheizung über die Zuluft.



Mittl. Strahlungstemperatur [°C]



Bei einer Außentemperatur von -16 °C beträgt die Oberflächentemperatur eines Fensters in Passivhaus-Qualität mit einem U-Wert im eingebauten Zustand von $0,85\text{ W/m}^2\text{K}$ bei einer Raumlufttemperatur von $21,0\text{ °C}$ noch $17,1\text{ °C}$. Für einen Punkt im Abstand von $0,30\text{ m}$ mittig vor diesem Fenster errechnet sich daraus eine mittlere Strahlungstemperatur von $19,6\text{ °C}$ (Abb. 7-5). Dieses vereinfachte Rechenbeispiel erklärt, warum selbst bei sehr niedrigen Außentemperaturen die Bandbreite des PPD im Aufenthaltsbereich eines Raumes klein ist (Abb. 7-6). Im Auslegungsfall bei -16 °C Außentemperatur liegen die lokalen PPD-Werte zwischen $13,6$ und $18,5\text{ %}$, der Mittelwert wurde mit $14,6\text{ %}$ errechnet.

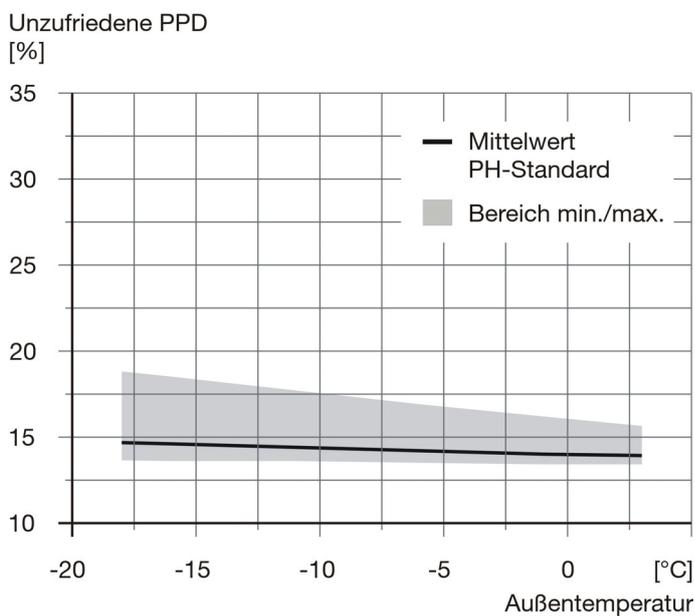


Abb. 7-6: Berechneter Einfluß der Außentemperatur auf den zu erwartenden Prozentsatz Unzufriedener PPD in einem Gebäude mit Passivhausstandard; dargestellt sind die Mittelwerte (schwarze Linie) und die Bandbreite der lokalen PPD-Werte (grauer Bereich) im Aufenthaltsbereich.

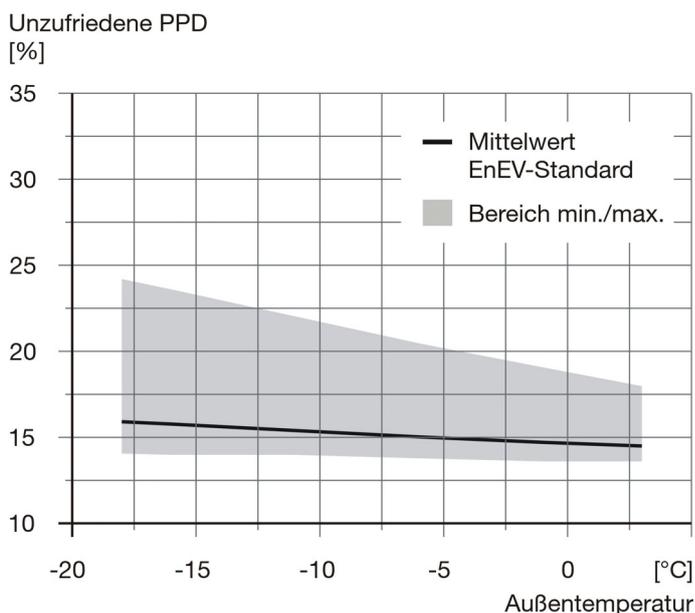
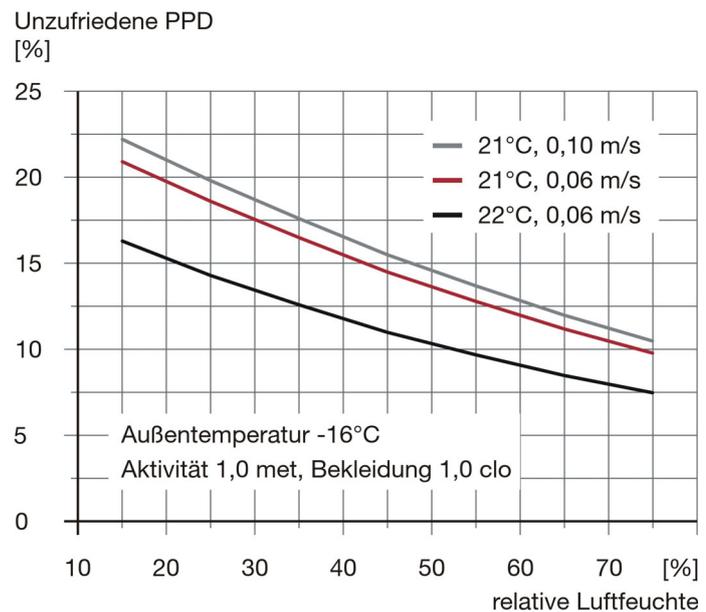


Abb. 7-7: Berechneter Einfluß der Außentemperatur auf den zu erwartenden Prozentsatz Unzufriedener PPD in einem Gebäude mit EnEV-Standard; dargestellt sind die Mittelwerte (schwarze Linie) und die Bandbreite der lokalen PPD-Werte (grauer Bereich) im Aufenthaltsbereich.

Im Vergleich dazu verdoppelt sich im Auslegungsfall bereits die Bandbreite der Unzufriedenheitsrate bei einem Gebäudestandard nach Energieeinsparverordnung (Abb. 7-7). Die Bandbreite des PPD im Referenzraum reicht von 13,9 bis 22,5 %, im Mittel über sämtliche Punkte des Aufenthaltsbereiches beträgt er 15,5 %.

Der letzte Parameter Luftfeuchte, der in die Berechnung des PPD eingeht, wird in Abb. 7-8 diskutiert.

Abb. 7-8:
Berechneter Einfluß der relativen Luftfeuchte auf den vorhergesagten Prozentsatz Unzufriedener PPD bei verschiedenen Lufttemperaturen und -geschwindigkeiten bei einer Außentemperatur von $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Legt man übliche Wohnnutzung zugrunde, wird die relative Luftfeuchte bei einer Außentemperatur von $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ etwa im Bereich von 25 bis 40 % liegen. Ausgehend von der roten Kurve als Basisvariante liegt der PPD in dem genannten Intervall der Luftfeuchte zwischen 15,5 und 18,5 %. Etwas höhere oder niedrigerer Luftgeschwindigkeiten und -temperaturen verändern diese relative Schwankungsbreite nur unerheblich. Wegen dieses Zusammenhangs lässt sich die Aussage treffen, dass in dem genannten Bereich der relativen Luftfeuchte eine Abnahme um etwa 4 % relative Feuchte den PPD um 1 % erhöht. Der Einfluss der Luftfeuchte auf die thermische Behaglichkeit ist deshalb für diese Betrachtung als gering zu werten.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass die Einflüsse von Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Strahlungstemperatur sowie relativer Luftfeuchte bei niedrigen Außentemperaturen auf den rechnerischen Anteil Unzufriedener PPD bei sehr guten Gebäudedämmstandards gering ist. Wesentlich signifikanter wirken sich die nicht von den Raumklimaparametern abhängigen Faktoren Bekleidung und Aktivität aus.

7.2 Bewertung der Parameter mittels PMV-Modell

Im Folgenden wird die Abhängigkeit des PPD bei Variation der Außentemperatur, der Art sowie dem Ort der Wärmeübergabe, der Zuluftmenge, der Zulufttemperatur sowie dem Zuluftventil diskutiert. Die abgebildeten drei Säulen je Parametervariante geben den Durchschnitt der minimalen, mittleren und maximalen Werte einer Gruppe von Versuchen an. Diese Gruppen wurden so ausgewählt, dass bei jeder Parametervariante möglichst eine gleiche Anzahl an Versuchen unter gleichen Randbedingungen bis auf den variierten Parameter enthalten war. Weiterhin wurde für die Berechnung des vorhergesagten Anteils Unzufriedener ein Aktivitätsgrad von 1,0 met und ein Bekleidungsfaktor von 1,0 clo für winterliche Bedingungen angesetzt. In allen Fällen wurde mit einer relativen Luftfeuchte von 50 % gerechnet.

7.2.1 Einfluß der Außentemperatur

Der aus einer Vielzahl von Versuchen bei unterschiedlichen Außentemperaturen gemittelte vorhergesagte Prozentsatz Unzufriedener ist in Abb. 7-9 dargestellt. Die roten Balken geben die durchschnittlichen errechneten Mittelwerte aus den Einzelversuchen wieder.

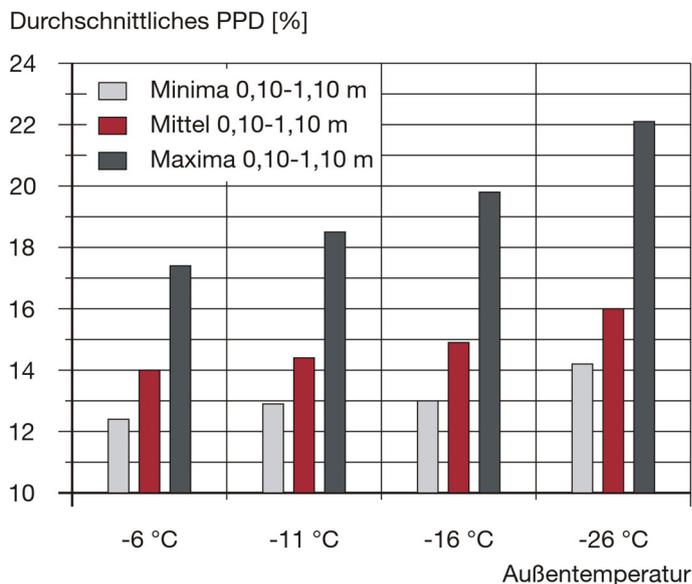


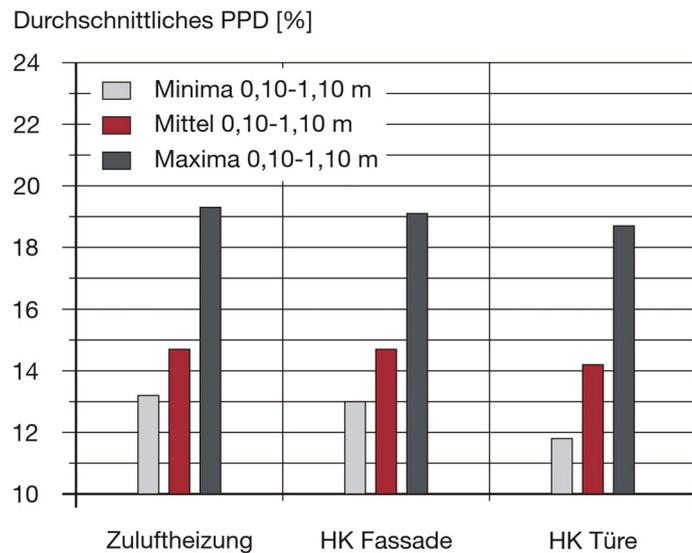
Abb. 7-9: Abhängigkeit des vorhergesagten Prozentsatzes Unzufriedener PPD von der Außentemperatur; Angegeben sind die durchschnittlichen Mittel- und Extremwerte aus je 9/3/12/2 Versuchen.

Zwar ist bei den durchschnittlichen Mittel- und Extremwerten ein eindeutiger Anstieg des Anteils Unzufriedener mit sinkender Außentemperatur zu erkennen. Im Bereich zwischen -6 und -16 °C liegt dieser Anstieg aber bei den durchschnittlichen Mittelwerten unter einem Prozent. Die durchschnittlichen Maxima unterscheiden sich signifikanter. Die Ursache hierfür liegt in den abnehmenden Strahlungstemperaturen bei sinkender Außentemperatur insbesondere im Bereich vor der Verglasung.

7.2.2 Einfluß von Art und Ort der Wärmeübergabe

Die Abhängigkeit des vorhergesagten Prozentsatzes Unzufriedener PPD von der Art der Wärmeübergabe im Raum sowie in Abhängigkeit von der Positionierung der Heizfläche im Falle der Beheizung über einen Heizkörper ist in Abb. 7-10 zu sehen. Die minimalen, mittleren und maximalen Werte stellen für jede Beheizungsvariante den Durchschnittswert aus 17 Versuchen bei gleichen weiteren Randbedingungen dar.

Abb. 7-10:
Abhängigkeit des vorhergesagten Prozentsatzes Unzufriedener PPD von Art und Ort der Wärmeübergabe; Angegeben sind die durchschnittlichen Mittel- und Extremwerte aus je 17 Versuchen bei ansonsten gleichen Randbedingungen.



Die drei verglichenen Beheizungsvarianten unterscheiden sich in der Bewertung nach dem PPD nur minimal. Die Wärmeübergabe mittels eines Heizkörpers an der Innenwand stellt im Vergleich die behaglichste Variante dar. Die Unterschiede der durchschnittlichen Extrem- und Mittelwerte sind aber mit zum Teil unter einem Prozent so klein, dass der Einfluß von Art und Ort der Wärmeübergabe auf den vorhergesagten Anteil Unzufriedener als unerheblich bezeichnet werden muss.

7.2.3 Einfluß der Zuluftmenge

Aus jeweils 20 Versuchen bei identischen Randbedingungen wurden die durchschnittlichen vorhergesagten Anteile Unzufriedener in Abbildung 7-11 bei den drei Zuluftmengen von 20, 40 und 60 m³/h ermittelt.

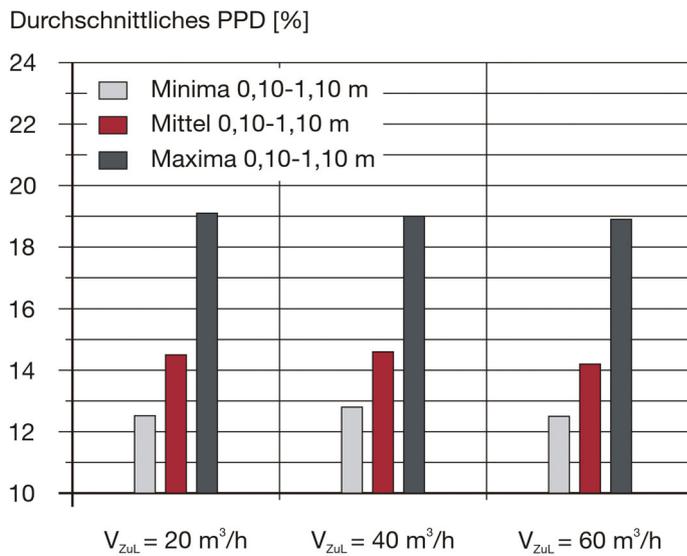


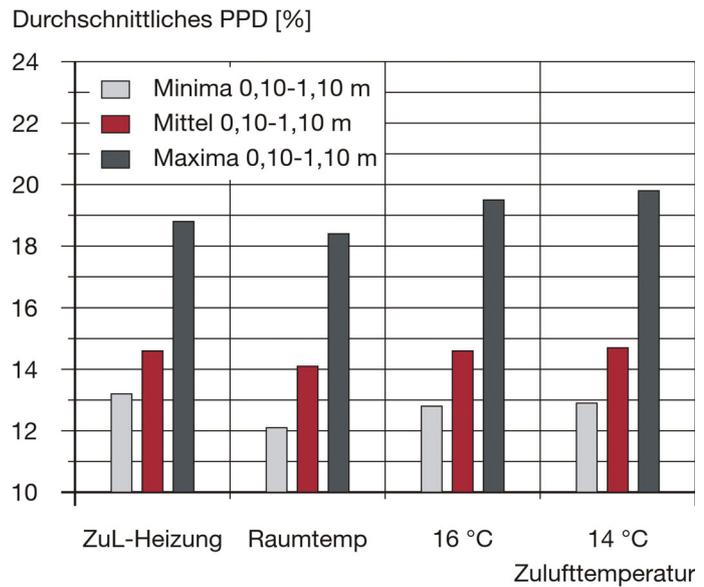
Abb. 7-11: Abhängigkeit des vorhergesagten Prozentsatzes Unzufriedener PPD von der Zuluftmenge; Angegeben sind die durchschnittlichen Mittel- und Extremwerte aus je 20 Versuchen bei ansonsten gleichen Randbedingungen.

Obwohl im direkten Vergleich einzelner Versuche mit unterschiedlichen Zuluftmengen (Kap. 6) Unterschiede erkennbar waren, ist ein Einfluß der Zuluftmenge auf den Anteil Unzufriedener bei den variierten Luftmengen von 20 bis 60 m³/h nicht feststellbar. Grund hierfür ist der geringe Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf den PPD bei Luftgeschwindigkeiten unter 0,10 m/s (s. Abb. 7-2). Die durchschnittlichen Minima, Maxima und Mittelwerte unterscheiden sich weniger als ein halbes Prozent. Die Auswirkung unterschiedlicher Zuluftmengen auf das durchschnittliche PPD kann deshalb ebenfalls als unerheblich bezeichnet werden.

7.2.4 Einfluß der Zulufttemperatur

Die Auswirkung unterschiedlicher Zulufttemperaturen auf den Prozentsatz Unzufriedener ist in Abbildung 7-12 dargestellt. Als mögliche Varianten sind Temperaturen der Zuluft von 14 und 16 °C für den Fall ohne Zuluftvorerwärmung, auf das Niveau der Raumluft vortemperierte Zuluft und Zuluftheizung gewählt. Zusätzlich wurden einige Versuche mit Zulufttemperaturen von 12 °C durchgeführt. Da diese niedrige Zulufttemperatur bei den heute üblichen Wirkungsgraden der Wärmetauscher in der Praxis nicht mehr auftreten, ist diese Variante in der nachfolgenden Grafik nicht mehr enthalten.

Abb. 7-12:
Abhängigkeit des vorhergesagten Prozentsatzes Unzufriedener PPD von der Zulufttemperatur; Angegeben sind die durchschnittlichen Mittel- und Extremwerte aus je 24/27/13/12 Versuchen.

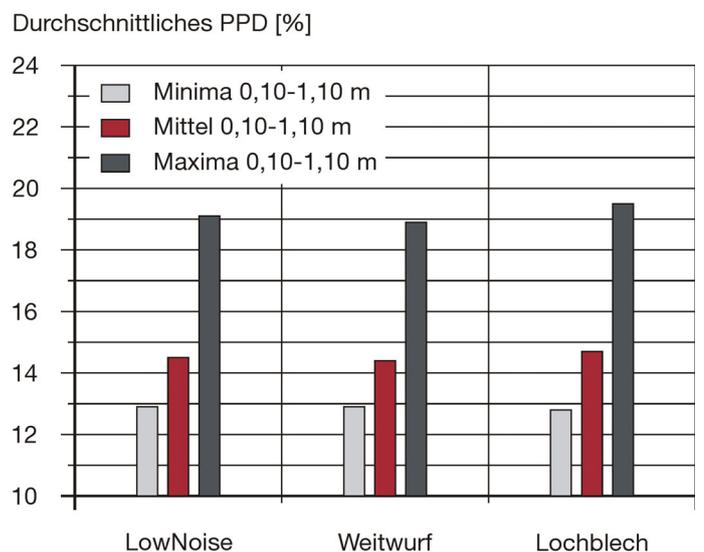


Zu vermuten wäre, dass bei Zulufttemperaturen deutlich unterhalb der Raumlufftemperatur der Anteil Unzufriedener zumindest lokal und damit in den durchschnittlichen Maximalwerten des PPD (dunkelgraue Säulen in Abb. 7-12) ersichtlich sein müsste. Diese Vermutung trifft aber nicht zu. Die durchschnittlichen PPD-Maxima bei Zulufttemperaturen von 14 und 16 °C liegen nur etwa ein Prozent höher als bei den Varianten mit warmer beziehungsweise auf Raumtemperatur erwärmter Zuluft. Bei den durchschnittlichen PPD-Mittelwerten ist der Unterschied mit etwa einem halben Prozent nochmals geringer.

7.2.5 Einfluß des Zuluftventils

Aus jeweils 14 Versuchen unter denselben Randbedingungen wurden die durchschnittlichen Mittel- und Extremwerte der vorhergesagten Anteile Unzufriedener bei Verwendung verschiedener Zuluftventile ermittelt (Abb. 7-13).

Abb. 7-13:
Abhängigkeit des vorhergesagten Prozentsatzes Unzufriedener PPD von der Bauart des Zuluftventils; Angegeben sind die durchschnittlichen Mittel- und Extremwerte aus je 14 Versuchen.



Obwohl sich die drei verglichenen Zuluftventile wesentlich in Ausblasrichtung, Ausblasimpuls und Strahlform unterscheiden, ergeben sich daraus keine differenzierbaren Erkenntnisse anhand des Vergleichs nach dem PPD. Die durchschnittlichen Minima, Maxima und Mittelwerte der Versuche bei verschiedenen Zuluftventilen unterscheiden sich so gut wie nicht. Auf den zu erwartenden Anteil Unzufriedener hat die Bauart des Zuluftventils folglich keine Auswirkung.

Die Auswertung nach den fünf Parametern Außentemperatur, Art sowie Ort der Wärmeübergabe, Zuluftmenge, Zulufttemperatur sowie Zuluftventil anhand eines errechneten durchschnittlichen PPD ergibt einzig für den Parameter Außentemperatur unterscheidbare Ergebnisse mit eindeutiger Tendenz.

7.3 Sensitivitätsuntersuchung des Zugluftrisikos DR

Die empirisch ermittelte Formel für den vorhergesagten Prozentsatz Unzufriedener aufgrund Zugluftempfinden DR [DIN EN ISO 7730: 2006] beinhaltet als Variablen die lokale Lufttemperatur t_a , die mittlere lokale Luftgeschwindigkeit \bar{v}_a und den Turbulenzgrad der lokalen Luftgeschwindigkeit Tu . Welchen Einfluß die Veränderung eines dieser drei Parameter bewirkt, wird im Folgenden rechnerisch abgeschätzt. Dabei werden für die drei untersuchten Parameter Wertebereiche eingesetzt, die in den Versuchen unter verschiedenen Versuchsrandbedingungen gemessen wurden. Das Ergebnis dieser Abschätzung soll die mögliche Bandbreite des Zugluftrisikos aufzeigen.

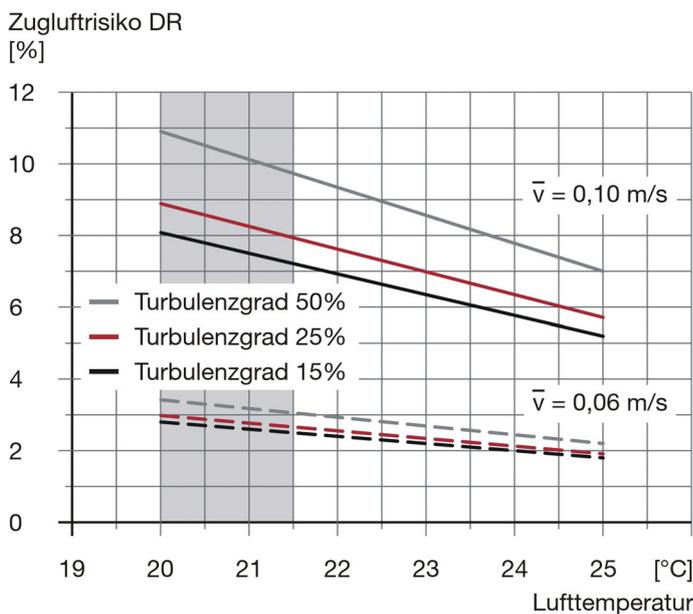
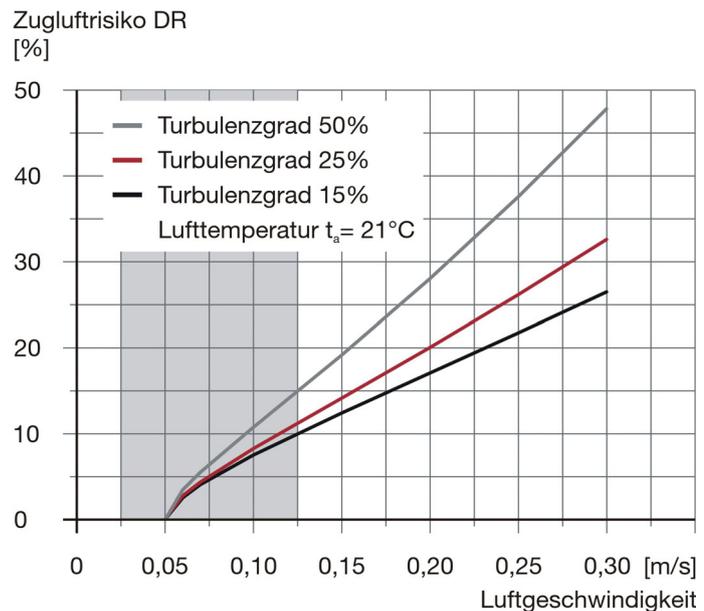


Abb. 7-14: Rechnerischer Einfluß der Lufttemperatur auf das Zugluftrisiko DR bei Turbulenzgraden von 15, 25 und 50 % und Luftgeschwindigkeiten von 0,06 m/s (gestrichelte Linien) und 0,10 m/s (durchgezogene Linien); grau hinterlegt ist der Bereich der gemessenen Lufttemperaturen.

Der Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und dem Zugluftisiko ist in Abb. 7-14 dargestellt. Die unterschiedlichen Farben der abgebildeten Kurven unterscheiden drei Turbulenzgrade von 15, 25 und 50 %. Außerdem sind in dieser Grafik zwei unterschiedliche mittlere Luftgeschwindigkeiten von 0,10 m/s (durchgezogene Linien) und 0,06 m/s (gestrichelte Linie) dargestellt. Berücksichtigt man, dass die in den Versuchen gemessenen Lufttemperaturen in den Ebenen 0,10 m bis 1,10 m zwischen 20,0 °C und 21,5 °C lagen (grau hinterlegter Bereich), ergibt sich rechnerisch für die Schwankungsbreite des Zuglufttrisikos aufgrund von Lufttemperaturunterschieden bei einer mittleren Luftgeschwindigkeit von 0,10 m/s ein Bereich von 1,0 bis 1,5 %. Legt man eine Luftgeschwindigkeit von 0,06 m/s zugrunde – die etwa der mittleren Luftgeschwindigkeit sämtlicher Versuche im Bodenbereich entspricht – beträgt die Bandbreite des Zuglufttrisikos zwischen 20,0 und 21,5 °C nur etwa 0,5 %.

Für die drei verschiedenen Turbulenzgrade von 15, 25 und 50 % ist der Zusammenhang zwischen dem Zugluftisiko DR und der Luftgeschwindigkeit bei einer Lufttemperatur von 21 °C in Abb. 7-15 dargestellt. Der Bereich der gemessenen Luftgeschwindigkeiten von etwa 0,02 bis 0,12 m/s ist grau hinterlegt.

Abb. 7-15:
Rechnerischer Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf das Zugluftisiko DR bei Turbulenzgraden von 15, 25 und 50 % und einer Lufttemperatur von 21,0 °C; grau hinterlegt ist der Bereich der gemessenen Luftgeschwindigkeiten.



Unabhängig von den anderen beiden Einflussgrößen führen Luftgeschwindigkeiten unter 0,05 m/s zu keinem Zugluftisiko. Bei absoluten Extremwerten der Luftgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich von ungefähr 0,12 m/s errechnet sich bei einem Turbulenzgrad von 50 % ein Zugluftisiko von 15 %; bei lediglich 15 % Turbulenz liegt das Zugluftisiko um ein Drittel niedriger. Ein Vergleich des Zuglufttrisikos in Abhängigkeit von dem Turbulenzgrade bei drei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten von 0,15, 0,10 und 0,06 m/s und einer Lufttemperatur von 21,0 °C ist in nachfolgender Grafik gezeigt. Grau hinterlegt ist der Kernbereich der in den Versuchen gemessenen Turbulenzgrade.

Zugluftrisiko DR [%]

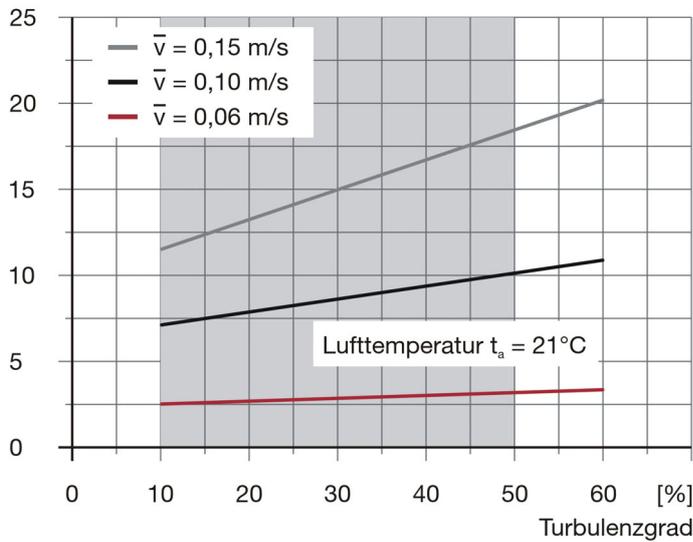


Abb. 7-16: Rechnerischer Einfluß des Turbulenzgrades auf das Zugluftrisiko DR bei mittleren Luftgeschwindigkeiten von 0,06, 0,10 und 0,15 m/s und einer Lufttemperatur von 21,0 °C; grau hinterlegt ist der Bereich der gemessenen Turbulenzgrade.

Erst bei höheren Luftgeschwindigkeiten - im Beispiel hier sind 0,15 m/s angegeben - steigt auch das Zugluftrisiko signifikant durch zunehmende Turbulenzgrade. Da Luftgeschwindigkeiten in dieser Höhe nur bei sehr wenigen Versuchen und dort nur an einzelnen singulären Stellen erreicht wurden, ist diese Kurve nicht repräsentativ. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von 0,06 m/s (rote Kurve) ist die Abhängigkeit des Zugluftrisikos vom Turbulenzgrad wesentlich geringer. Im Bereich des Turbulenzgrades von 10 bis 50 % steigt das Risiko von Zugempfinden um etwa ein Prozent an.

Zugluftrisiko DR [%]

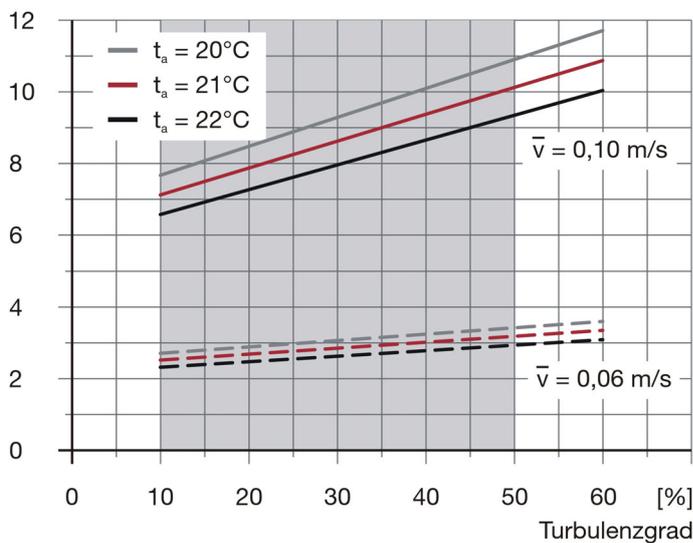


Abb. 7-17: Rechnerischer Einfluß des Turbulenzgrades auf das Zugluftrisiko DR bei Lufttemperaturen von 20, 21 und 22 °C und Luftgeschwindigkeiten von 0,06 m/s (gestrichelte Linien) und 0,10 m/s (durchgezogene Linien); grau hinterlegt ist der Bereich der gemessenen Turbulenzgrade.

In der vorstehenden Grafik ist ebenfalls die Beziehung zwischen dem Turbulenzgrad und dem Zugluftrisiko aufgezeigt. Allerdings sind hier die Kurvenverläufe bei drei verschiedenen Lufttemperaturen von 20, 21 und 22 °C angetragen. Den durchgezogen gezeichneten Kurven liegt dabei eine mittlere Luftgeschwindigkeit von 0,10 m/s zugrunde, den gestrichelt dargestellten eine Luftgeschwindigkeit von 0,06 m/s.

Der Einfluß der Temperatur auf das Zugluftrisiko bei unterschiedlichen Turbulenzgraden kann als unwesentlich bezeichnet werden. Bei beiden betrachteten Luftgeschwindigkeiten sind die jeweils drei Kurvenverläufe annähernd parallel. Die höhere Luftgeschwindigkeit wirkt sich nur in Form eines stärkeren Gradienten des Zugluftrisikos aus, außerdem ist die absolute Differenz des Zugluftrisikos bei verschiedenen Temperaturen dann höher.

7.4 Bewertung der Parameter mit dem Zugluftrisiko DR

Die vorherige Diskussion hat gezeigt, dass die Werte für das Zugluftrisiko DR bei allen Versuchen sehr niedrig sind. Für die folgenden vergleichenden Darstellungen wurde deshalb zur besseren Vergleichbarkeit anstatt des berechneten absoluten Zugluftrisikos ein dimensionsloser Zugluffaktor eingeführt. Dieser Zugluffaktor wurde für jeden Parametervergleich so gewählt, dass er für einen mittleren Parameterwert den Betrag eins aufweist. So wurden beispielsweise die Werte in Abb. 7-18 so normiert, dass der Mittelwert der drei Ebenen (rote Säule) bei einer Außentemperatur von -11 °C den Zugluffaktor eins erhält. Der Vergleich von Zugluffaktoren ist deshalb nur innerhalb der einzelnen Grafiken zulässig.

7.4.1 Einfluß der Außentemperatur

Nachfolgende Grafik (Abb. 7-18) zeigt das durchschnittliche Zugluftrisiko bei unterschiedlichen Außentemperaturen in den Höhen 0,10 m, 0,60 m und 1,10 m über Fußboden und als Mittelwert dieser drei Ebenen. Erwartungsgemäß steigt der Mittelwert des Zugluftrisikos (rote Säulen) mit abnehmender Außentemperatur an. Dieser Anstieg ist jedoch sehr gering. Im Bereich einer Außentemperatur von -11 °C sinkt beziehungsweise steigt der Mittelwert des Zugluftrisikos bei einer Änderung der Außentemperatur von einem Grad Celsius um 1 %. Der vermessene Extremfall bei einer Außentemperatur von -26 °C – derart niedrige Temperaturen sind in mitteleuropäischen Klimazonen so gut wie nie zu erwarten – weist auch nur ein knapp 50 % höheres mittleres Zugluftrisiko auf als der Referenzfall bei -11 °C. Im Vergleich der drei Ebenen miteinander besteht das höchste Zugluftrisiko in der Höhe von 0,10 m über Fußboden; mit abnehmender Außentemperatur wird es sogar etwas geringer. Offensichtlich wird der Einfluß der kalten Außenfassade durch die höheren

Heizleistungen bei zunehmend niedrigeren Außentemperaturen etwas kompensiert. Insgesamt kann der Einfluß der Außentemperatur auf die Beeinträchtigung durch Zugluftempfinden als gering eingestuft werden.

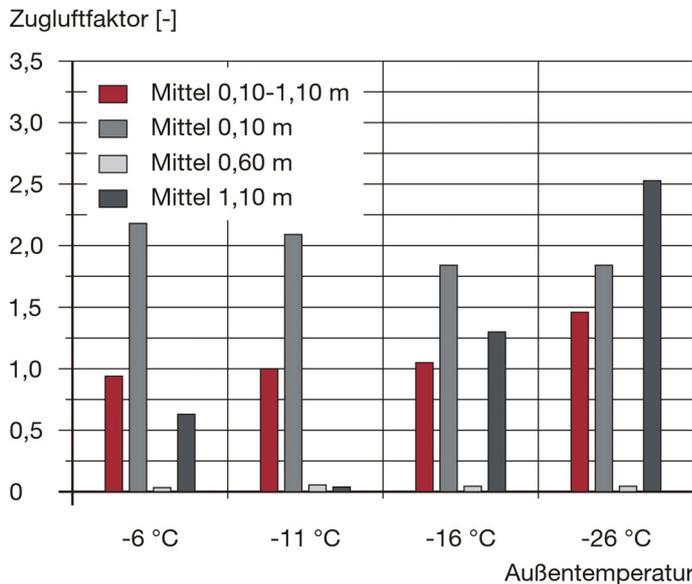


Abb. 7-18: Abhängigkeit des Zuglufttrisikos – dimensionslos dargestellt durch einen Zugluftfaktor - von der Außentemperatur; Angegeben sind die Mittelwerte aus je 9/3/12/2 Versuchen bei ansonsten gleichen Randbedingungen.

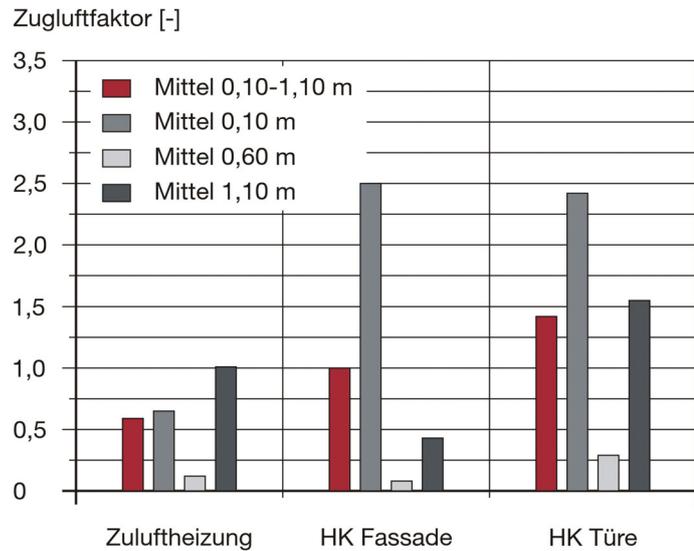
Aufgrund der geringen Anzahl von Versuchen bei -11 und -26 °C sind die Messergebnisse bei diesen Außentemperaturen statistisch nicht ausreichend abgesichert. Sieht man allerdings die Ergebnisse bei den Außentemperaturen -6 und -16 °C als gesicherte Stützpunkte an, sind die ermittelten Werte als plausibel zu bewerten.

7.4.2 Einfluß von Art und Ort der Wärmeübergabe

Das geringste durchschnittliche mittlere Zugluftisiko im Aufenthaltsbereich sitzender Personen besteht bei ausschließlicher Beheizung über die Zuluft (Abb. 7-19). Gegenüber der Wärmeübergabe durch einen Heizkörper an der Fassade ist das Risiko einer Beeinträchtigung durch Zugluft auf etwa 60 % reduziert. Wird zur Raumbeheizung der Heizkörper an der Innenwand betrieben, ist das Zugluftisiko etwa um 40 % erhöht.

Im Bodenbereich sind deutliche Unterschiede zwischen den Beheizungsvarianten erkennbar. Ursächlich für das hier mehrfach höhere Zugluftisiko bei der Wärmeeinbringung durch einen Heizkörper ist die Temperatur der Zuluft. In den dargestellten Ergebnissen sind auch Versuche enthalten, bei denen die Zulufttemperatur 16 °C oder sogar nur 14 °C betrug. Bei diesen Temperaturen löste sich der Zuluftstrahl von der Decke ab; die kalte Zuluft führte dann insbesondere im Bodenbereich zu höheren Luftgeschwindigkeiten.

Abb. 7-19:
Abhängigkeit des Zugluftrisikos – dimensionslos dargestellt durch einen Zugluftfaktor - von Art sowie Ort der Wärmeübergabe; Angegeben sind die Mittelwerte aus jeweils 17 Versuchen bei ansonsten gleichen Randbedingungen.

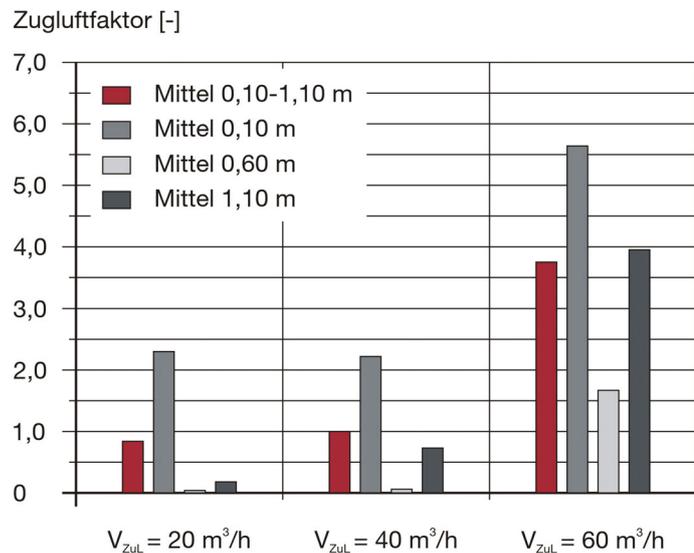


Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass an der Außenwand und dem Fenster kein signifikanter Kaltluftabfall mehr entsteht, den zu kompensieren die klassische Heizflächenanordnung unter oder neben dem Fenster erfordert. Andererseits ist die Heizleistung bei diesem baulichen Standard derart niedrig, dass ein Heizkörper keine an der Fassade aufsteigende Raumluftwalze mehr erzeugt.

7.4.3 Einfluß der Zuluftmenge

Für die Bewertung der drei Zuluftmengen 20, 40 und 60 m³/h wurden aus jeweils 20 Versuchen bei ansonsten gleichen Randbedingungen die Mittelwerte für das Zugluftrisiko ermittelt (Abb. 7-20).

Abb. 7-20:
Abhängigkeit des Zugluftrisikos – dimensionslos dargestellt durch einen Zugluftfaktor - von der Zuluftmenge; Angegeben sind die Mittelwerte aus jeweils 20 Versuchen bei ansonsten gleichen Randbedingungen.



Ausgehend vom Referenzfall 40 m³/h ist das Zugluftrisiko bei einer Verringerung der Zuluftmenge auf 20 m³/h um etwa 15 % verringert. Wird die Zuluftmenge auf 60 m³/h erhöht, steigt das Zugluftrisiko auf über das Dreieinhalbfache an.

In der Praxis würde der Versuchsraum auf eine Belegung mit maximal zwei Personen ausgelegt und somit mit einer Zuluftmenge von 25 bis 40 m³/h beaufschlagt werden. Obwohl eine Zuluftmenge von 60 m³/h für diesen Raum in der Praxis deutlich überhöht wäre, ist der überproportionale Anstieg des Zugluftrisikos doch bemerkenswert. Es zeigt, dass die Zuluftmenge einen wesentlichen Einfluß auf das zu erwartende Zugluftempfinden aufweist.

7.4.4 Einfluß der Zulufttemperatur

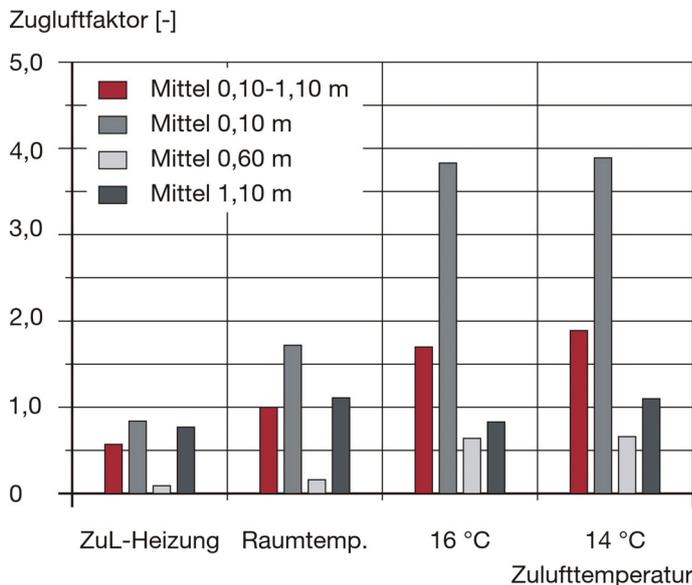


Abb. 7-21: Abhängigkeit des Zugluftrisikos – dimensionslos dargestellt durch einen Zugluffaktor - von der Zulufttemperatur; Angegeben sind die Mittelwerte aus jeweils 24/27/13/12 Versuchen bei ansonsten gleichen Randbedingungen.

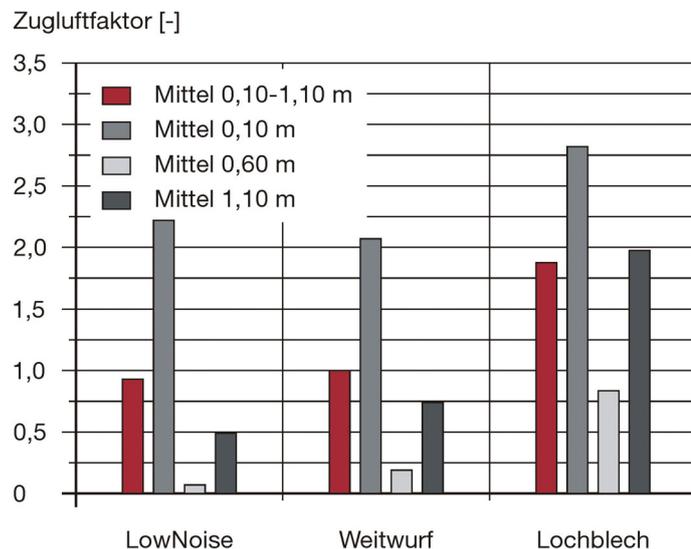
Eine Zulufttemperatur von 16 °C stellt sich bei einer Außentemperatur von -16 °C und einer Innentemperatur von 21 °C ein, wenn der Wärmetauscherwirkungsgrad des Lüftungsgerätes etwa 85 % beträgt. Um auch den Fall eines schlechteren Gerätes zu berücksichtigen, wurden Versuche mit einer Zulufttemperatur von 14 °C gefahren. Einzelne Extrembetrachtungen wurden sogar bei einer Zulufttemperatur von nur 12 °C angestellt. Da eine derart niedrige Zulufttemperatur aber nicht mehr passivhaustauglich ist, wird dieser Fall in der folgenden Grafik nicht mit verglichen.

Mit sinkender Zulufttemperatur steigt das durchschnittliche Zugluftrisiko im Aufenthaltsbereich an (rote Säulen). So ist bei einer Zulufttemperatur von 14 °C die mittlere Beeinträchtigung um knapp 100 % höher als bei einer Einbringung der Zuluft auf Raumtemperaturniveau. Vor allem im Bodenbereich ist dieses höhere Zugluftrisiko erkennbar.

7.4.5 Einfluß des Zuluftventils

Bei den Messungen wurden drei Zuluftventile eingesetzt (Abb. 4-15), die sich in Ausblasrichtung und der Form des Zuluftstrahls wesentlich unterscheiden. Das LowNoise-Tellerventil bläst die Zuluft seitlich und nach oben an der Wand entlang aus. Ein Leitblech im Ventil verhindert ein Ausblasen nach unten in den Aufenthaltsbereich. An der Kante zwischen Wand und Decke wird der Luftstrahl umgelenkt und läuft Richtung Raummitte. Die Lauflänge des Zuluftstrahls ist kurz, da durch die Ventilgeometrie in einem großen Winkel ausgeblasen wird und der Impuls der Zuluft gering ist. Im Vergleich mit den anderen beiden Zuluftelementen ist bei Verwendung des LowNoise-Tellerventils das mittlere Zugluftrisiko im Aufenthaltsbereich von sitzenden Personen am geringsten.

Abb. 7-22:
Abhängigkeit des Zugluftrisikos – dimensionslos dargestellt durch einen Zugluftfaktor - von der Bauart des Zuluftventils; Angegeben sind die Mittelwerte aus jeweils 14 Versuchen bei ansonsten gleichen Randbedingungen.



Am höchsten ist das Zugluftrisiko bei dem Lochblech-Ventil. Der horizontale Zuluftstrahl dringt durch die kompakte Strahlform und den hohen Impuls der zahlreichen, kleinen Einzelstrahlen weit in den Raum ein. Besonders im Kopfbereich einer sitzenden Person ist eine erhöhte Beeinträchtigung durch Zugluft gegeben. Bei der dritten untersuchten Ventilbauart, dem Weitwurfventil, wird die Zuluft in einer horizontalen Ebene in einem Winkel von ungefähr 150° eingeblasen. Die Verteilung des Zugluftrisikos ist ähnlich wie bei dem LowNoise-Tellerventil.

Allgemein ausgedrückt steigt das Zugluftrisiko mit zunehmendem Impuls des Zuluftstrahls besonders in der oberen Raumhälfte an. Eine kompakte Strahlform verstärkt diesen Effekt, durch einen sich aufweitenden Zuluftstrahl wird er abgemindert. Im Bodenbereich wirken sich diese Unterschiede aber nicht mehr signifikant aus.

8 Zusammenfassung

Passivhäuser haben sich in den letzten Jahren als energetisch hochwertiger Baustandard etabliert und verzeichnen hohe Zuwachsraten sowohl bei Neubauten als auch bei Gebäudesanierungen. Aufgrund ihres nur noch sehr geringen Wärmebedarfs benötigen sie kein konventionelles Heizungssystem. Vielmehr rückt die Fragestellung in den Vordergrund, mit welchen möglichst einfachen Wärmevertei- und Übergabesystemen der erforderliche Restwärmebedarf bei maximaler thermischer Behaglichkeit gedeckt werden kann.

Bisherige messtechnische Untersuchungen in Klimalaboren zu unterschiedlichen Heizsystemen wurden bei wesentlich schlechteren Baustandards durchgeführt. Zur Behaglichkeit in Passivhäusern sind Untersuchungen mit numerischen Strömungssimulationsprogrammen bekannt, bei denen auf die hier untersuchten Parameter allerdings nicht oder nicht detailliert eingegangen wurde.

Um Antworten auf die oben gestellte Frage zu bekommen, wurden anhand eines Testraumes in Passivhausstandard Parameterstudien durchgeführt. Dieser Testraum entsprach in seinen Abmessungen einem durchschnittlichen Wohnraum mit einer Grundfläche von etwa 15 m² und einer Höhe von 2,50 m. In etwa einhundert Versuchen wurden folgende Parametervariationen messtechnisch untersucht: der Einfluß der Außentemperatur, Art und Ort der Wärmeübergabe, Zuluftmenge, Zulufttemperatur sowie verschiedener Zuluftventile. Folgende Varianten wurden vermessen:

- Einfluß der Außentemperatur: untersucht wurden Außentemperaturen von -1, -6, -11 und -16 °C; zwei Messungen wurden bei einer Außentemperatur von -26 °C durchgeführt.
- Einfluß der Wärmeübergabe: zur Deckung des Wärmebedarfs wurden alternativ Plattenheizkörper an der Innenwand oder neben der Außenfassade oder aber ein Zuluftheizregister betrieben.
- Einfluß der Zuluftmenge: Die untersuchten Zuluftmengen betragen 20, 40 oder 60 m³/h; einige wenige Messungen wurden mit 80 m³/h durchgeführt.
- Einfluß der Zulufttemperatur: im Falle der Beheizung über einen der Heizkörper wurden Zulufttemperaturen von etwa 21 °C (dies entspricht der mittleren Raumtemperatur), 16, 14 und 12 °C untersucht; die Zulufttemperatur bei der Variante Luftheizung war abhängig von der Zuluftmenge und dem Wärmebedarf.
- Einfluß des Zuluftventils: zum Einsatz kamen eine Weitwurfdüse mit schnabelförmiger Ausblasöffnung, ein Tellerventil und ein Lochblech-Ventil.

Bei jedem Versuch wurden mittels einer über ein Schienensystem zweiachsig verfahrbaren Stange, die über die Höhe verteilt mit je fünf Lufttemperatur- und Luftgeschwindigkeitssensoren

bestückt war, an 200 Raumpunkten Messdaten erfasst. Zusätzlich wurden die Betriebsparameter des Heiz- und Lüftungssystems aufgezeichnet.

Die Auswertung der einzelnen Versuche erfolgte hinsichtlich der Behaglichkeitsparameter PMV/PPD, Zugluftrisiko und vertikale Temperaturschichtung. Für den Parameter Strahlungstemperatursymmetrie wurde gezeigt, dass bei diesem baulichen Standard keine Einschränkungen mehr auftreten.

Anschließend wurde versucht, allgemein gültige Aussagen über den Einfluß der fünf variierten Parameter auf die thermische Behaglichkeit wie folgt zu treffen.

- Die Außentemperatur hat einen erkennbaren, wenn auch mäßigen Einfluß auf die Behaglichkeit im Raum; so steigen sowohl der vorhergesagte Prozentsatz Unzufriedener PPD als auch die Beeinträchtigung durch Zugempfinden DR mit sinkender Außentemperatur an.
- Art und Ort der Wärmeübergabe haben auf den PPD überhaupt keinen Einfluß; die reine Zuluftheizung führt aber zu einem geringeren Zugluftrisiko als die Beheizung über die Heizkörper. Der Grund dafür liegt in der Zulufttemperatur unter Raumlufthtemperatur. Die Anordnung eines Heizkörpers an der Innenwand ist hinsichtlich des Zugluftrisikos etwas ungünstiger als ein Heizkörper im Fassadenbereich.
- Ein Einfluß der Zuluftmenge auf den PPD konnte nicht festgestellt werden. Bei Zuluftmengen von 20 und 40 m³/h ist das Zugluftrisiko ungefähr gleich; erst bei 60 m³/h – einer für diesen Raum überhöhten Luftleistung – steigt das Zugluftrisiko signifikant an.
- Abnehmende Zulufttemperaturen führen zu einem erhöhten Zugluftrisiko insbesondere im Bodenbereich. So besteht bei einer Zulufttemperatur von 14 °C ein doppelt so hohes Zugluftrisiko wie bei einer Zulufttemperatur auf dem Niveau der Raumlufthtemperatur.
- Unterschiedliche Ventilbauformen haben keinen Einfluß auf den vorhergesagten Prozentsatz Unzufriedener. Hinsichtlich des Zugluftrisikos sind Ventilbauformen günstiger, bei denen der Zuluftstrahl nach kurzer Lauflänge eine starke Aufweitung und damit eine hohe Geschwindigkeitsabnahme erfahren hat.

Diese Erkenntnis motivierte zu einer theoretischen Untersuchung, in welchen Bereichen diese Behaglichkeitskenngrößen unter Zugrundelegung realer, gemessener Randbedingungen liegen können. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Einflüsse von Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur sowie Strahlungstemperatur bei niedrigen Außentemperaturen auf den rechnerischen Anteil Unzufriedener PPD bei sehr guten Gebäudedämmstandards äußerst gering sind. Wesentlich signifikanter wirken sich die nicht von den Raumklimaparametern abhängigen Faktoren Bekleidung und Aktivität aus. Die Unterschiede des Zugluftrisikos DR betragen bei den untersuchten Varianten ebenso nur wenige Prozentpunkte.

Letztlich führen die Ergebnisse der beschriebenen und diskutierten Untersuchungen zu folgenden Schlussfolgerungen. So lässt sich die Aussage treffen, dass mit den Behaglichkeitsbewertungen nach [DIN EN ISO 7730: 2006] die Unterschiede bei dem untersuchten Passivhausstandard nicht mehr differenzierbar abgebildet werden. Selbst bei extremen Randbedingungen können die Anforderungen der Kategorie A des Umgebungsklimas nach [DIN EN ISO 7730: 2006] eingehalten werden.

9 Literatur

- [Ahlborn 2005] Almemo-Handbuch. Darstellung und Bedienungsanleitung von Komponenten des Almemo-Messsystems. 6. Auflage, Holzkirchen 2005.
- [Aschoff 1971] Aschoff, J.; Kramer, K: Energiestoffwechsel. In: Physiologie des Menschen. Urban und Schwarzenberg Verlag, München 1971.
- [Bisanz 1999] Bisanz, Carsten: Heizlastauslegung im Niedrigenergie- und Passivhaus. Fachinformation PHI-1999/2, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999.
- [Bühning 2004] Bühning, Andreas; Leuchtner, Jürgen; Krug, Petra; Schüle, Rainer: Marktpotential für Passivhäuser und 3-Liter-Häuser. EB Energieeffizientes Baues, Heft 2/2004.
- [DIN 1946-2] DIN 1946-2: Raumluftechnik. Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI Lüftungsregeln). Beuth Verlag, Berlin Januar 1994. (Zurückgezogene Norm, ersetzt durch [DIN EN 13779]).
- [DIN 1946-6] DIN 1946-6: Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen; Anforderungen, Ausführung, Abnahme. Beuth Verlag, Berlin 1998.
- [DIN 4108-7] DIN 4108-7: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele. Beuth Verlag, Berlin 2001.
- [DIN 4701] Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden. Beuth Verlag, Berlin 1983 (Zurückgezogene Norm, ersetzt durch [DIN EN 12831]).
- [DIN EN 12831] Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. Beuth Verlag, Berlin 2003.
- [DIN EN ISO 7726] DIN EN ISO 7726: Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen. Beuth Verlag, Berlin 2002.
- [DIN EN ISO 7730: 1995] DIN EN ISO 7730: Gemäßigtes Umgebungsklima – Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. Beuth Verlag, Berlin 1995.
- [DIN EN ISO 7730: 2006] DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD- Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Beuth Verlag, Berlin 2006.
- [DIN EN 13779] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden. Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage. Beuth Verlag, Berlin 2005.

- [DIN EN ISO 28996] DIN EN ISO 28996: Ergonomie. Bestimmung der Wärmeerzeugung im menschlichen Körper. Beuth Verlag, Berlin 1993.
- [Ehrenfried 2000] Ehrenfried, Heinz: Kontrollierte Wohnungslüftung. Verlag Bauwesen, Berlin 2000.
- [EnEV 2004] Energieeinsparverordnung (EnEV): Verordnung über energieeinsparenden Wärmeschutz und energieeinsparende Anlagentechnik in der Neufassung vom 2. Dezember 2004.
- [Erhorn 1997] Erhorn, Hans: Wohnfeuchte und Raumlüftung. In: Schimmelbildung in Wohnungen. Vortragsunterlagen Haus der Technik, Essen 1997.
- [Erhorn 1998] Erhorn, Hans: Fördert oder schadet die europäische Normung der Niedrigenergiebauweise in Deutschland? Gesundheitsingenieur gi Nr. 5/1999.
- [Faller 1999] Faller, P.: Der Wohngrundriss. DVA Verlag, Stuttgart 1999.
- [Fanger 1970] Fanger, P. O.: Thermal comfort. Danish Technical Press, Kopenhagen 1970.
- [Fanger 1985] Fanger, P. O.; Ipsen, B. M.; Langkilde, G.; Olesen, B. W.; Christensen, N. K.; Tanabe, S.; Comfort limits for asymmetric thermal radiation. Energy and Buildings, 8/1985.
- [Fanger 1988] Fanger, P. O.: Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors. Energy and Buildings, 12/1988.
- [Fanger 1996] Fanger, O.; Fang, I.; Clausen, G.: The impact of temperature and humidity on perception and emission of indoor air pollutions. Proceedings of Indoor Air'96, Vol. 4, 1996.
- [Feist 1997] Feist, Wolfgang: Das Niedrigenergiehaus. Neuer Standard für energiebewusstes Bauen. C. F. Müller Verlag, Heidelberg 1997.
- [Feist 1999] Feist, Wolfgang: Anforderungen an die Wohnungslüftung im Passivhaus. In: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern. Protokollband Nr. 17 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Passivhaus Institut, Darmstadt 1999.
- [Feist 2000] Feist, Wolfgang: Varianten für die Wärmeversorgung von Passivhäusern im Vergleich. In: Passivhaus-Versorgungstechnik. Protokollband Nr. 20 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Passivhaus Institut, Darmstadt 2000.
- [Feist 2004] Feist, Wolfgang: Einführung – Lüftung bei Bestandssanierung unverzichtbar. In: Lüftung bei Bestandssanierung: Lösungsvarianten. Protokollband Nr. 30 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.

- [Gerling 2005] Gerling, Johannes Peter; Wellmer, Friedrich Wilhelm: Reserven, Ressourcen und Reichweiten. Wie lange gibt es noch Erdöl und Erdgas? In: Chemie in unserer Zeit, 4/2005, Wiley-VCH Verlag, Weinheim.
- [IG Passivhaus 2003] Informationsgemeinschaft Passivhaus: Online-Information zum Passivhausstandard, www.ig-passivhaus.de, Stand November 2003.
- [Läge 1983] Läge, F. K.: Frauen sind unzufriedener – Mollige frieren am meisten. Rohr Armatur Sanitär Heizung RAS, 10/1983.
- [Kluttig 2001] Kluttig, H.; Erhorn, H.; Reiß, J.: Demonstrationsvorhaben 3-Liter-Häuser in Celle. IBP-Mitteilungen Jg. 28, Nr. 394, 2001.
- [Maas 1999] Maas, A.; Schmidt, D. und Hauser, G.: Experimentelle Untersuchungen zum Luftaustausch bei Querlüftung. TAB 30 (1999), H. 11, S. 57-64.
- [Mayer 1998] Mayer, E: Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig? KI Luft- und Kältetechnik 12/1998.
- [Markfort 2004] Markfort, D.; Heinz, E.; Maschewski, R.; Kulisch, R.: Untersuchung und Verbesserung der kontrollierten Außenluftzuführung über Außenwand-Luftdurchlässe unter besonderer Berücksichtigung der thermischen Behaglichkeit in Wohnräumen. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2004
- [Meyer 2004] Meyer, C.; Oppermann, J.; Wimmer, A.: Behaglichkeitsatlas. Bewertung der Anordnung von Heizflächen und Lüftungselementen hinsichtlich Raumklima und thermischer Behaglichkeit. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2004
- [Nevins 1966] Nevins, R. G.; Rholes, F. H.; Springer, W.; Feyerherm, A. M.: Temperature-humidity chart for thermal comfort of seated persons. ASHRAE Trans., 73/1966.
- [NBM 1999] Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen in München: Leitfaden zum Geschoßwohnungsbau mit Niedrigenergiestandard. Herausgeber: LH München (1999).
- [Nowak 2005] Nowak, Wolfgang: Lüftungsstrategien. Natürliche und maschinelle Wohnungslüftung. db deutsche bauzeitung, Heft 5/2005.
- [Olesen 1977] Olesen, B. W.: Thermal comfort requirements for floors. Proceeding of the meeting of commissions B1, B2, E1 of the IIR, Belgrade 1977/4.
- [Olesen 1979] Olesen, S: Discomfort caused by vertical air temperature differences. Indoor Climate Band 36, 1979.
- [Olesen 1982] Olesen, B. W.: Thermal comfort. Technical review, Brüel & Kjaer, 2/1982.

- [Olesen 1985] Olesen, B. W.: Local thermal discomfort. Technical review, Brüel & Kjaer, 1/1985.
- [Olesen 1998] Olesen, Bjarne W.: Heizsysteme – Experimentelle Untersuchungen der thermischen Behaglichkeit. HLH Heizung Lüftung Haustechnik, 12/1998.
- [Olesen 2002] Olesen, Bjarne W.: Sind „kalte“ Fensterflächen heute noch ein Problem? Teil 1. HLH Heizung Lüftung Haustechnik, 12/2002.
- [Olesen 2003] Olesen, Bjarne W.: Sind „kalte“ Fensterflächen heute noch ein Problem? Teil 2. HLH Heizung Lüftung Haustechnik, 1/2003.
- [Pettenkofer 1858] Pettenkofer, Max von: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. J.G. Cotta'sche Buchhandlung, München 1858.
- [Pfluger 2003] Pfluger, R.; Schnieders, J.; Kaufmann, B.; Feist, W.: Hochwärmedämmende Fenstersysteme: Untersuchung und Optimierung im eingebauten Zustand (Anhang zum Teilbericht A), Internet-Publikation, Mai 2003.
- [PHPP 2004] Passivhaus-Institut: Passivhaus Projektierungs Paket 2004. Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser. Handbuch inkl. CD-ROM, Darmstadt 2004.
- [Rauscher 2003] Rauscher, Petra: Das Passivhaus – Technik-Wahn oder Lebenswert? Unveröffentlichte Diplomarbeit am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, TU München (2003).
- [Rholes 1971] Rholes, F. H.; Nevins, R. G.; The nature of thermal comfort for sedentary man. ASHRAE Research 43/1971.
- [Richter 1998] Richter, Wolfgang: Die Konsequenzen der Energieeinsparverordnung „EnEV 2000“ für die Heizungs- und Lüftungstechnik. Planer-Forum Wärmeschutz & Heiztechnik im Neubau und im Baubestand; Böhl-Iggelheim 1998.
- [Richter 1999] Richter, Wolfgang; Hartmann, T.; Kremonke, A.; Reichel, D.: Gewährleistung einer guten Raumluftqualität bei weiterer Senkung der Lüftungswärmeverluste. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1999.
- [Richter 2003] Richter, Wolfgang: Handbuch der thermischen Behaglichkeit – Heizperiode. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden 2003.
- [Spreng 2001] Spreng, Daniel; Semadeni, Marco: Energie, Umwelt und die 2000W-Gesellschaft. CEPE Working Paper Nr. 11, Centre for Energy Policy and Economics, Zürich 2001.
- [Schnieders 2002] Schnieders, J.; Betschart, W.; Feist, W.: Raumluftströmungen im Passivhaus: Messungen und Simulation. HLH Heizung Lüftung Haustechnik, 3/2002.

- [Schwarz 2001] Schwarz, Michael: Numerische Luftströmungs-Simulation in Wohnräumen mit mechanischer Lüftungsanlage. CCI Print 6/2001.
- [VDI 6030] Auslegung von freien Raumheizflächen. Grundlagen. Auslegung von Raumheizkörpern. Beuth Verlag, Berlin 2002.
- [Weizsäcker 1999] Weizsäcker, Ernst U.; Lovins, Armory B.; Lovins, L. H.: Faktor vier. Doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch. Verlagsgruppe Droemer Knauer, München 1999.
- [Witthauer 1993] Witthauer, J.; Horn, H.; Bischof, W.: Raumluftqualität. Belastung, Bewertung, Beeinflussung. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe 1993.

Anhang

Im Folgenden sind etwas mehr als die Hälfte der durchgeführten Versuche dokumentiert. Ausgewählt wurden die Versuche, die für die Auswertung besonders von Interesse waren. Dokumentiert sind jeweils die gemessenen Größen Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur sowie der daraus abgeleitete vertikaler Temperaturgradient. Zusätzlich sind je Versuch Farbplots von Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Zugluftrisiko in 0,10 m über Boden und in einem Vertikalschnitt mittig und senkrecht zur Fassade des Testraums dargestellt.

Damit lokale Lufttemperaturen aus verschiedenen Versuchen miteinander besser vergleichbar sind, wurden sämtliche Lufttemperaturen eines Versuches normiert. Als Bezugsebene diente die Ebene 1,10 m über Fußboden. Die dort gemessenen 40 Lufttemperaturen wurden alle um den gleichen Betrag erhöht oder vermindert, so dass die mittlere Temperatur in dieser Ebene 21,0 °C ergab. Um den gleichen Betrag wurden dann die gemessenen Lufttemperaturen der anderen Ebenen angepasst.

Versuch 29

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,037	0,020	0,071
h = 0,60m	0,033	0,027	0,040
h = 1,10m	0,042	0,021	0,090
h = 1,70m	0,042	0,024	0,070
h = 2,20m	0,042	0,015	0,093

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,33	20,03	20,48
h = 0,60m	20,72	20,51	20,88
h = 1,10m	21,00	20,83	21,21
h = 1,70m	21,15	21,03	21,28
h = 2,20m	21,36	21,07	21,65

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,67	0,46	0,85
h = 0,10-1,70m	0,52	0,37	0,64
h = 0,10-2,20m	0,49	0,41	0,58

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

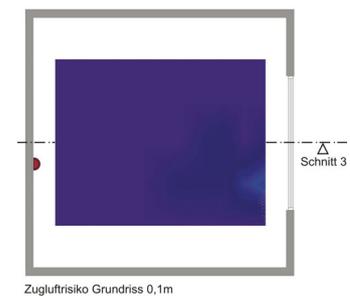
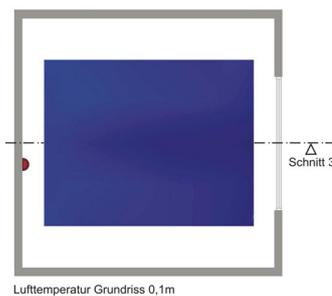
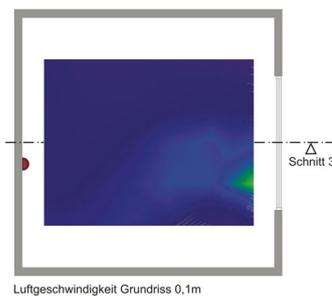
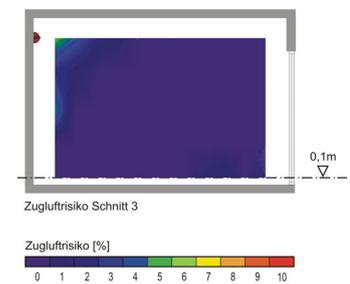
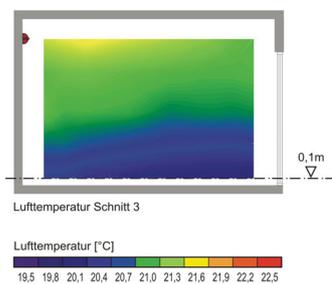
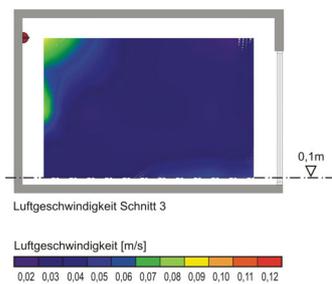
Zuluft

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise



Versuch 30

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,032	0,020	0,053
h = 0,60m	0,032	0,025	0,042
h = 1,10m	0,043	0,023	0,091
h = 1,70m	0,073	0,020	0,121
h = 2,20m	0,070	0,032	0,154

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,25	20,02	20,42
h = 0,60m	20,69	20,51	20,85
h = 1,10m	21,00	20,85	21,17
h = 1,70m	21,28	21,13	21,57
h = 2,20m	21,56	21,29	21,88

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,75	0,50	1,15
h = 0,10-1,70m	0,64	0,47	0,97
h = 0,10-2,20m	0,62	0,41	0,75

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

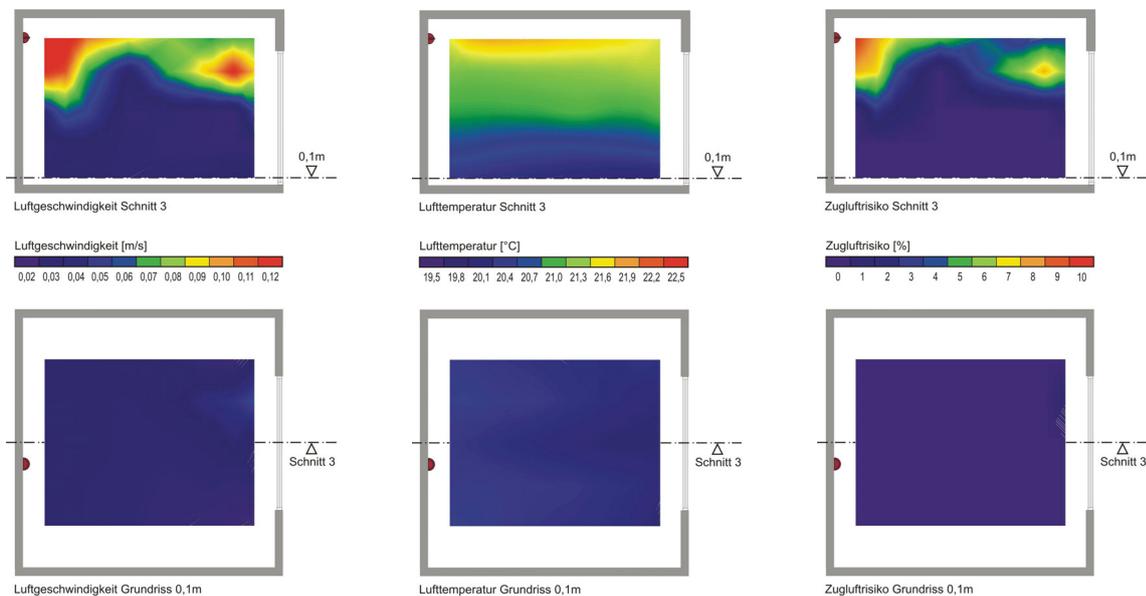
Zuluft

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf



Versuch 31

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,042	0,022	0,103
h = 0,60m	0,036	0,016	0,092
h = 1,10m	0,058	0,030	0,123
h = 1,70m	0,056	0,027	0,088
h = 2,20m	0,053	0,023	0,119

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,37	20,12	20,52
h = 0,60m	20,77	20,57	21,06
h = 1,10m	21,00	20,85	21,30
h = 1,70m	21,11	20,97	21,24
h = 2,20m	21,27	20,99	21,51

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,63	0,40	0,85
h = 0,10-1,70m	0,47	0,32	0,57
h = 0,10-2,20m	0,43	0,29	0,52

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

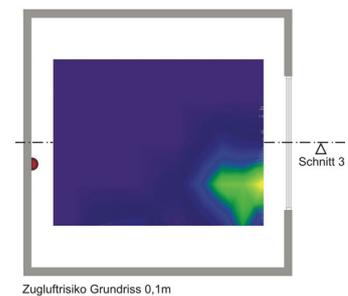
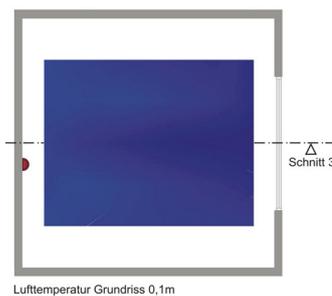
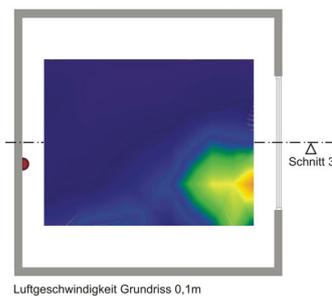
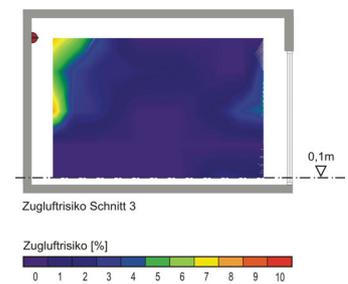
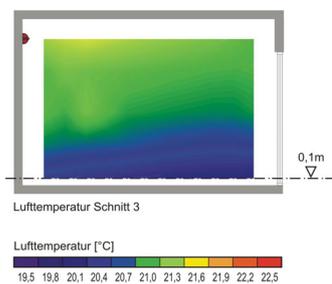
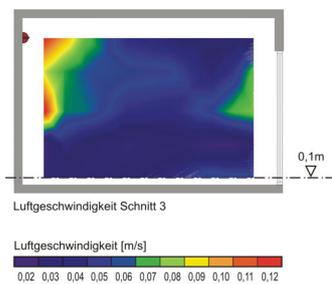
Zuluft

Luftmenge:

60 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise



Versuch 32

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,046	0,023	0,092
h = 0,60m	0,046	0,019	0,118
h = 1,10m	0,086	0,028	0,140
h = 1,70m	0,079	0,026	0,152
h = 2,20m	0,087	0,032	0,214

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,38	20,09	20,56
h = 0,60m	20,84	20,71	21,12
h = 1,10m	21,00	20,84	21,25
h = 1,70m	21,10	20,95	21,30
h = 2,20m	21,26	20,97	21,46

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,62	0,42	1,09
h = 0,10-1,70m	0,45	0,31	0,65
h = 0,10-2,20m	0,42	0,23	0,54

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

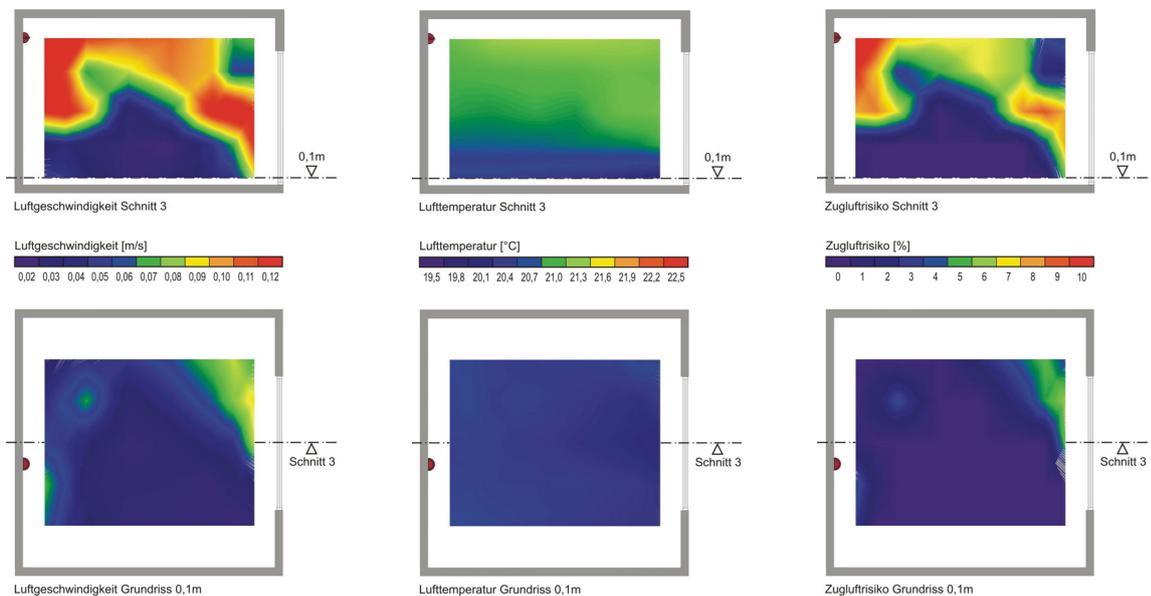
Zuluft

Luftmenge:

60 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf



Versuch 33

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,043	0,021	0,065
h = 0,60m	0,034	0,026	0,041
h = 1,10m	0,041	0,032	0,047
h = 1,70m	0,022	0,015	0,028
h = 2,20m	0,031	0,016	0,053

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,27	19,97	20,51
h = 0,60m	20,75	20,42	21,25
h = 1,10m	21,00	20,68	21,45
h = 1,70m	21,33	21,11	21,57
h = 2,20m	21,76	21,48	21,98

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,73	0,60	1,00
h = 0,10-1,70m	0,66	0,55	0,82
h = 0,10-2,20m	0,71	0,60	0,81

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

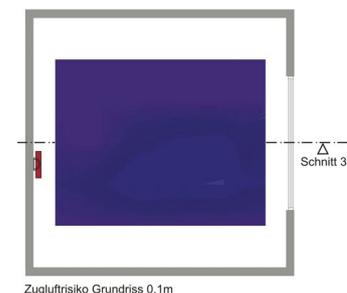
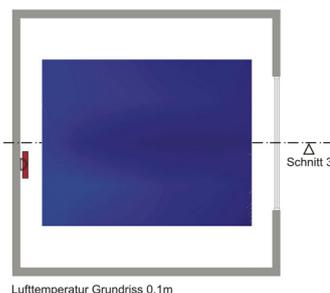
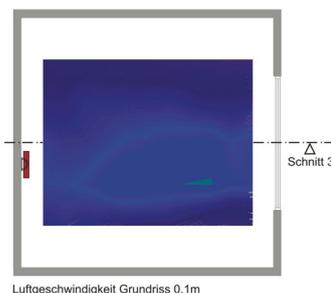
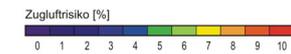
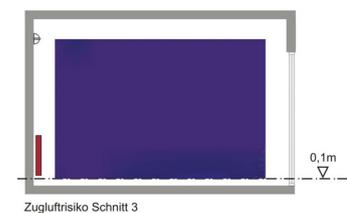
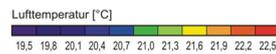
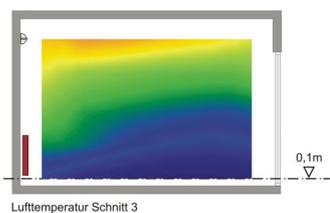
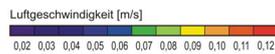
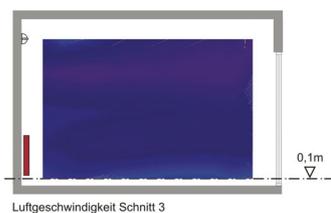
20 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise

Zulufttemperatur:

ca. Raumlufttemperatur



Versuch 34

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,043	0,020	0,059
h = 0,60m	0,035	0,028	0,040
h = 1,10m	0,040	0,030	0,047
h = 1,70m	0,030	0,016	0,064
h = 2,20m	0,039	0,019	0,079

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,28	20,00	20,54
h = 0,60m	20,77	20,42	21,26
h = 1,10m	21,00	20,68	21,46
h = 1,70m	21,30	21,11	21,58
h = 2,20m	21,70	21,49	22,00

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,72	0,60	0,96
h = 0,10-1,70m	0,64	0,53	0,71
h = 0,10-2,20m	0,68	0,55	0,79

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

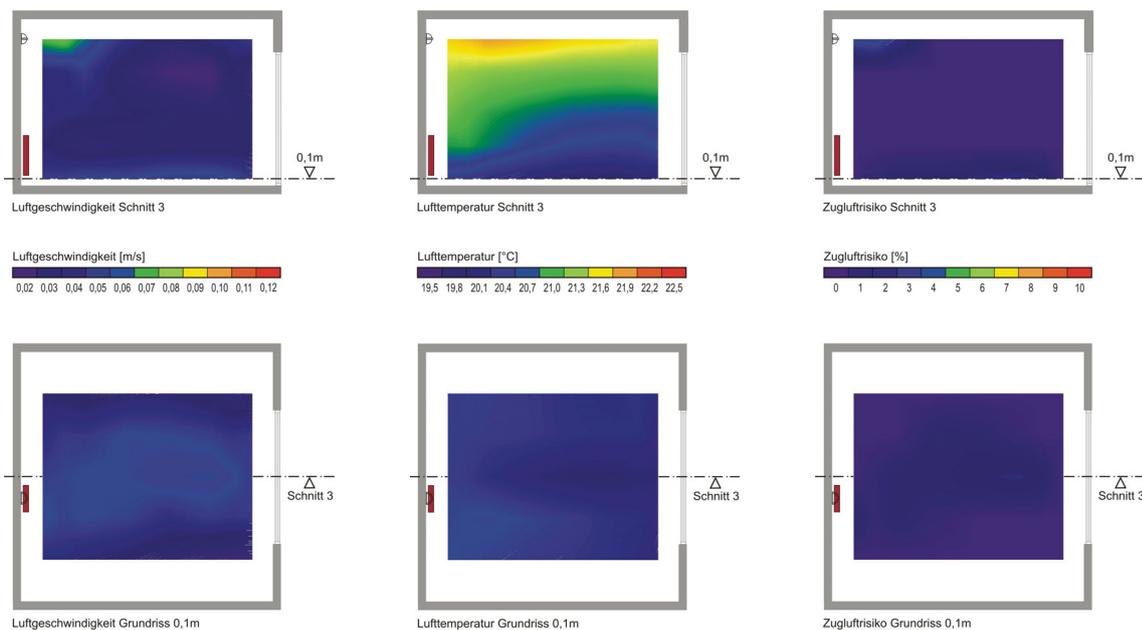
20 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur:

ca. Raumlufttemperatur



Versuch 35

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,040	0,021	0,055
h = 0,60m	0,035	0,026	0,043
h = 1,10m	0,040	0,028	0,052
h = 1,70m	0,023	0,012	0,043
h = 2,20m	0,034	0,014	0,069

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,18	19,83	20,75
h = 0,60m	20,73	20,28	21,70
h = 1,10m	21,00	20,59	21,87
h = 1,70m	21,36	21,09	21,79
h = 2,20m	21,96	21,76	22,24

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,82	0,61	1,12
h = 0,10-1,70m	0,74	0,62	0,91
h = 0,10-2,20m	0,85	0,61	0,98

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

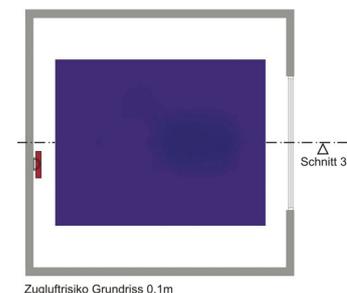
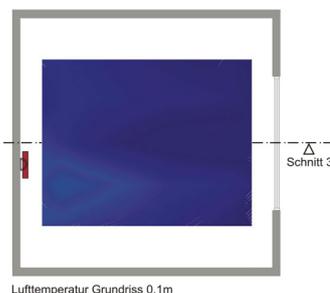
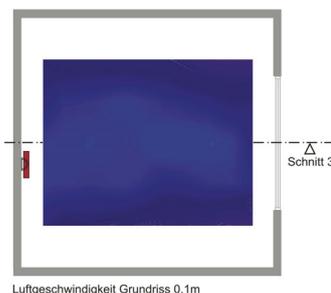
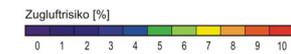
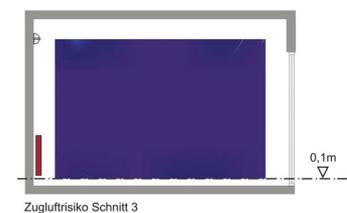
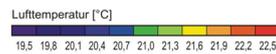
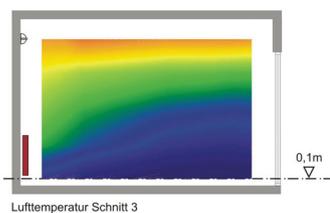
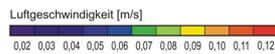
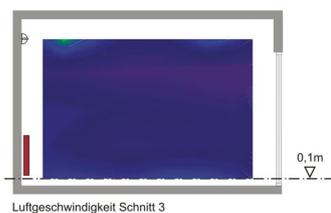
20 m³/h

Zuluftventil:

Lochblechventil

Zulufttemperatur:

ca. Raumlufttemperatur



Versuch 36

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,046	0,019	0,102
h = 0,60m	0,028	0,020	0,044
h = 1,10m	0,037	0,019	0,092
h = 1,70m	0,042	0,020	0,093
h = 2,20m	0,053	0,021	0,100

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,24	19,90	20,56
h = 0,60m	20,71	20,35	21,24
h = 1,10m	21,00	20,69	21,39
h = 1,70m	21,23	21,01	21,37
h = 2,20m	21,35	21,07	21,63

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,76	0,56	1,03
h = 0,10-1,70m	0,62	0,47	0,72
h = 0,10-2,20m	0,53	0,40	0,67

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

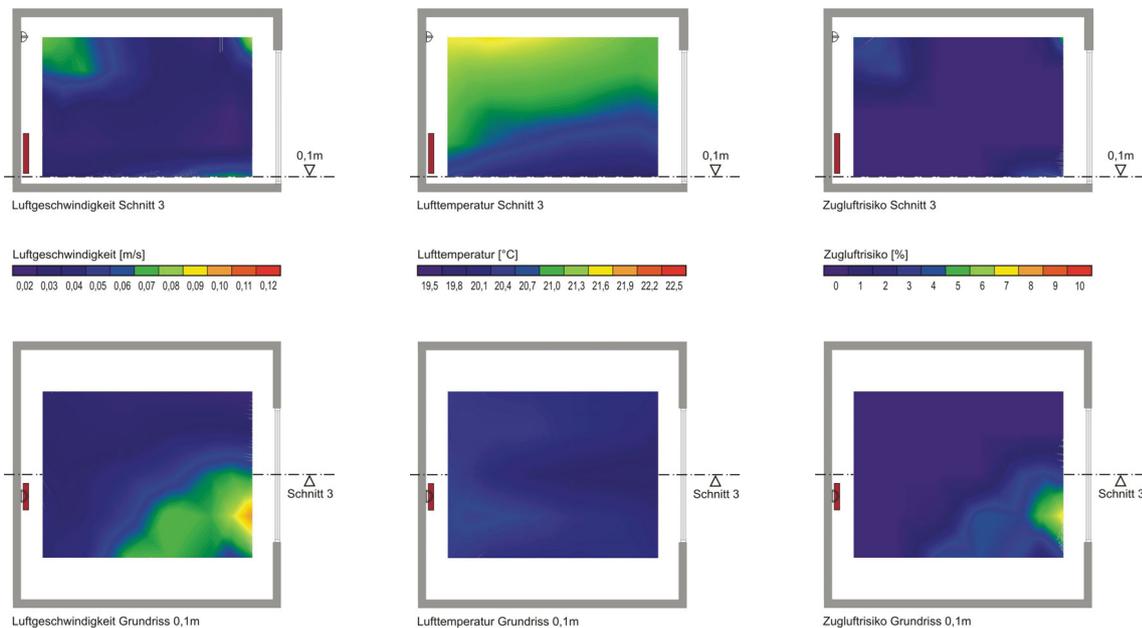
40 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise

Zulufttemperatur:

ca. Raumlufttemperatur



Versuch 37

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,048	0,020	0,087
h = 0,60m	0,028	0,016	0,046
h = 1,10m	0,058	0,023	0,107
h = 1,70m	0,070	0,030	0,117
h = 2,20m	0,071	0,032	0,133

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,22	19,92	20,46
h = 0,60m	20,71	20,54	21,11
h = 1,10m	21,00	20,88	21,25
h = 1,70m	21,13	21,01	21,29
h = 2,20m	21,18	21,00	21,37

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,78	0,53	1,16
h = 0,10-1,70m	0,56	0,39	0,76
h = 0,10-2,20m	0,46	0,32	0,54

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

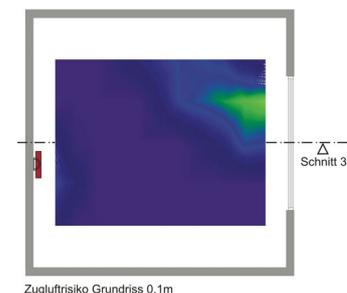
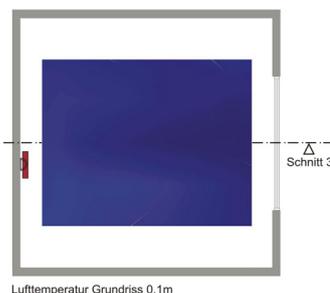
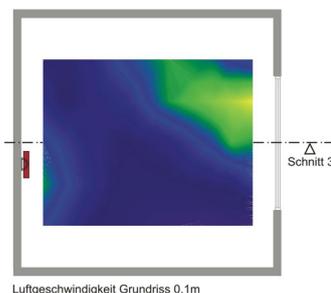
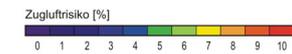
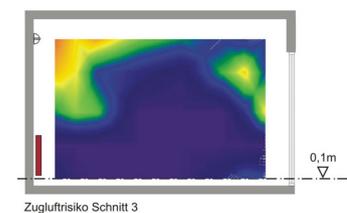
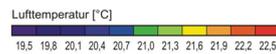
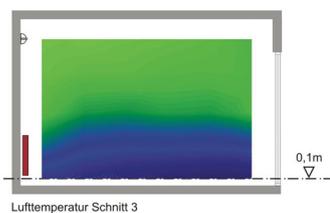
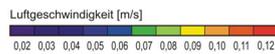
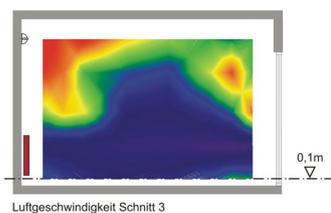
40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur:

ca. Raumlufttemperatur



Versuch 38

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,038	0,021	0,056
h = 0,60m	0,035	0,030	0,042
h = 1,10m	0,037	0,028	0,047
h = 1,70m	0,031	0,016	0,064
h = 2,20m	0,049	0,021	0,082

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,13	19,81	20,56
h = 0,60m	20,71	20,38	21,36
h = 1,10m	21,00	20,69	21,53
h = 1,70m	21,32	21,14	21,62
h = 2,20m	21,74	21,50	21,92

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,87	0,68	1,07
h = 0,10-1,70m	0,74	0,60	1,03
h = 0,10-2,20m	0,76	0,56	0,91

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

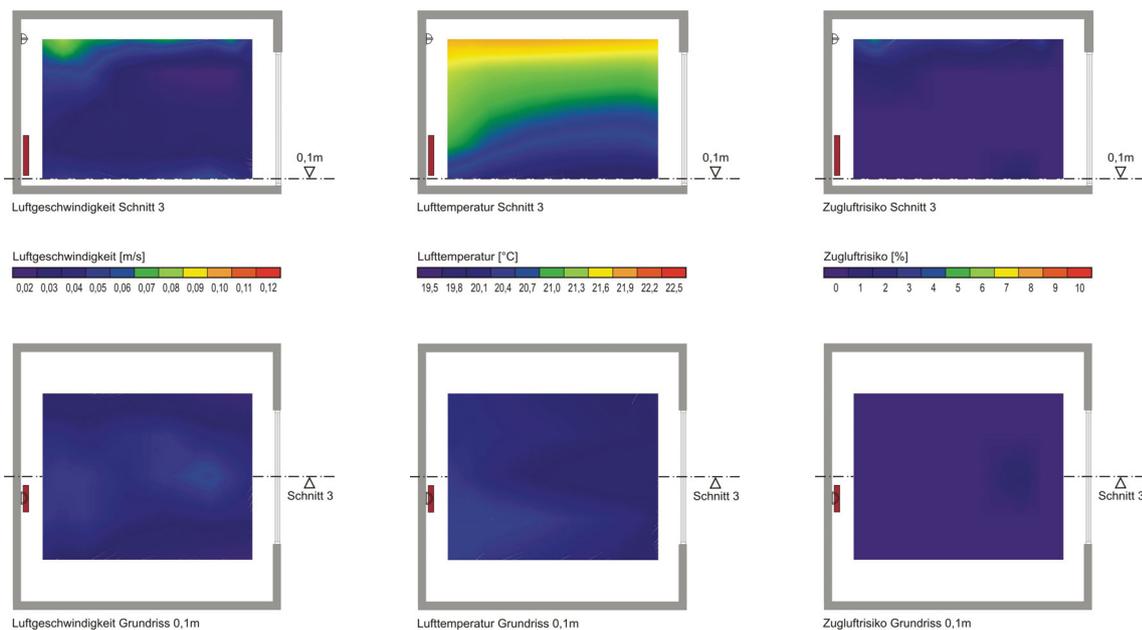
40 m³/h

Zuluftventil:

Lochblechventil

Zulufttemperatur:

ca. Raumlufttemperatur



Versuch 41

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,038	0,019	0,061
h = 0,60m	0,033	0,024	0,038
h = 1,10m	0,037	0,026	0,080
h = 1,70m	0,043	0,021	0,070
h = 2,20m	0,040	0,015	0,086

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,18	19,90	20,36
h = 0,60m	20,60	20,35	20,79
h = 1,10m	21,00	20,77	21,28
h = 1,70m	21,29	21,13	21,47
h = 2,20m	21,65	21,28	21,97

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,82	0,66	1,11
h = 0,10-1,70m	0,69	0,51	0,84
h = 0,10-2,20m	0,70	0,56	0,79

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

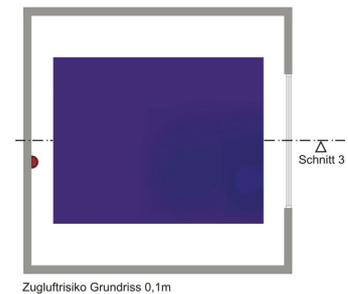
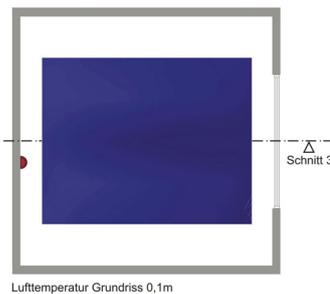
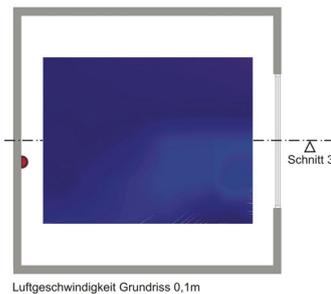
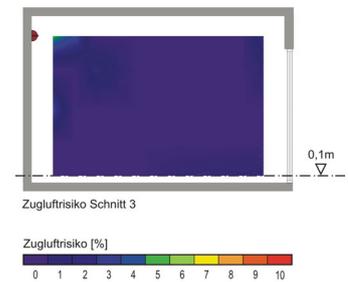
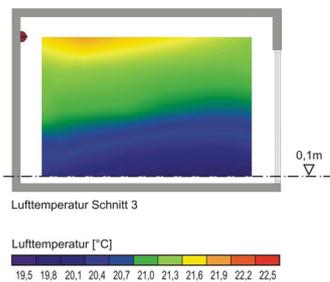
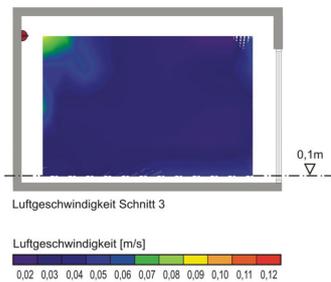
Zuluft

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise



Versuch 42

Luftgeschwindigkeiten

	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,036	0,021	0,049
h = 0,60m	0,032	0,022	0,038
h = 1,10m	0,039	0,030	0,042
h = 1,70m	0,057	0,016	0,110
h = 2,20m	0,064	0,028	0,147

Lufttemperaturen

	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,19	19,82	20,39
h = 0,60m	20,66	20,39	20,92
h = 1,10m	21,00	20,79	21,12
h = 1,70m	21,88	21,68	22,20
h = 2,20m	22,69	22,31	23,37

Lufttemperaturgradienten

	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 1,10m	0,82	0,67	0,98
h = 1,70m	1,06	0,83	1,47
h = 2,20m	1,19	0,95	1,46

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

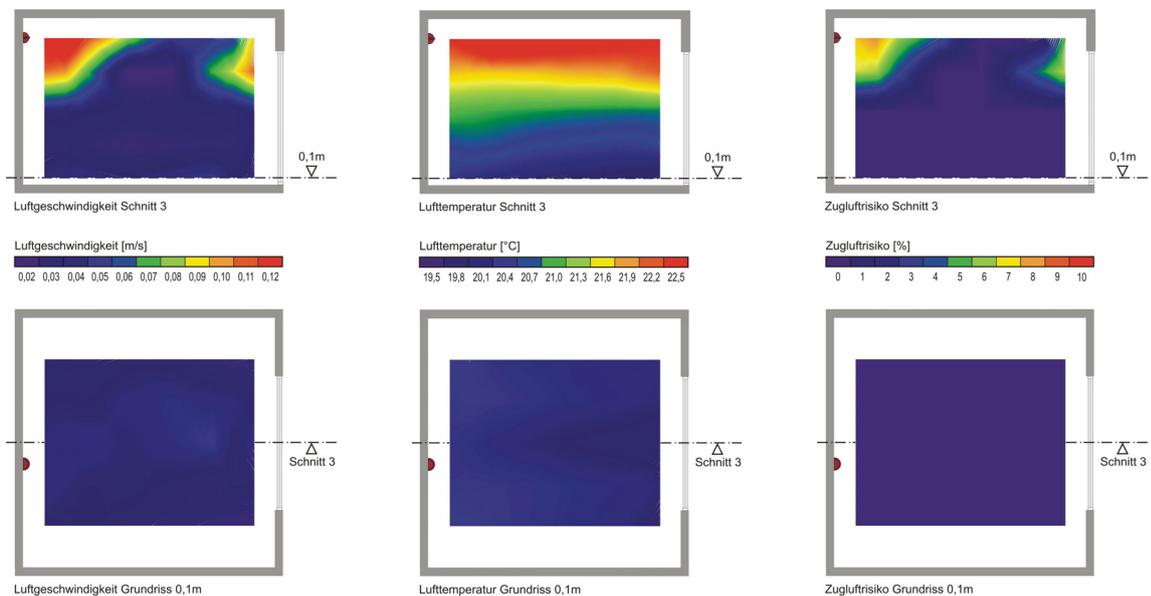
Zuluft

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf



Versuch 43

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,038	0,021	0,054
h = 0,60m	0,031	0,020	0,037
h = 1,10m	0,041	0,034	0,045
h = 1,70m	0,021	0,012	0,044
h = 2,20m	0,029	0,0	0,088

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,25	19,99	20,48
h = 0,60m	20,71	20,42	21,02
h = 1,10m	21,00	20,78	21,12
h = 1,70m	21,75	21,62	21,88
h = 2,20m	22,98	22,45	23,47

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,75	0,62	0,93
h = 0,10-1,70m	0,94	0,85	1,18
h = 0,10-2,20m	1,30	0,99	1,58

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

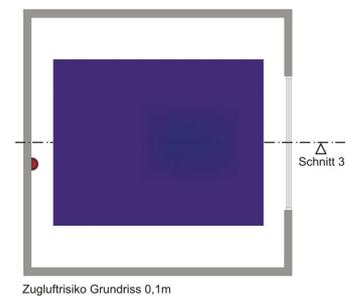
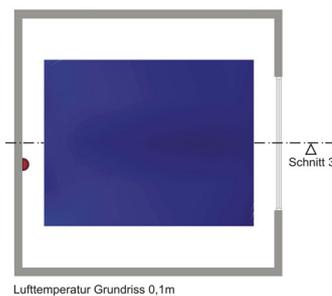
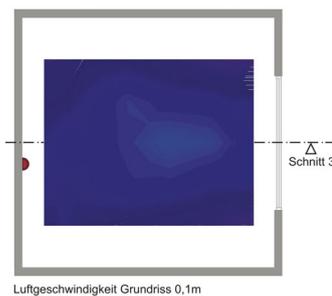
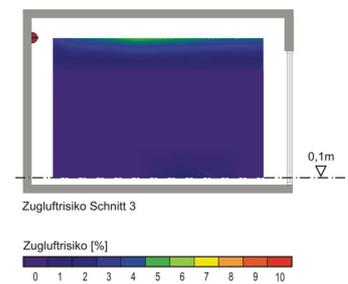
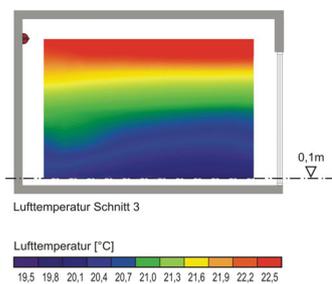
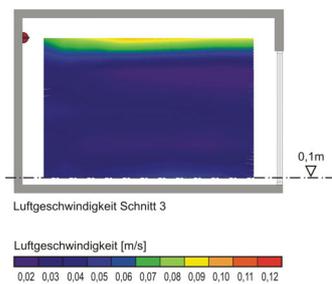
Zuluft

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

Lochblechventil



Versuch 44

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,043	0,019	0,110
h = 0,60m	0,030	0,020	0,052
h = 1,10m	0,055	0,021	0,114
h = 1,70m	0,053	0,028	0,092
h = 2,20m	0,051	0,018	0,117

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,21	19,93	20,41
h = 0,60m	20,71	20,44	21,04
h = 1,10m	21,00	20,84	21,24
h = 1,70m	21,20	21,04	21,36
h = 2,20m	21,46	21,15	21,75

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,79	0,60	0,92
h = 0,10-1,70m	0,61	0,45	0,70
h = 0,10-2,20m	0,59	0,48	0,68

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

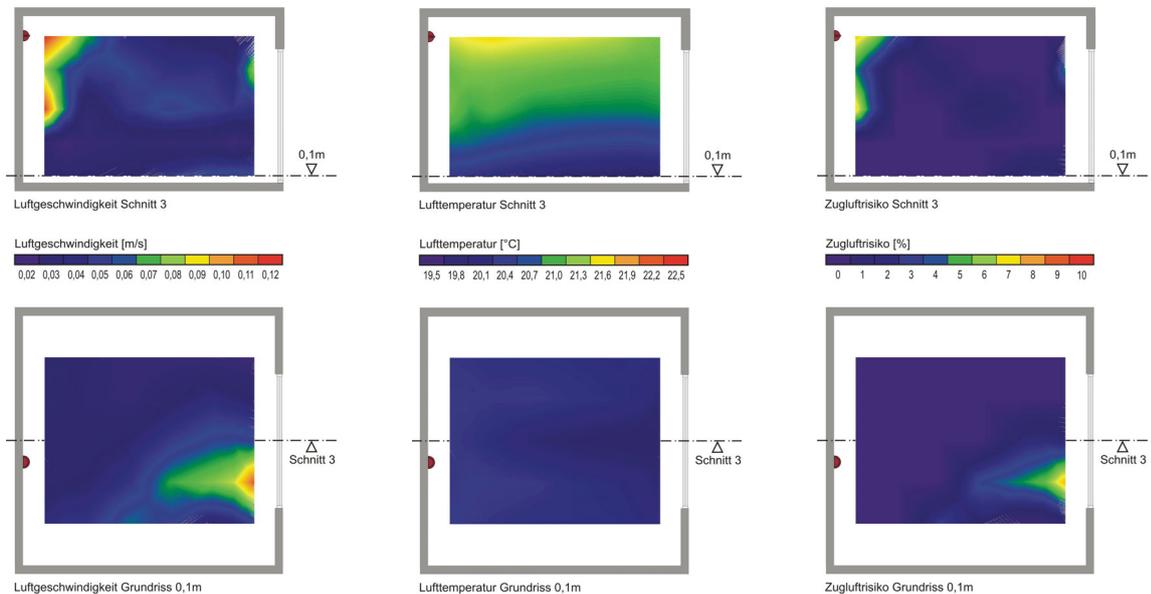
Zuluft

Luftmenge:

60 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise



Versuch 45

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,037	0,019	0,073
h = 0,60m	0,030	0,018	0,046
h = 1,10m	0,058	0,024	0,122
h = 1,70m	0,080	0,027	0,141
h = 2,20m	0,080	0,030	0,190

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,00	19,68	20,18
h = 0,60m	20,54	20,36	20,77
h = 1,10m	21,00	20,81	21,38
h = 1,70m	21,30	21,14	21,64
h = 2,20m	21,69	21,30	22,01

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	1,00	0,68	1,63
h = 0,10-1,70m	0,81	0,61	1,19
h = 0,10-2,20m	0,80	0,60	0,95

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

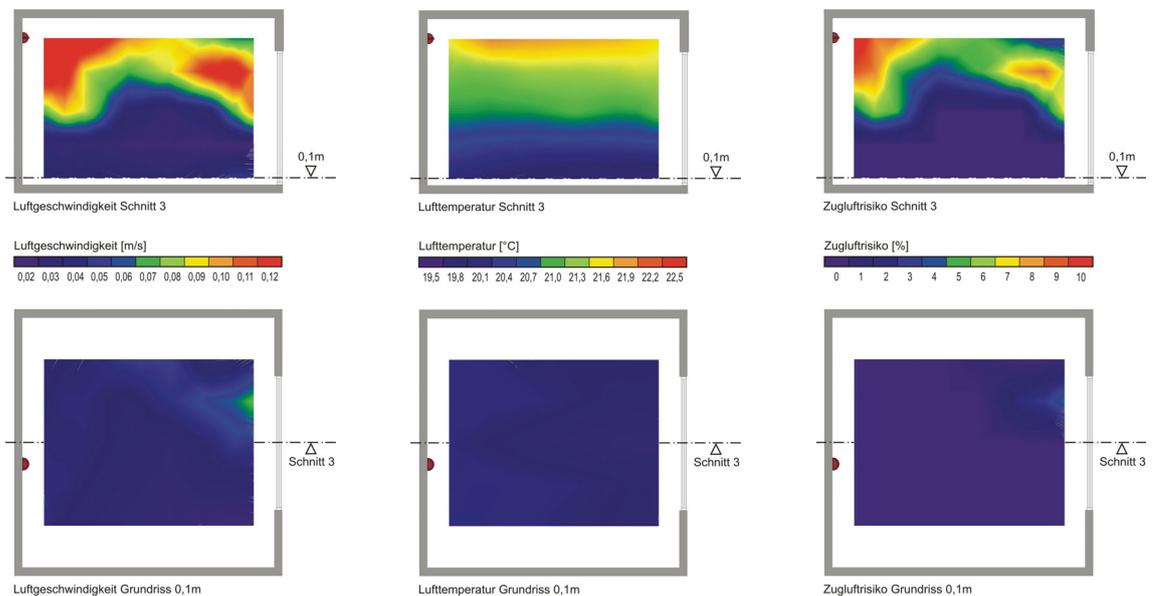
Zuluft

Luftmenge:

60 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf



Versuch 46

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,031	0,022	0,040
h = 0,60m	0,030	0,022	0,035
h = 1,10m	0,035	0,020	0,072
h = 1,70m	0,055	0,022	0,108
h = 2,20m	0,088	0,031	0,147

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	19,97	19,56	20,20
h = 0,60m	20,54	20,33	20,69
h = 1,10m	21,00	20,83	21,49
h = 1,70m	21,39	21,25	21,70
h = 2,20m	21,83	21,31	22,21

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	1,03	0,78	1,81
h = 0,10-1,70m	0,89	0,65	1,27
h = 0,10-2,20m	0,89	0,53	1,12

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

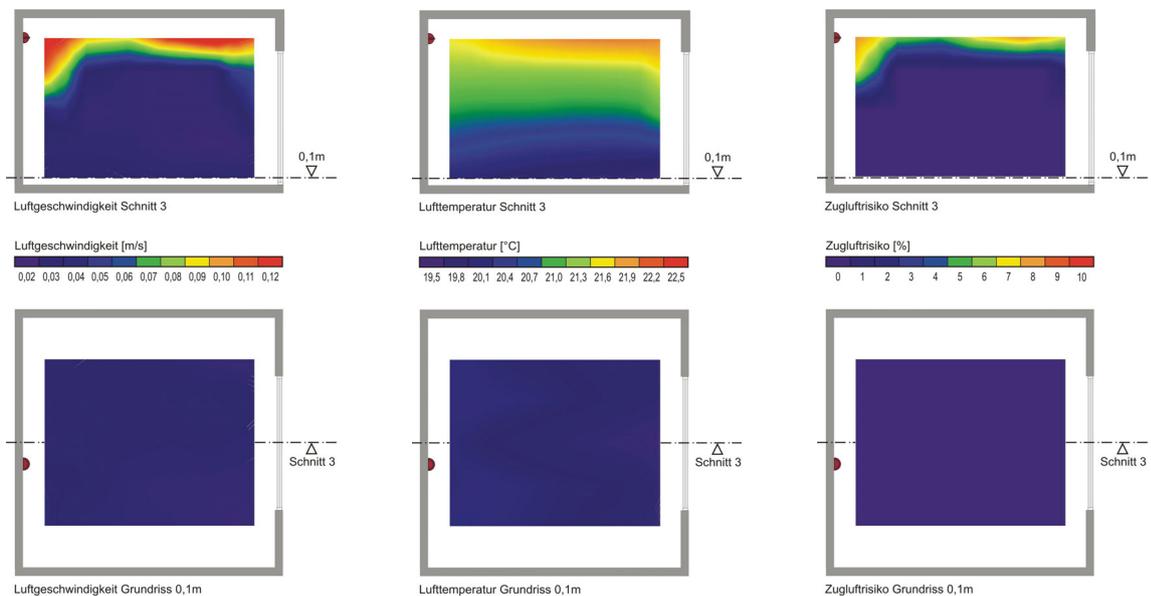
Zuluft

Luftmenge:

60 m³/h

Zuluftventil:

Lochblechventil



Versuch 48

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,047	0,031	0,067
h = 0,60m	0,030	0,020	0,037
h = 1,10m	0,041	0,031	0,045
h = 1,70m	0,029	0,024	0,033
h = 2,20m	0,038	0,017	0,082

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,42	20,18	20,59
h = 0,60m	20,80	20,55	21,02
h = 1,10m	21,00	20,75	21,18
h = 1,70m	21,33	21,16	21,52
h = 2,20m	22,17	21,97	22,36

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,59	0,50	0,74
h = 0,10-1,70m	0,57	0,49	0,66
h = 0,10-2,20m	0,84	0,75	0,92

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

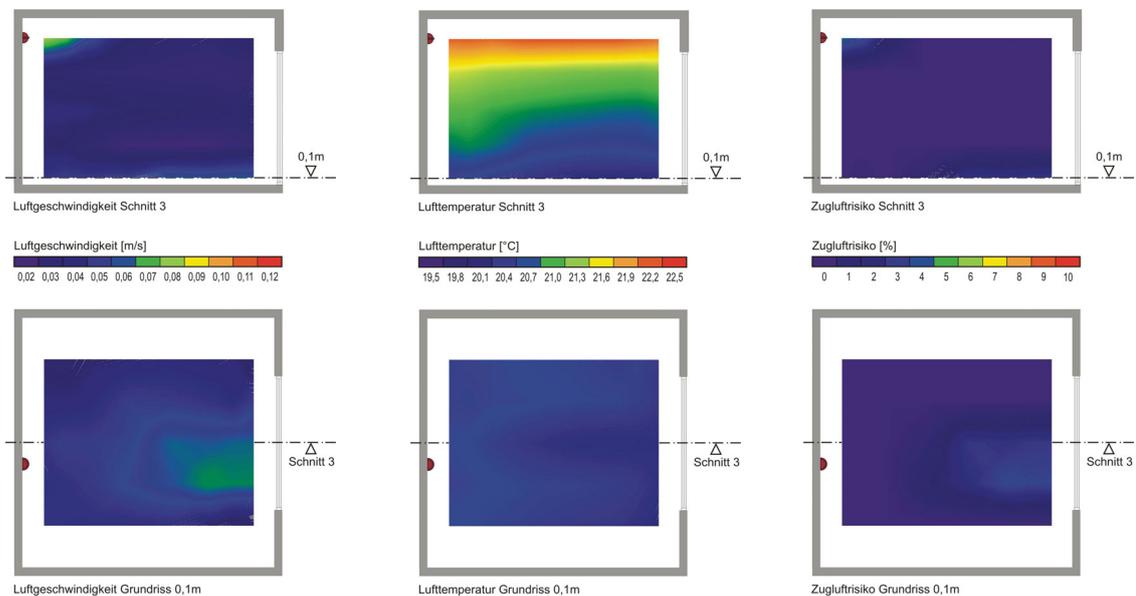
Zuluft

Luftmenge:

20 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise



Versuch 49

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,044	0,030	0,063
h = 0,60m	0,031	0,022	0,037
h = 1,10m	0,042	0,033	0,047
h = 1,70m	0,028	0,023	0,034
h = 2,20m	0,048	0,020	0,093

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,43	20,13	20,62
h = 0,60m	20,81	20,49	21,06
h = 1,10m	21,00	20,72	21,17
h = 1,70m	21,34	21,12	21,47
h = 2,20m	22,30	22,04	22,60

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,57	0,50	0,75
h = 0,10-1,70m	0,57	0,51	0,68
h = 0,10-2,20m	0,89	0,68	1,05

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

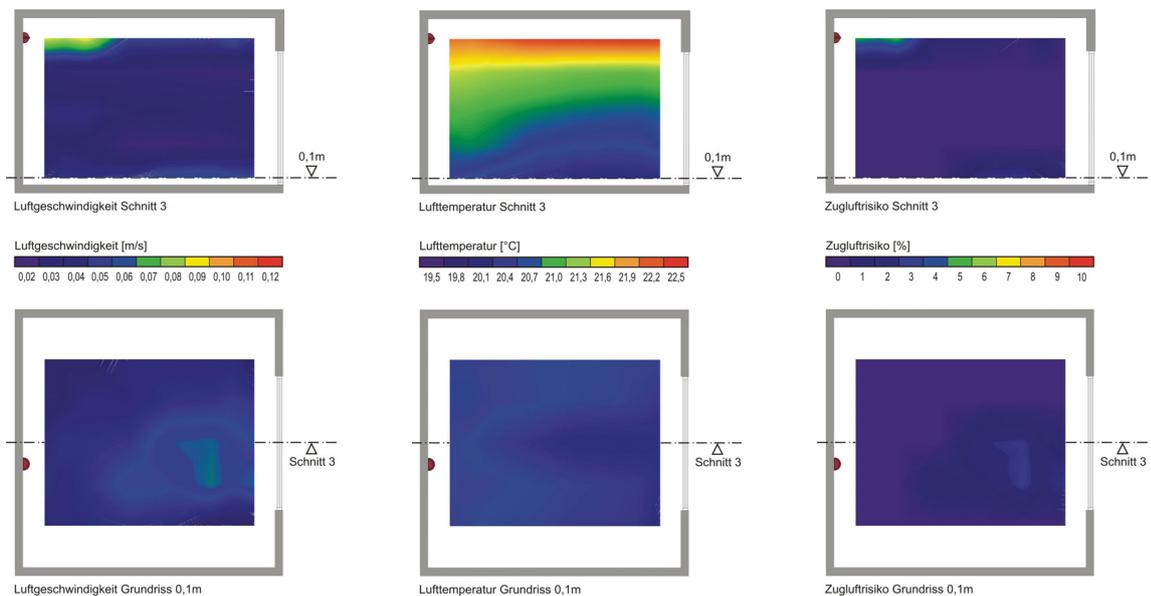
Zuluft

Luftmenge:

20 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf



Versuch 52

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,051	0,023	0,069
h = 0,60m	0,034	0,026	0,040
h = 1,10m	0,040	0,026	0,049
h = 1,70m	0,033	0,017	0,062
h = 2,20m	0,045	0,024	0,069

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,37	20,10	20,63
h = 0,60m	20,83	20,48	21,38
h = 1,10m	21,00	20,62	21,41
h = 1,70m	21,14	20,93	21,33
h = 2,20m	21,30	21,04	21,71

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,63	0,49	0,83
h = 0,10-1,70m	0,48	0,38	0,60
h = 0,10-2,20m	0,44	0,32	0,57

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

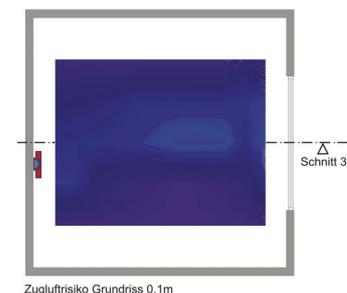
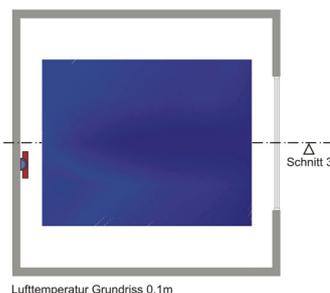
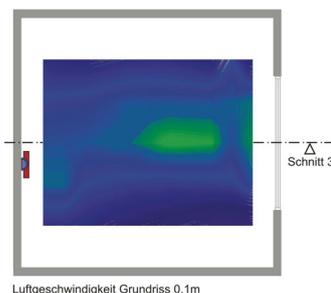
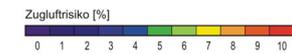
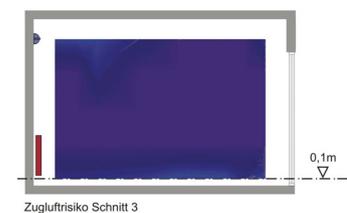
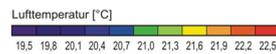
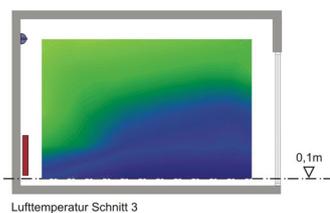
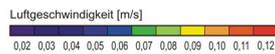
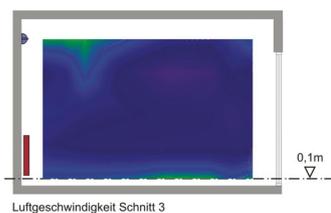
20 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur

14°C



Versuch 53

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,049	0,021	0,067
h = 0,60m	0,034	0,024	0,043
h = 1,10m	0,039	0,025	0,047
h = 1,70m	0,033	0,015	0,064
h = 2,20m	0,046	0,026	0,083

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,39	20,12	20,72
h = 0,60m	20,83	20,51	21,46
h = 1,10m	21,00	20,65	21,48
h = 1,70m	21,15	20,96	21,42
h = 2,20m	21,30	20,98	21,53

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,61	0,47	0,82
h = 0,10-1,70m	0,47	0,35	0,61
h = 0,10-2,20m	0,43	0,31	0,52

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

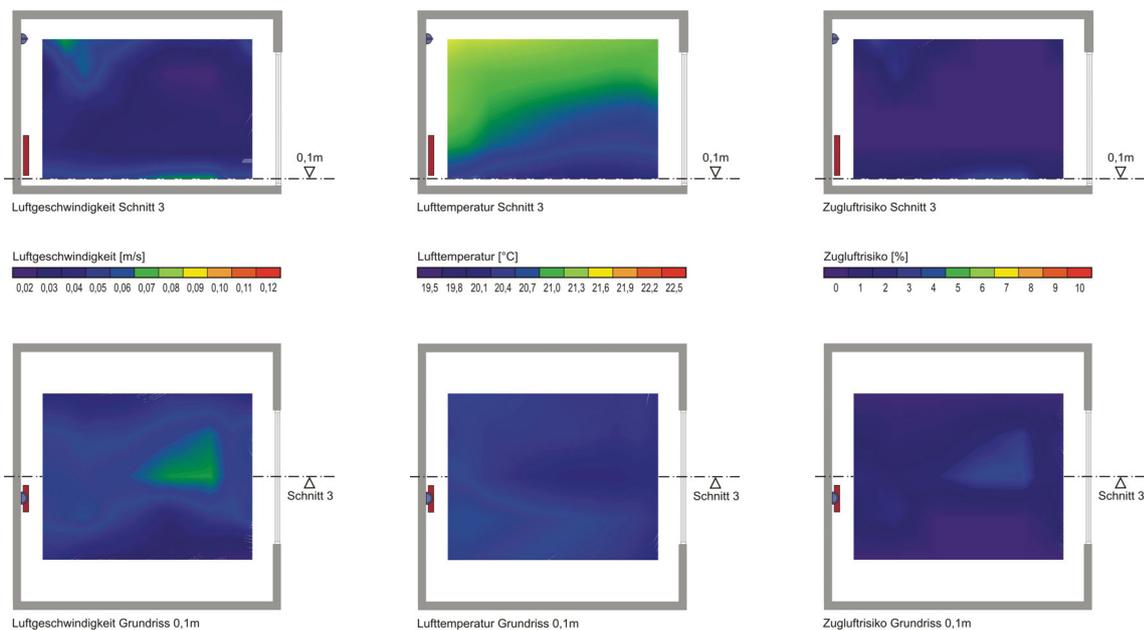
20 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur

12°C



Versuch 55

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,061	0,020	0,106
h = 0,60m	0,039	0,021	0,072
h = 1,10m	0,056	0,032	0,113
h = 1,70m	0,056	0,028	0,098
h = 2,20m	0,078	0,042	0,153

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,57	20,28	20,80
h = 0,60m	20,93	20,78	21,21
h = 1,10m	21,00	20,86	21,28
h = 1,70m	21,01	20,85	21,20
h = 2,20m	20,84	20,64	21,03

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,43	0,27	0,64
h = 0,10-1,70m	0,28	0,16	0,37
h = 0,10-2,20m	0,13	0,02	0,23

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

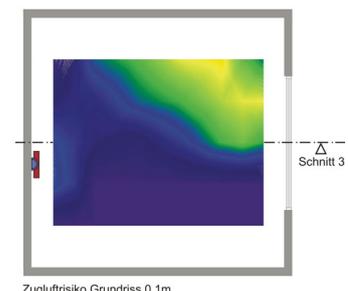
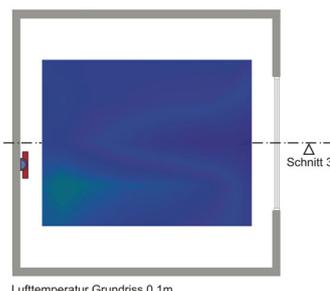
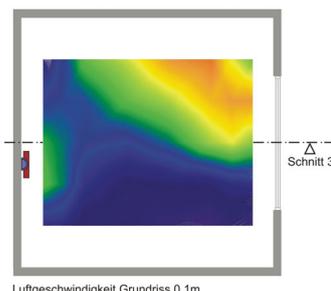
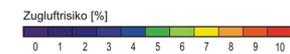
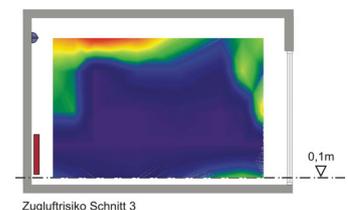
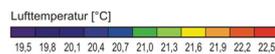
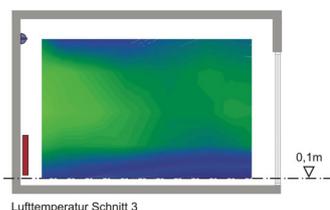
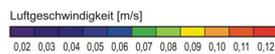
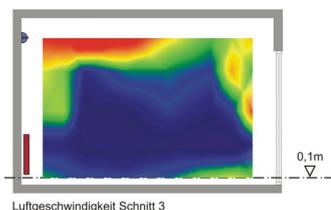
40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur

14°C



Versuch 56

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,075	0,023	0,129
h = 0,60m	0,045	0,025	0,078
h = 1,10m	0,052	0,029	0,107
h = 1,70m	0,051	0,026	0,096
h = 2,20m	0,083	0,046	0,181

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,68	20,46	20,96
h = 0,60m	20,99	20,80	21,30
h = 1,10m	21,00	20,80	21,30
h = 1,70m	20,96	20,73	21,22
h = 2,20m	20,69	20,41	20,93

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,052	0,029	0,107
h = 0,10-1,70m	0,051	0,026	0,096
h = 0,10-2,20m	0,083	0,046	0,181

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

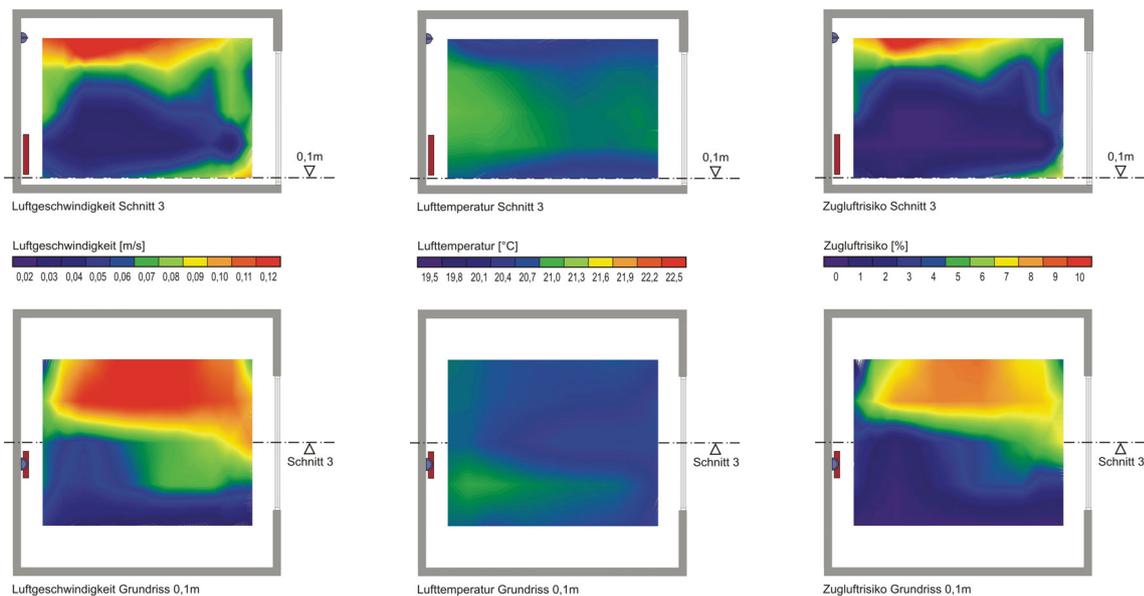
40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur

12°C



Versuch 57

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,129	0,064	0,172
h = 0,60m	0,084	0,038	0,144
h = 1,10m	0,087	0,036	0,145
h = 1,70m	0,070	0,032	0,150
h = 2,20m	0,105	0,052	0,201

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,74	20,50	20,89
h = 0,60m	21,01	20,85	21,31
h = 1,10m	21,00	20,83	21,20
h = 1,70m	20,97	20,79	21,14
h = 2,20m	20,77	20,50	20,92

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,26	0,09	0,40
h = 0,10-1,70m	0,15	0,00	0,27
h = 0,10-2,20m	0,01	-0,14	0,15

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

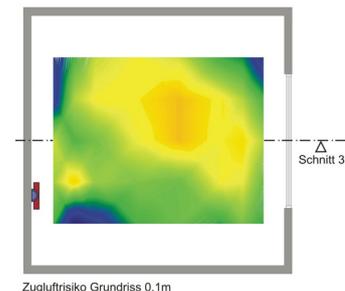
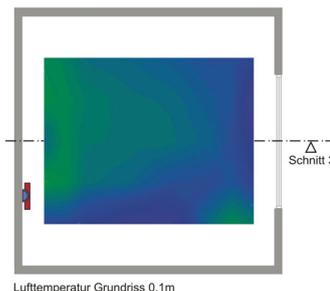
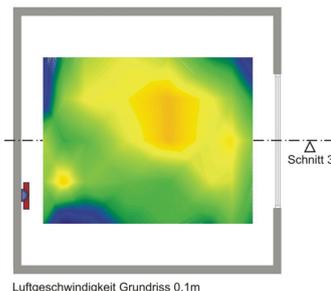
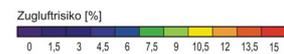
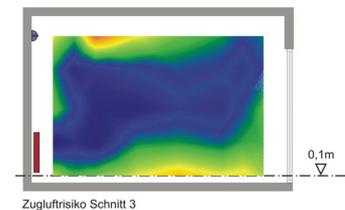
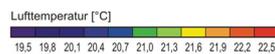
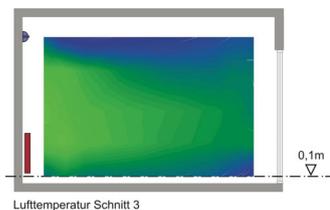
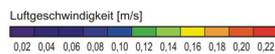
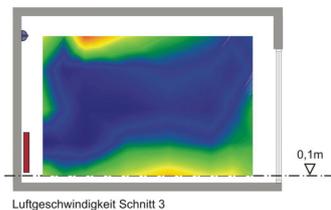
60 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur

16°C



Versuch 58

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,151	0,066	0,210
h = 0,60m	0,105	0,035	0,187
h = 1,10m	0,083	0,047	0,174
h = 1,70m	0,079	0,036	0,157
h = 2,20m	0,119	0,043	0,256

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,80	20,39	21,05
h = 0,60m	21,04	20,77	21,42
h = 1,10m	21,00	20,72	21,28
h = 1,70m	20,93	20,58	21,20
h = 2,20m	20,62	20,23	20,86

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,20	0,08	0,40
h = 0,10-1,70m	0,08	-0,08	0,25
h = 0,10-2,20m	-0,09	-0,30	0,07

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

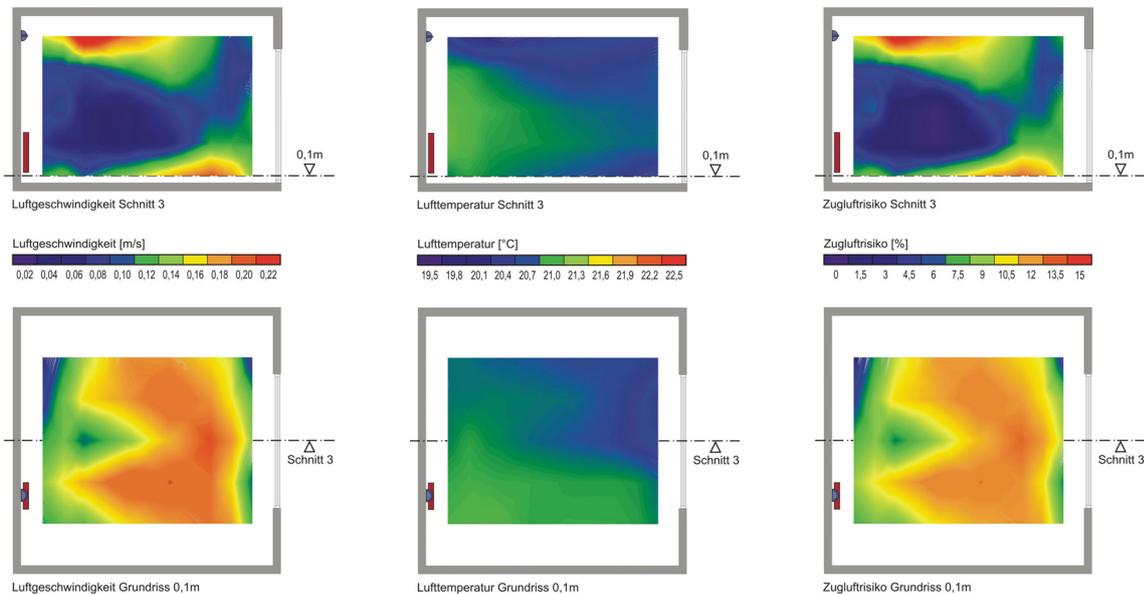
60 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur

14°C



Versuch 63

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,077	0,036	0,174
h = 0,60m	0,044	0,025	0,074
h = 1,10m	0,050	0,031	0,089
h = 1,70m	0,068	0,023	0,130
h = 2,20m	0,124	0,033	0,312

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,40	19,97	20,80
h = 0,60m	20,89	20,60	21,26
h = 1,10m	21,00	20,72	21,59
h = 1,70m	21,22	20,90	21,70
h = 2,20m	21,50	20,60	23,20

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,60	0,32	0,85
h = 0,10-1,70m	0,51	0,28	0,69
h = 0,10-2,20m	0,53	-0,04	1,12

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

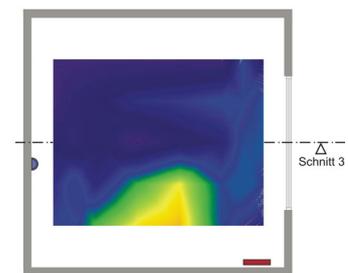
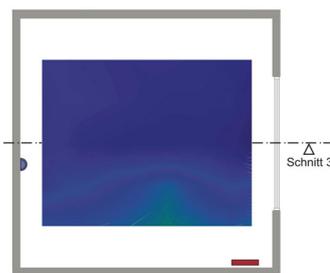
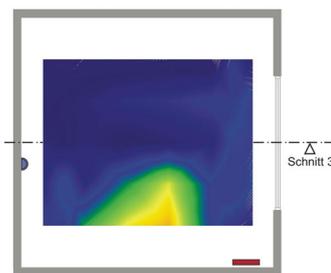
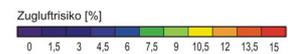
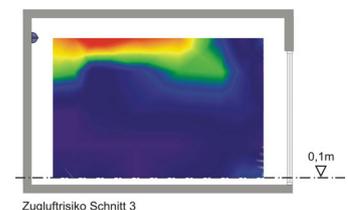
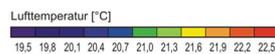
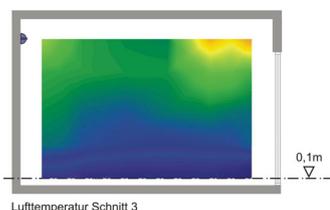
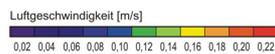
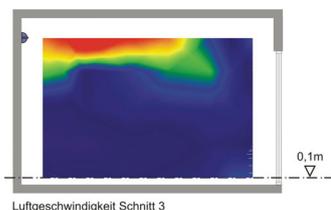
60 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur

14°C



Versuch 64

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,079	0,047	0,175
h = 0,60m	0,046	0,027	0,075
h = 1,10m	0,055	0,032	0,078
h = 1,70m	0,068	0,028	0,139
h = 2,20m	0,128	0,038	0,313

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,42	20,09	20,70
h = 0,60m	20,91	20,72	21,91
h = 1,10m	21,00	20,82	21,34
h = 1,70m	21,14	20,96	21,36
h = 2,20m	21,24	20,49	22,49

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,58	0,32	0,79
h = 0,10-1,70m	0,45	0,23	0,65
h = 0,10-2,20m	0,39	-0,02	0,83

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

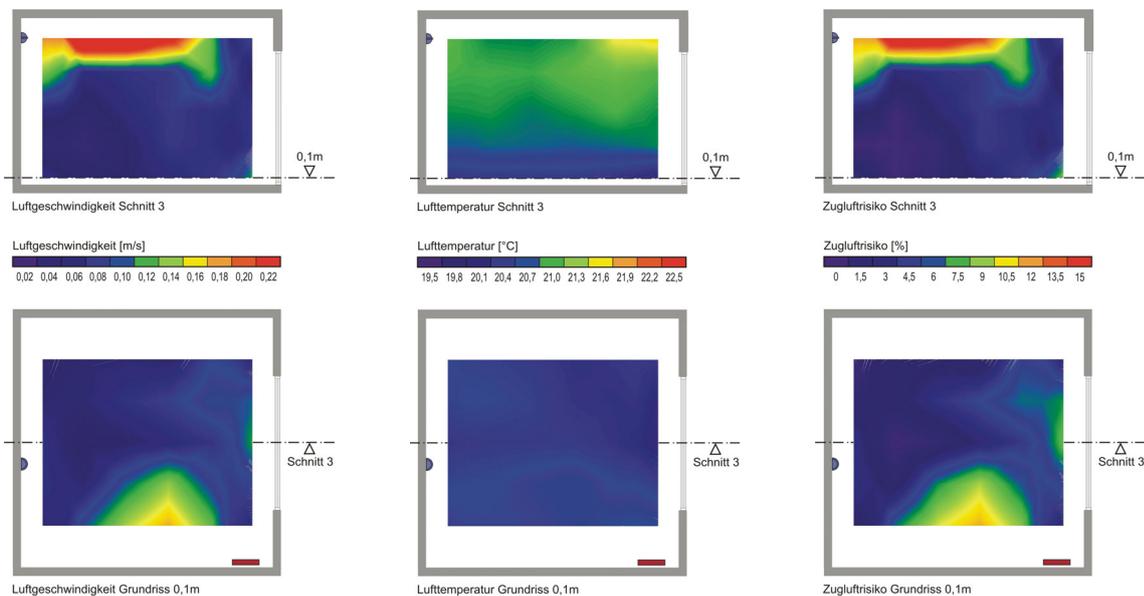
60 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur

16°C



Versuch 69

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,058	0,040	0,081
h = 0,60m	0,032	0,024	0,041
h = 1,10m	0,037	0,028	0,049
h = 1,70m	0,032	0,021	0,056
h = 2,20m	0,062	0,032	0,117

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,21	20,00	20,43
h = 0,60m	20,79	20,58	21,03
h = 1,10m	21,00	20,77	21,36
h = 1,70m	21,12	20,85	21,32
h = 2,20m	21,53	20,45	22,15

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,79	0,62	1,06
h = 0,10-1,70m	0,57	0,47	0,67
h = 0,10-2,20m	0,63	0,06	0,95

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

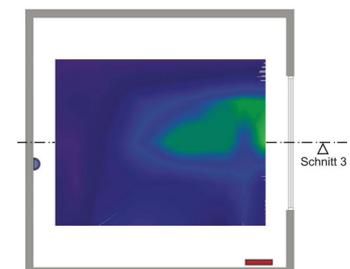
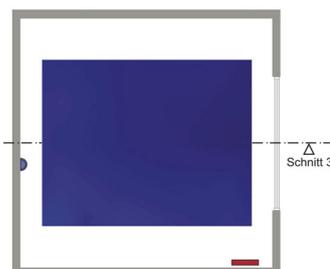
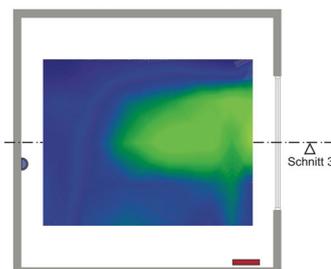
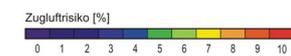
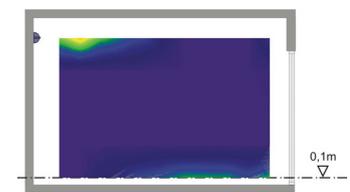
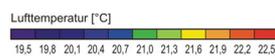
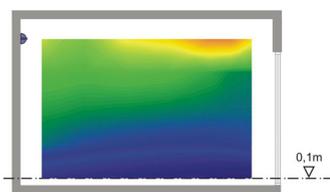
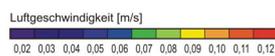
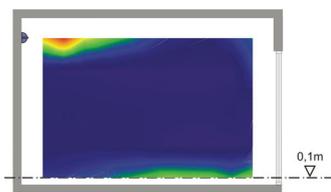
20 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur

12°C



Versuch 71

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,087	0,026	0,178
h = 0,60m	0,032	0,020	0,045
h = 1,10m	0,040	0,032	0,055
h = 1,70m	0,033	0,026	0,062
h = 2,20m	0,050	0,018	0,150

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,45	20,01	20,86
h = 0,60m	20,91	20,62	21,54
h = 1,10m	21,00	20,67	21,45
h = 1,70m	21,20	20,71	21,59
h = 2,20m	21,91	20,98	22,23

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,55	0,22	0,90
h = 0,10-1,70m	0,47	0,28	0,67
h = 0,10-2,20m	0,70	0,36	0,93

Außentemperatur:

-1°C

Beheizung:

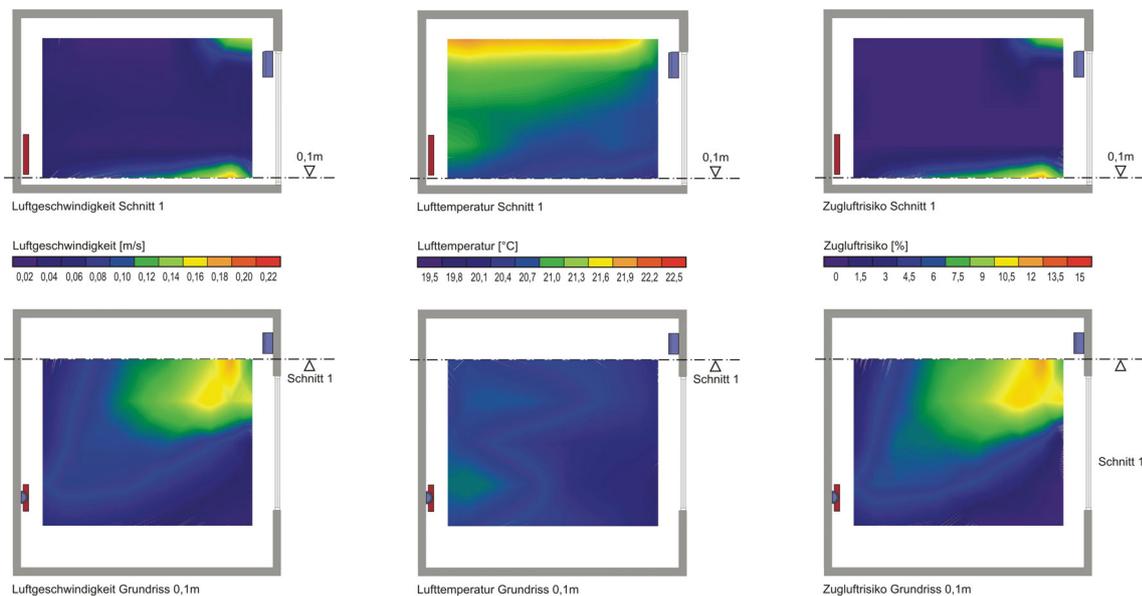
Heizkörper Türe

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

Dezentral



Versuch 72

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,094	0,027	0,197
h = 0,60m	0,034	0,021	0,054
h = 1,10m	0,040	0,033	0,054
h = 1,70m	0,034	0,028	0,058
h = 2,20m	0,053	0,017	0,151

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,43	20,04	20,75
h = 0,60m	20,92	20,61	21,45
h = 1,10m	21,00	20,71	21,33
h = 1,70m	21,23	20,73	21,54
h = 2,20m	22,04	21,10	22,48

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,57	0,20	0,95
h = 0,10-1,70m	0,50	0,23	0,69
h = 0,10-2,20m	0,77	0,41	1,04

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

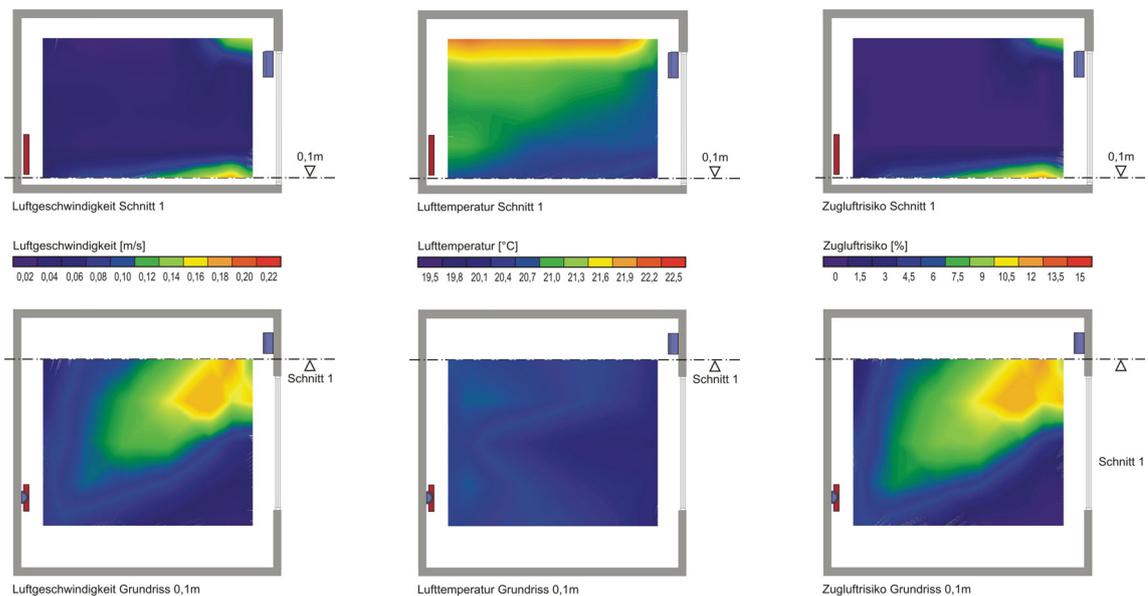
Heizkörper Türe

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

Dezentral



Versuch 73

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,090	0,042	0,170
h = 0,60m	0,033	0,024	0,040
h = 1,10m	0,038	0,029	0,050
h = 1,70m	0,034	0,025	0,077
h = 2,20m	0,043	0,018	0,174

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,44	20,06	20,71
h = 0,60m	20,90	20,61	21,10
h = 1,10m	21,00	20,77	21,42
h = 1,70m	21,32	21,05	21,58
h = 2,20m	22,00	21,65	22,66

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,56	0,27	0,95
h = 0,10-1,70m	0,55	0,34	0,69
h = 0,10-2,20m	0,74	0,58	1,01

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

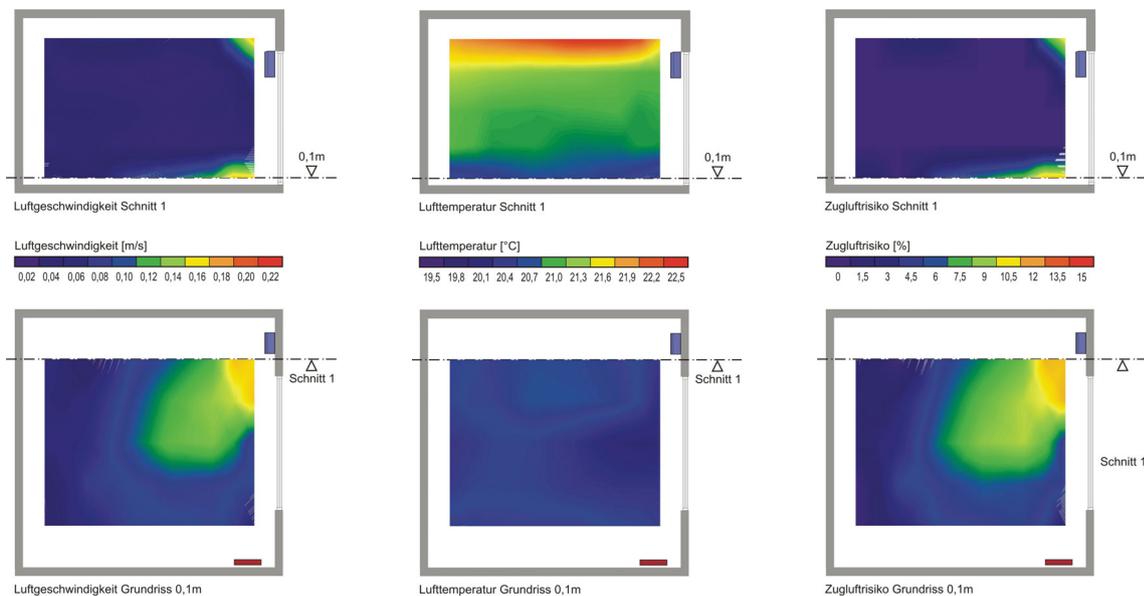
Heizkörper Fassade

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

Dezentral



Versuch 76

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,094	0,043	0,176
h = 0,60m	0,033	0,022	0,041
h = 1,10m	0,039	0,031	0,049
h = 1,70m	0,035	0,026	0,076
h = 2,20m	0,043	0,019	0,159

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,54	20,18	20,73
h = 0,60m	20,91	20,71	21,10
h = 1,10m	21,00	20,86	21,43
h = 1,70m	21,25	20,88	21,49
h = 2,20m	21,69	21,26	22,12

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,47	0,12	0,85
h = 0,10-1,70m	0,45	0,25	0,60
h = 0,10-2,20m	0,55	0,39	0,83

Außentemperatur:

-1°C

Beheizung:

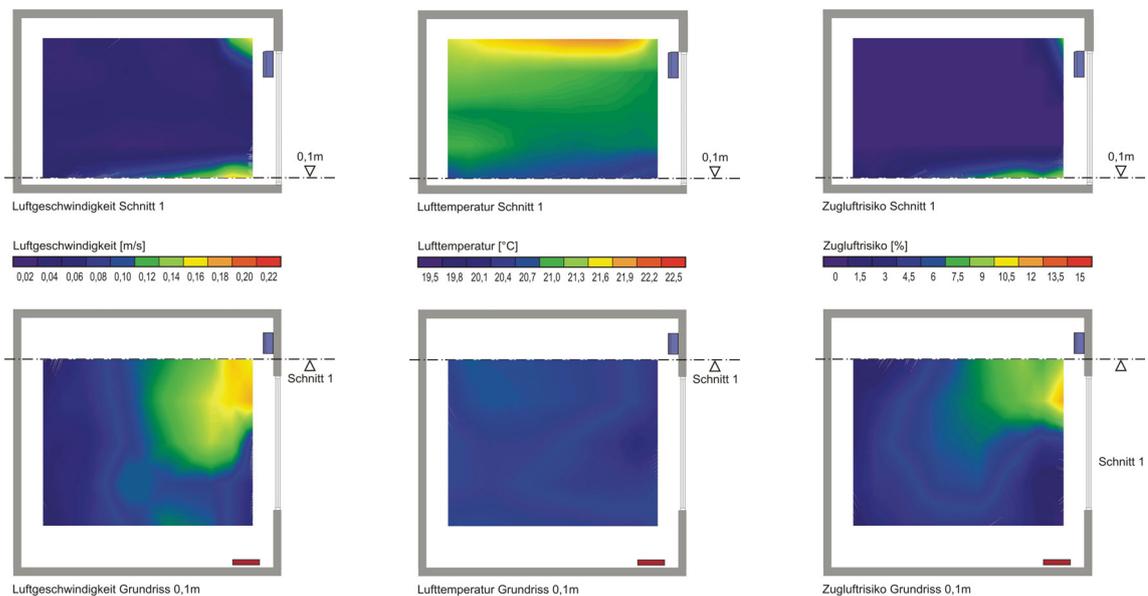
Heizkörper Fassade

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

Dezentral



Versuch 77

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,083	0,042	0,171
h = 0,60m	0,031	0,023	0,037
h = 1,10m	0,037	0,030	0,048
h = 1,70m	0,033	0,027	0,081
h = 2,20m	0,036	0,019	0,122

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,48	20,14	20,64
h = 0,60m	20,86	20,71	21,01
h = 1,10m	21,00	20,86	21,30
h = 1,70m	21,24	20,80	21,45
h = 2,20m	21,71	21,38	22,08

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,52	0,26	0,83
h = 0,10-1,70m	0,48	0,24	0,64
h = 0,10-2,20m	0,59	0,46	0,76

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

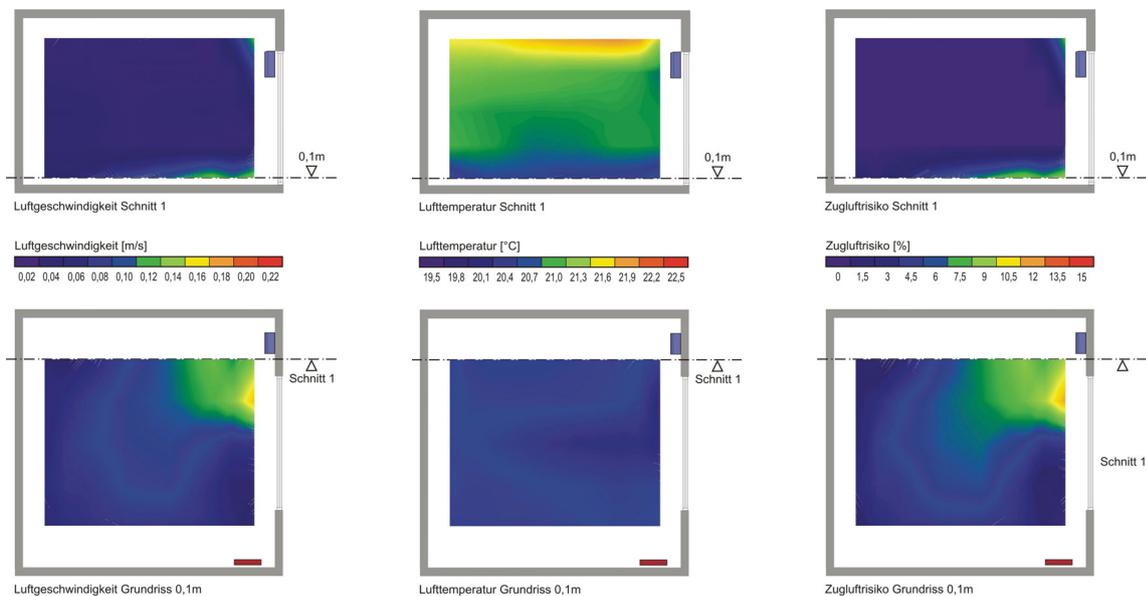
Heizkörper Fassade

Luftmenge:

20 m³/h

Zuluftventil:

Dezentral



Versuch 78

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,122	0,052	0,221
h = 0,60m	0,041	0,027	0,064
h = 1,10m	0,051	0,031	0,098
h = 1,70m	0,044	0,026	0,101
h = 2,20m	0,053	0,017	0,224

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,49	20,00	20,73
h = 0,60m	20,89	20,70	21,08
h = 1,10m	21,00	20,76	21,49
h = 1,70m	21,24	20,76	21,57
h = 2,20m	21,95	21,17	22,42

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,52	0,14	1,01
h = 0,10-1,70m	0,47	0,29	0,68
h = 0,10-2,20m	0,70	0,43	1,00

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

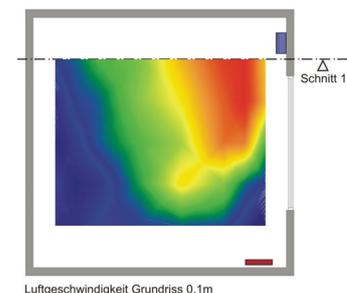
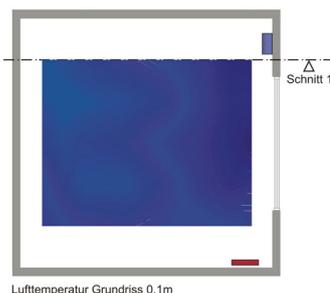
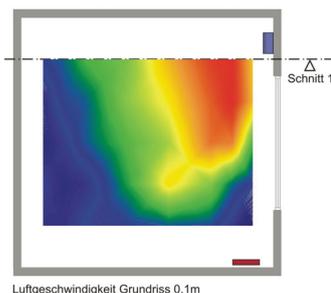
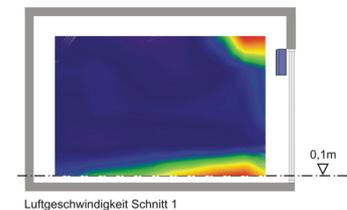
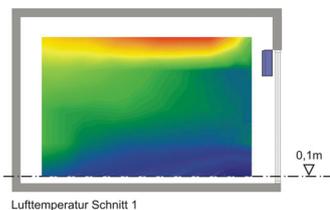
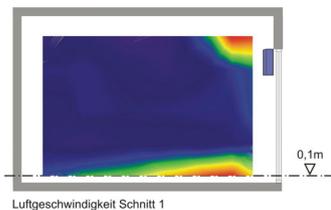
Heizkörper Fassade

Luftmenge:

60 m³/h

Zuluftventil:

Dezentral



Versuch 80

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,068	0,037	0,100
h = 0,60m	0,034	0,019	0,067
h = 1,10m	0,039	0,024	0,072
h = 1,70m	0,043	0,020	0,085
h = 2,20m	0,080	0,032	0,157

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,48	20,21	20,71
h = 0,60m	20,89	20,71	21,17
h = 1,10m	21,00	20,83	21,33
h = 1,70m	21,11	20,81	21,45
h = 2,20m	21,72	20,51	22,37

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,52	0,36	0,69
h = 0,10-1,70m	0,40	0,29	0,49
h = 0,10-2,20m	0,59	-0,04	0,89

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

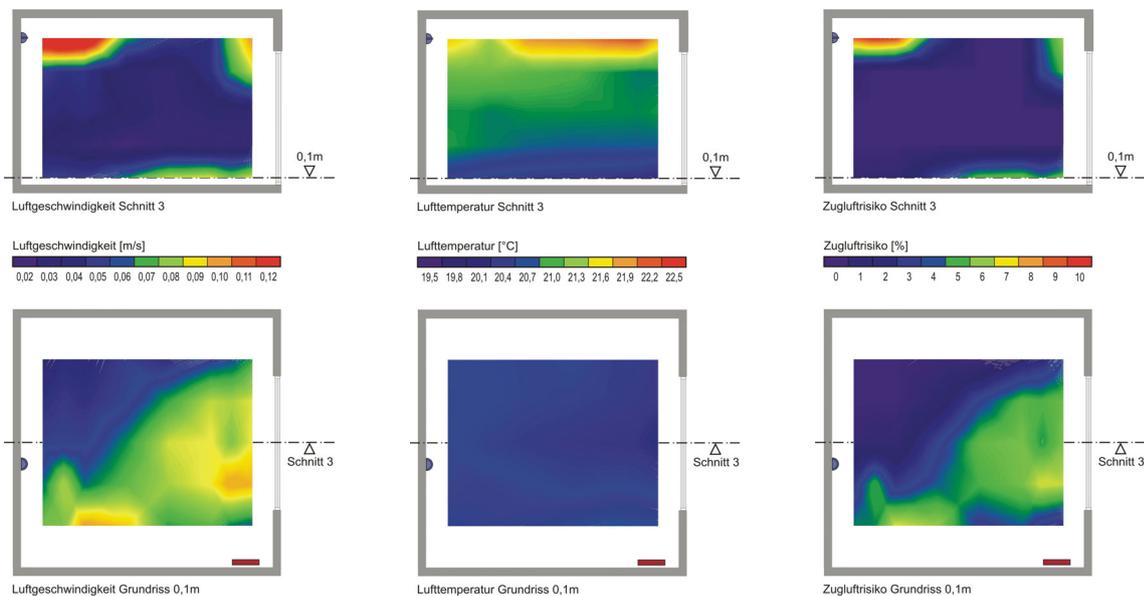
40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur:

12°C



Versuch 81

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,055	0,032	0,081
h = 0,60m	0,030	0,020	0,039
h = 1,10m	0,041	0,032	0,046
h = 1,70m	0,031	0,027	0,034
h = 2,20m	0,039	0,014	0,074

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,24	19,90	20,63
h = 0,60m	20,74	20,47	21,10
h = 1,10m	21,00	20,71	21,32
h = 1,70m	21,43	21,06	21,73
h = 2,20m	22,37	21,97	23,17

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,76	0,61	0,91
h = 0,10-1,70m	0,74	0,62	0,84
h = 0,10-2,20m	1,01	0,86	1,31

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

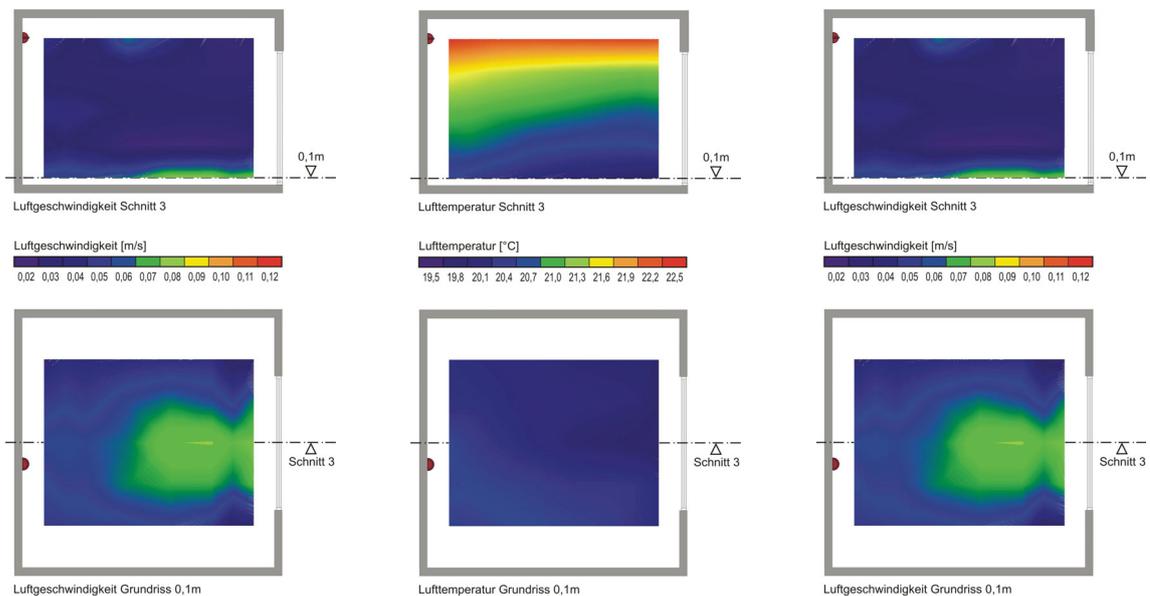
Zuluft

Luftmenge:

20 m³/h

Zuluftventil:

Lochblechventil



Versuch 82

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,072	0,038	0,143
h = 0,60m	0,037	0,027	0,067
h = 1,10m	0,040	0,029	0,070
h = 1,70m	0,047	0,029	0,102
h = 2,20m	0,081	0,035	0,287

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,49	20,16	20,75
h = 0,60m	20,97	20,73	21,17
h = 1,10m	21,00	20,77	21,14
h = 1,70m	21,07	20,90	21,24
h = 2,20m	21,27	20,55	21,95

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,51	0,35	0,76
h = 0,10-1,70m	0,37	0,23	0,59
h = 0,10-2,20m	0,37	0,01	0,73

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

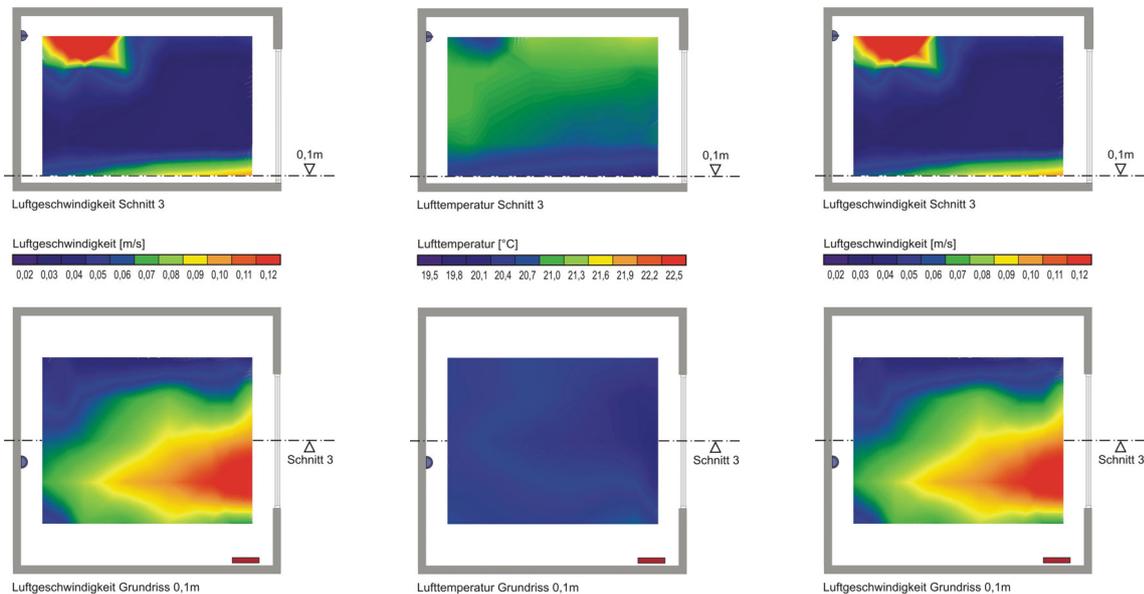
60 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise

Zulufttemperatur:

16°C



Versuch 83

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,063	0,027	0,121
h = 0,60m	0,037	0,024	0,064
h = 1,10m	0,042	0,027	0,073
h = 1,70m	0,049	0,030	0,105
h = 2,20m	0,085	0,035	0,308

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,56	20,29	20,82
h = 0,60m	20,98	20,78	21,15
h = 1,10m	21,00	20,82	21,17
h = 1,70m	21,09	20,89	21,25
h = 2,20m	21,34	20,51	22,19

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,44	0,32	0,61
h = 0,10-1,70m	0,33	0,19	0,51
h = 0,10-2,20m	0,37	0,00	0,71

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

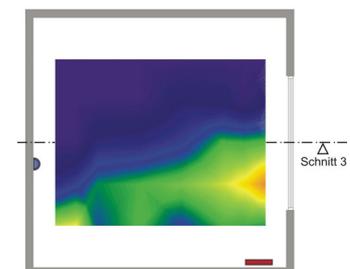
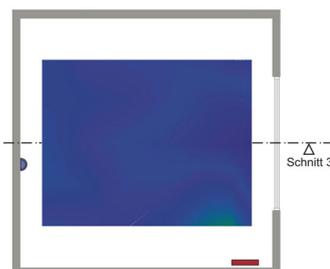
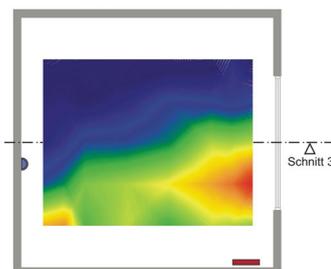
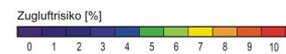
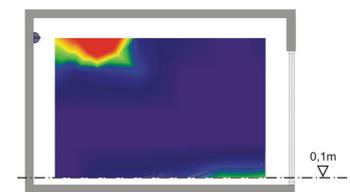
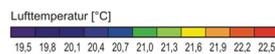
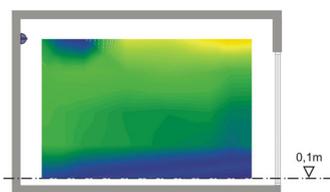
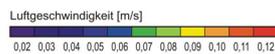
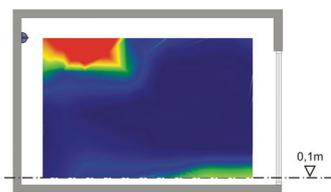
60 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise

Zulufttemperatur:

14°C



Versuch 84

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,052	0,026	0,073
h = 0,60m	0,032	0,024	0,038
h = 1,10m	0,041	0,032	0,045
h = 1,70m	0,028	0,022	0,040
h = 2,20m	0,047	0,018	0,107

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,28	20,03	20,50
h = 0,60m	20,77	20,50	20,95
h = 1,10m	21,00	20,72	21,14
h = 1,70m	21,406	21,18	21,57
h = 2,20m	22,01	21,69	22,73

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,72	0,60	0,85
h = 0,10-1,70m	0,70	0,62	0,78
h = 0,10-2,20m	0,82	0,68	1,03

Außentemperatur:

-11°C

Beheizung:

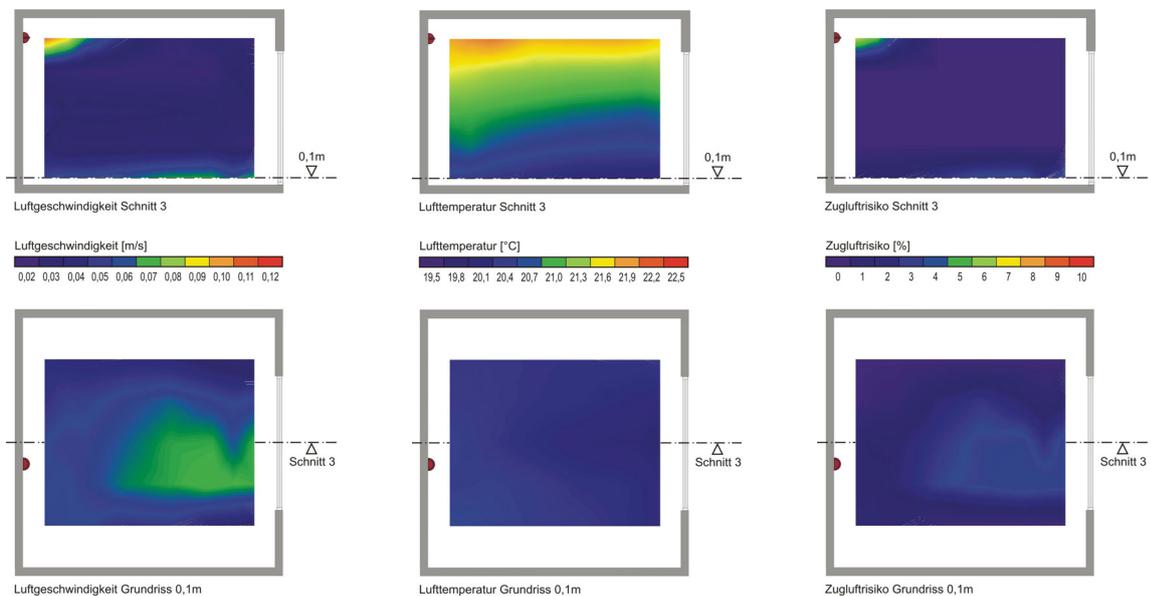
Zuluft

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise



Versuch 85

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,047	0,029	0,064
h = 0,60m	0,031	0,020	0,038
h = 1,10m	0,038	0,026	0,048
h = 1,70m	0,051	0,020	0,103
h = 2,20m	0,081	0,035	0,162

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,23	19,88	20,54
h = 0,60m	20,77	20,52	21,02
h = 1,10m	21,00	20,81	21,17
h = 1,70m	21,45	21,26	21,86
h = 2,20m	21,87	21,44	22,30

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,77	0,62	0,95
h = 0,10-1,70m	0,77	0,56	1,10
h = 0,10-2,20m	0,78	0,51	0,94

Außentemperatur:

-11°C

Beheizung:

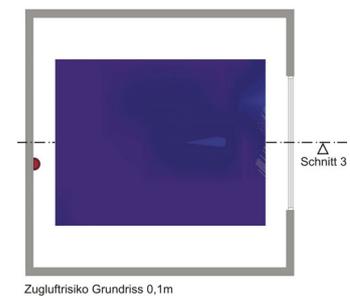
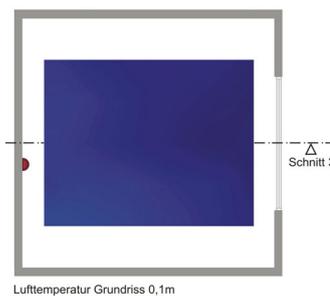
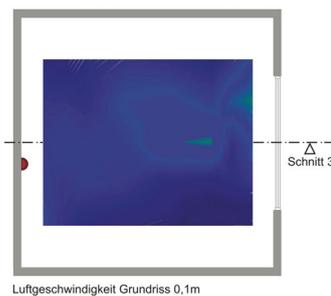
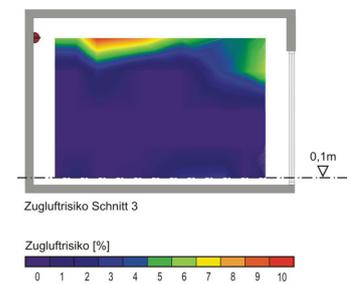
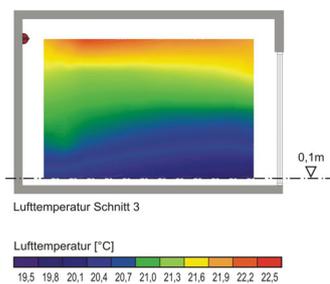
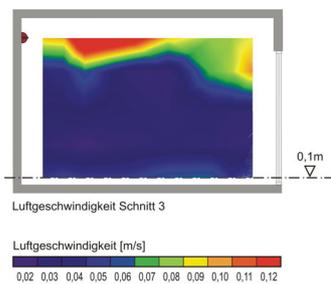
Zuluft

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf



Versuch 86

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,053	0,029	0,072
h = 0,60m	0,032	0,026	0,037
h = 1,10m	0,041	0,030	0,047
h = 1,70m	0,032	0,027	0,035
h = 2,20m	0,046	0,022	0,086

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,37	20,12	20,63
h = 0,60m	20,81	20,58	21,06
h = 1,10m	21,00	20,75	21,21
h = 1,70m	21,31	21,11	21,53
h = 2,20m	21,91	21,66	22,49

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,63	0,53	0,75
h = 0,10-1,70m	0,59	0,52	0,67
h = 0,10-2,20m	0,74	0,61	0,90

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

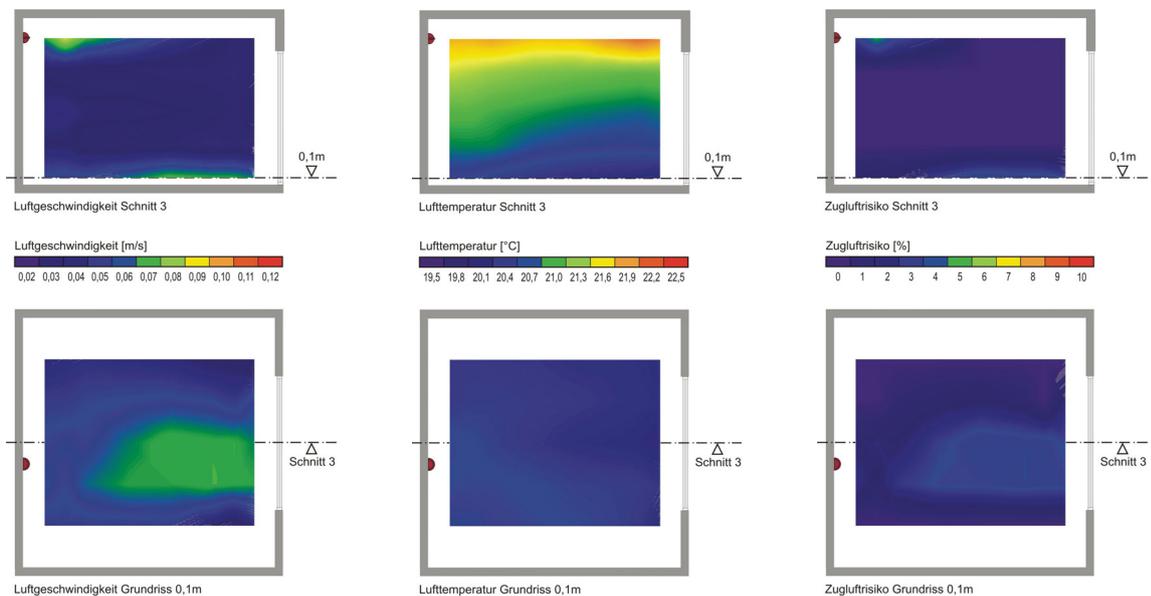
Zuluft

Luftmenge:

20 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise



Versuch 87

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,050	0,030	0,069
h = 0,60m	0,032	0,024	0,038
h = 1,10m	0,041	0,032	0,046
h = 1,70m	0,030	0,025	0,040
h = 2,20m	0,054	0,020	0,105

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,36	20,11	20,55
h = 0,60m	20,80	20,54	20,98
h = 1,10m	21,00	20,76	21,15
h = 1,70m	21,35	21,16	21,49
h = 2,20m	22,08	21,71	22,54

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,64	0,52	0,75
h = 0,10-1,70m	0,62	0,55	0,70
h = 0,10-2,20m	0,82	0,60	0,98

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

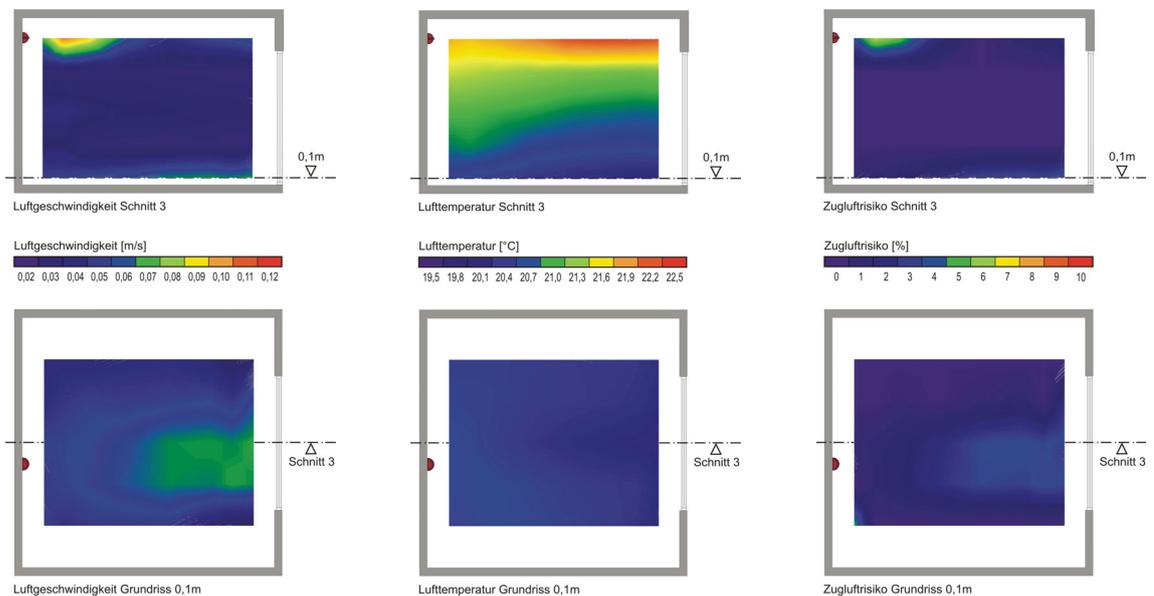
Zuluft

Luftmenge:

20 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf



Versuch 88

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,055	0,029	0,082
h = 0,60m	0,033	0,024	0,038
h = 1,10m	0,040	0,031	0,044
h = 1,70m	0,027	0,013	0,036
h = 2,20m	0,051	0,026	0,136

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,23	19,93	20,45
h = 0,60m	20,79	20,51	21,00
h = 1,10m	21,00	20,71	21,17
h = 1,70m	21,20	20,94	21,43
h = 2,20m	21,33	21,17	21,66

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,77	0,68	0,86
h = 0,10-1,70m	0,61	0,51	0,73
h = 0,10-2,20m	0,53	0,43	0,63

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

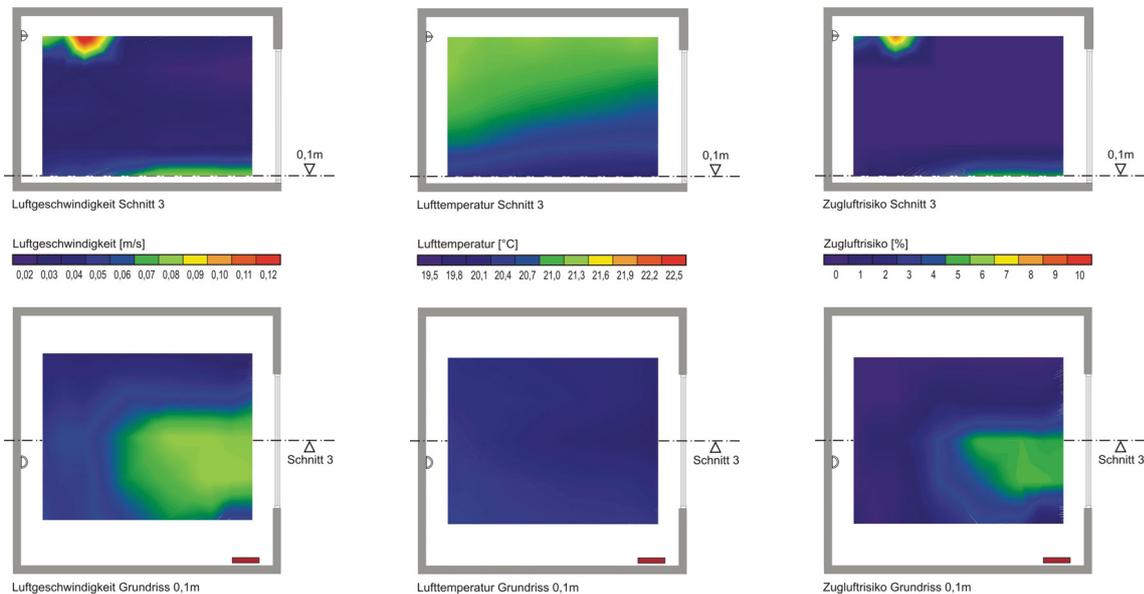
40 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise

Zulufttemperatur:

ca. Raumlufttemperatur



Versuch 89

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,064	0,027	0,108
h = 0,60m	0,030	0,020	0,037
h = 1,10m	0,036	0,025	0,067
h = 1,70m	0,049	0,021	0,111
h = 2,20m	0,090	0,034	0,218

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,25	19,93	20,44
h = 0,60m	20,83	20,67	20,99
h = 1,10m	21,00	20,88	21,14
h = 1,70m	21,14	21,04	21,22
h = 2,20m	21,16	20,93	21,84

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,75	0,55	1,09
h = 0,10-1,70m	0,56	0,45	0,76
h = 0,10-2,20m	0,44	0,26	0,74

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

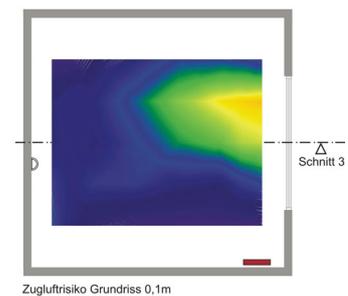
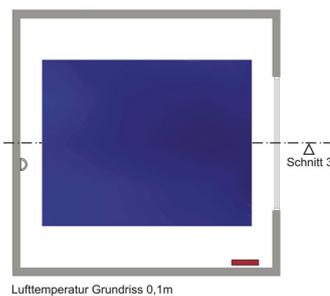
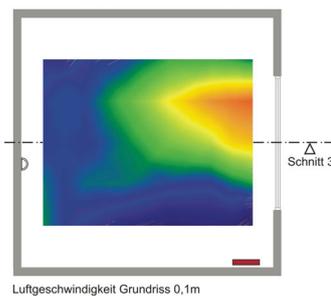
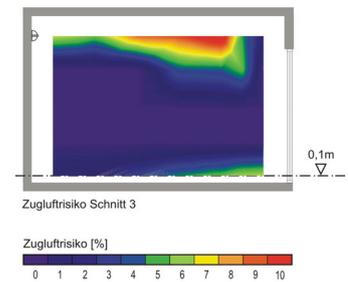
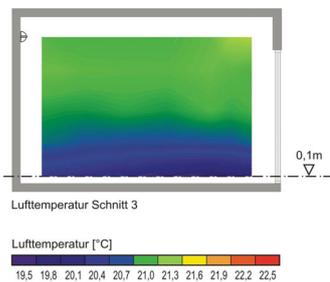
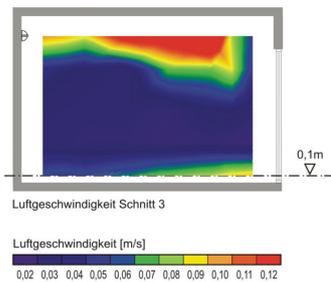
40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur:

ca. Raumlufttemperatur



Versuch 90

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,060	0,038	0,084
h = 0,60m	0,033	0,026	0,037
h = 1,10m	0,040	0,030	0,045
h = 1,70m	0,029	0,018	0,038
h = 2,20m	0,048	0,028	0,092

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,27	20,04	20,42
h = 0,60m	20,84	20,60	21,09
h = 1,10m	21,00	20,73	21,19
h = 1,70m	21,08	20,87	21,19
h = 2,20m	21,26	20,84	21,59

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,73	0,58	0,90
h = 0,10-1,70m	0,51	0,40	0,58
h = 0,10-2,20m	0,47	0,23	0,65

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

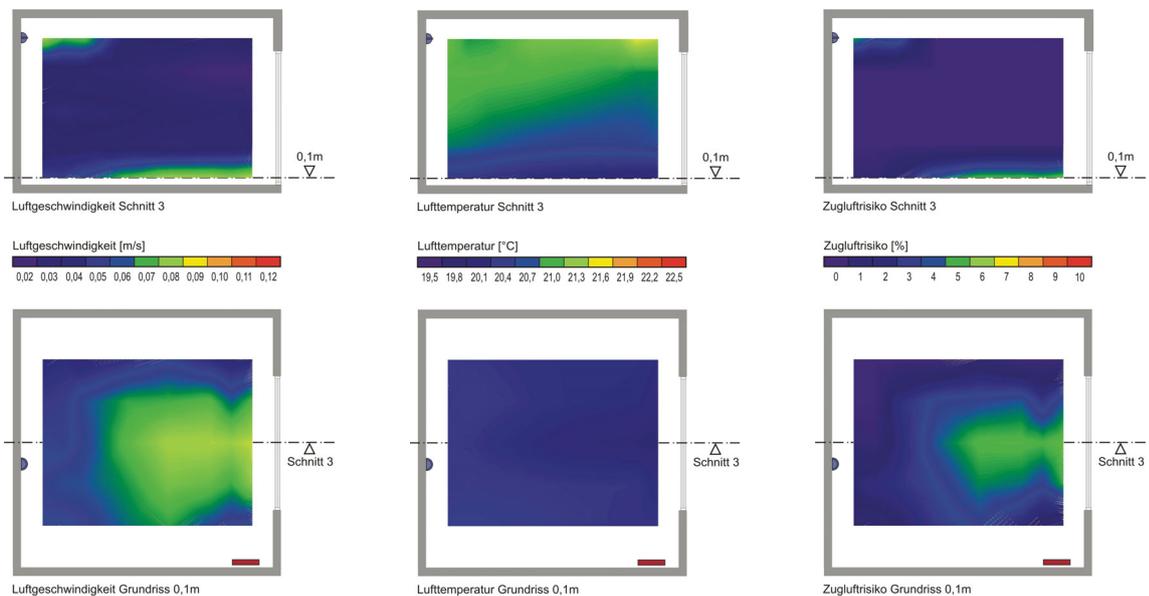
20 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise

Zulufttemperatur:

16°C



Versuch 91

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,058	0,039	0,084
h = 0,60m	0,031	0,021	0,037
h = 1,10m	0,039	0,028	0,055
h = 1,70m	0,031	0,023	0,048
h = 2,20m	0,050	0,029	0,088

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,25	20,04	20,41
h = 0,60m	20,82	20,58	21,07
h = 1,10m	21,00	20,75	21,14
h = 1,70m	21,07	20,84	21,24
h = 2,20m	21,23	20,72	21,53

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,75	0,64	0,87
h = 0,10-1,70m	0,52	0,45	0,59
h = 0,10-2,20m	0,47	0,19	0,61

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

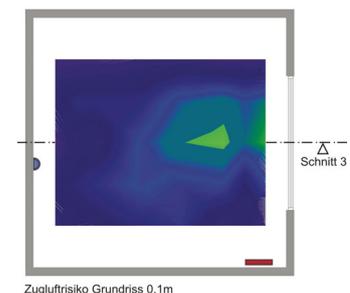
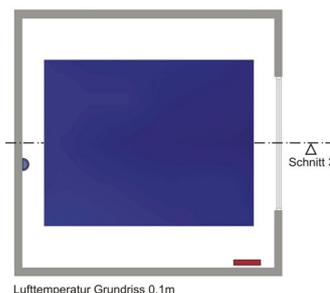
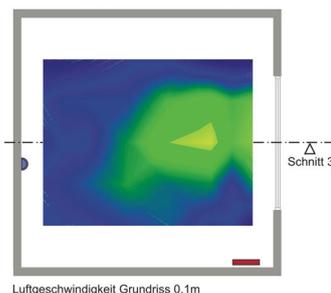
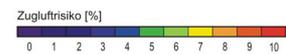
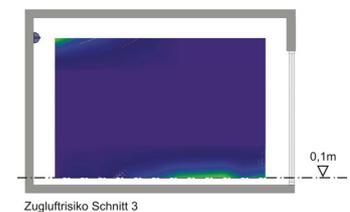
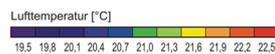
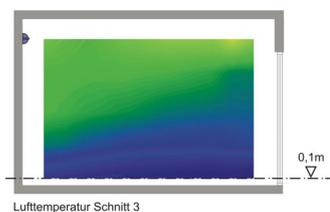
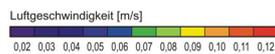
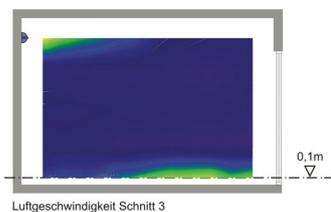
20 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur:

16°C



Versuch 92

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,061	0,042	0,086
h = 0,60m	0,028	0,020	0,036
h = 1,10m	0,038	0,025	0,061
h = 1,70m	0,032	0,017	0,050
h = 2,20m	0,053	0,032	0,105

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,27	20,05	20,48
h = 0,60m	20,83	20,60	21,07
h = 1,10m	21,00	20,78	21,16
h = 1,70m	21,05	20,82	21,21
h = 2,20m	21,25	20,58	21,61

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,73	0,61	0,90
h = 0,10-1,70m	0,49	0,39	0,59
h = 0,10-2,20m	0,46	0,11	0,69

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

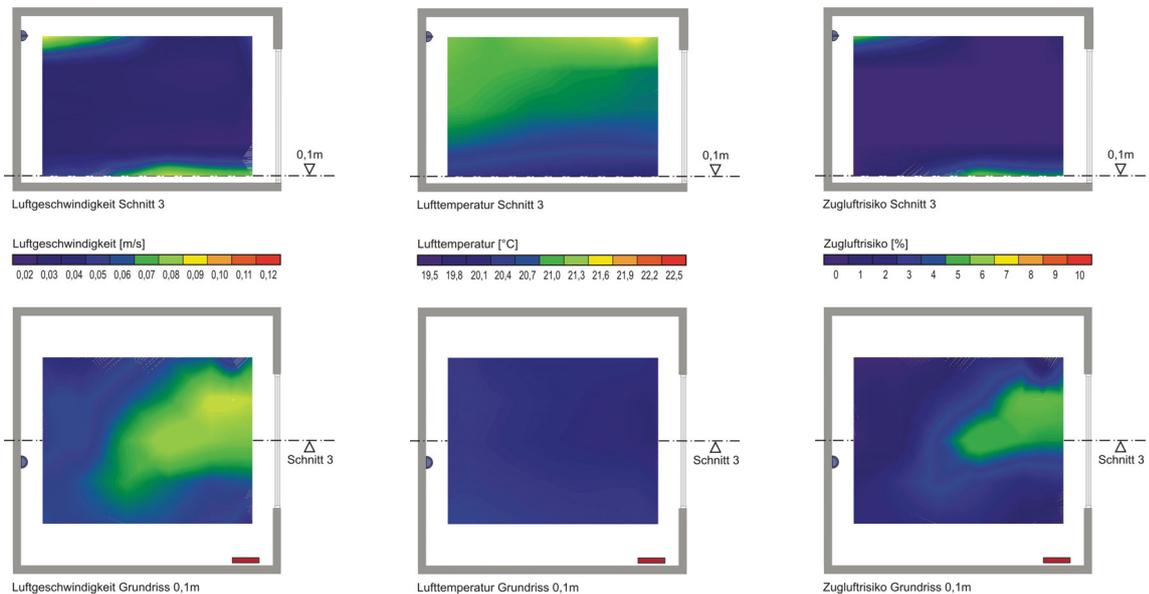
20 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur:

14°C



Versuch 93

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,062	0,046	0,083
h = 0,60m	0,032	0,023	0,039
h = 1,10m	0,039	0,027	0,045
h = 1,70m	0,030	0,018	0,039
h = 2,20m	0,050	0,031	0,113

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,28	19,93	20,46
h = 0,60m	20,87	20,63	21,06
h = 1,10m	21,00	20,73	21,17
h = 1,70m	21,06	20,83	21,16
h = 2,20m	21,28	20,89	21,75

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,72	0,48	0,93
h = 0,10-1,70m	0,49	0,37	0,64
h = 0,10-2,20m	0,48	0,25	0,77

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

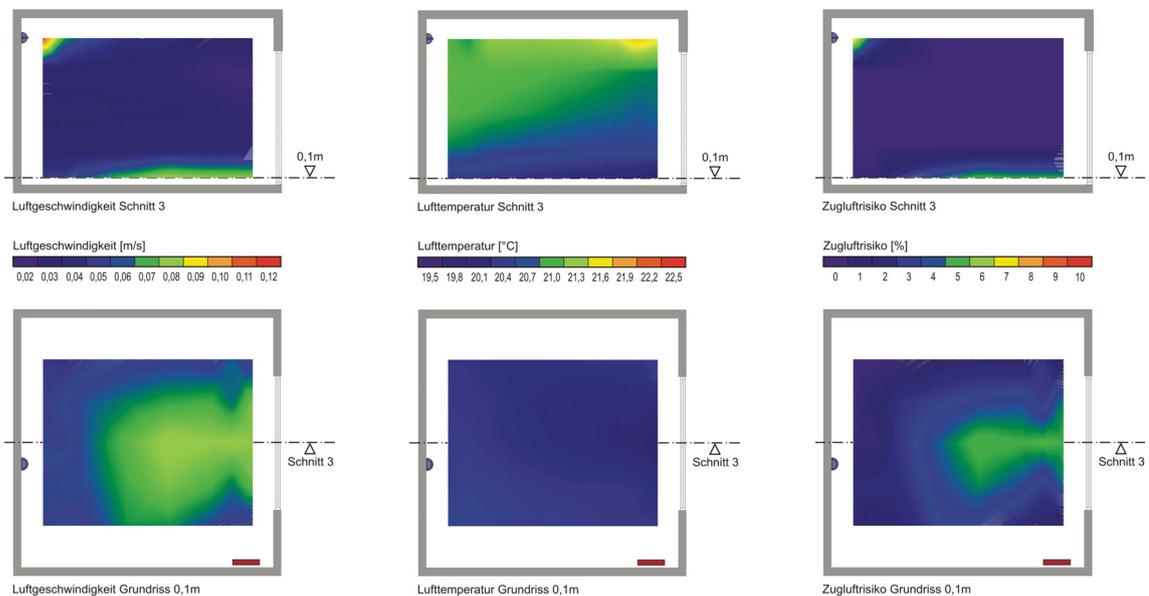
20 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise

Zulufttemperatur:

14°C



Versuch 94

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,064	0,043	0,093
h = 0,60m	0,030	0,020	0,057
h = 1,10m	0,037	0,026	0,054
h = 1,70m	0,035	0,020	0,065
h = 2,20m	0,060	0,032	0,228

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,41	20,05	20,57
h = 0,60m	20,90	20,73	21,10
h = 1,10m	21,00	20,73	21,22
h = 1,70m	21,16	21,01	21,26
h = 2,20m	21,34	20,54	21,95

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,59	0,43	0,77
h = 0,10-1,70m	0,46	0,31	0,61
h = 0,10-2,20m	0,44	0,01	0,77

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

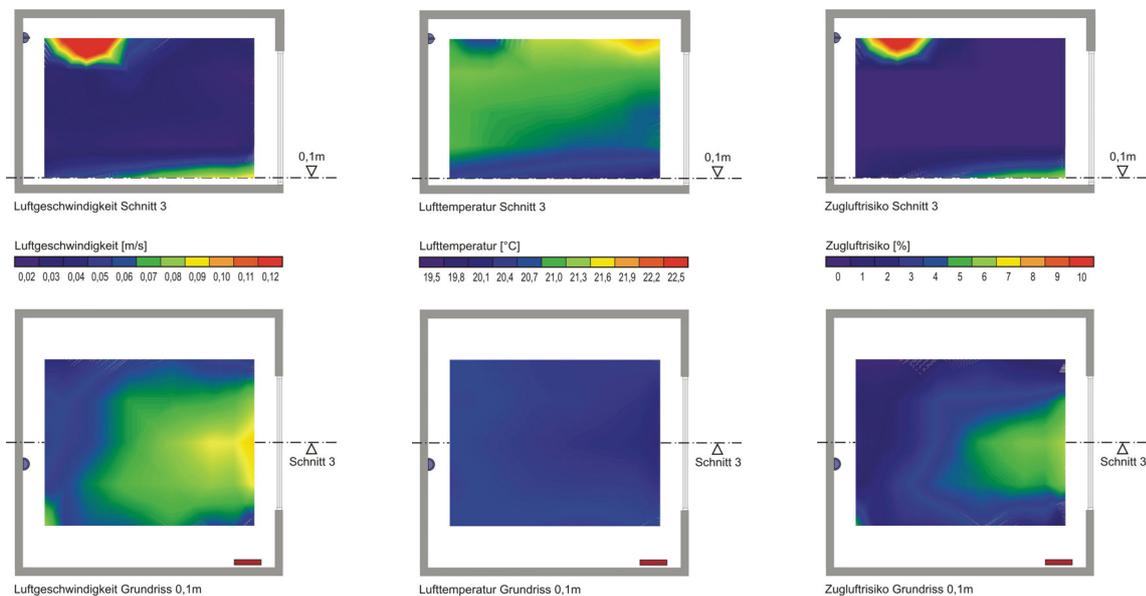
40 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise

Zulufttemperatur:

14°C



Versuch 95

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,065	0,038	0,097
h = 0,60m	0,034	0,019	0,066
h = 1,10m	0,039	0,024	0,060
h = 1,70m	0,039	0,025	0,078
h = 2,20m	0,074	0,035	0,144

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,46	20,24	20,65
h = 0,60m	20,91	20,69	21,14
h = 1,10m	21,00	20,80	21,30
h = 1,70m	21,12	20,86	21,34
h = 2,20m	21,53	20,46	22,17

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,54	0,37	0,66
h = 0,10-1,70m	0,41	0,32	0,50
h = 0,10-2,20m	0,51	-0,07	0,73

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

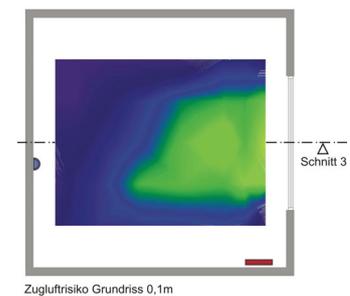
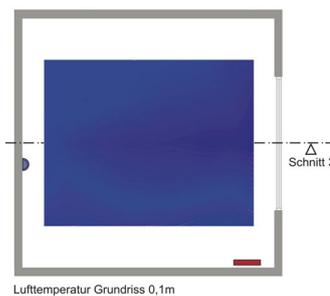
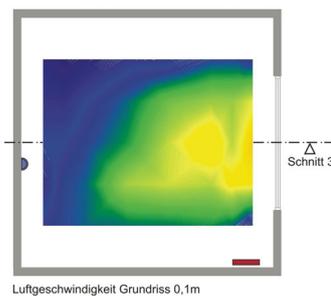
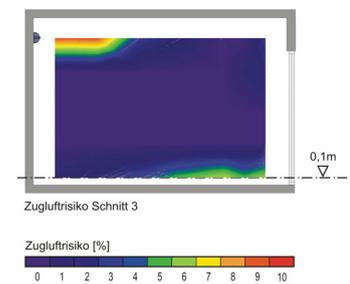
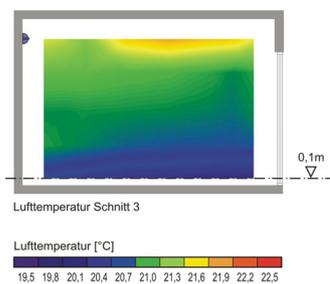
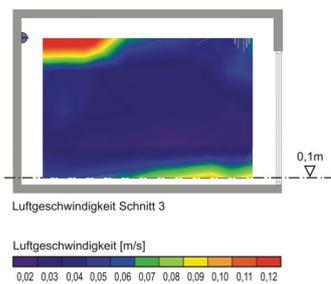
40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur:

14°C



Versuch 96

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,062	0,040	0,092
h = 0,60m	0,031	0,018	0,046
h = 1,10m	0,039	0,026	0,063
h = 1,70m	0,037	0,023	0,068
h = 2,20m	0,073	0,035	0,149

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,39	20,20	20,56
h = 0,60m	20,93	20,68	21,20
h = 1,10m	21,00	20,78	21,32
h = 1,70m	21,13	20,94	21,34
h = 2,20m	21,45	20,69	21,95

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,61	0,47	0,76
h = 0,10-1,70m	0,46	0,37	0,53
h = 0,10-2,20m	0,50	0,10	0,71

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

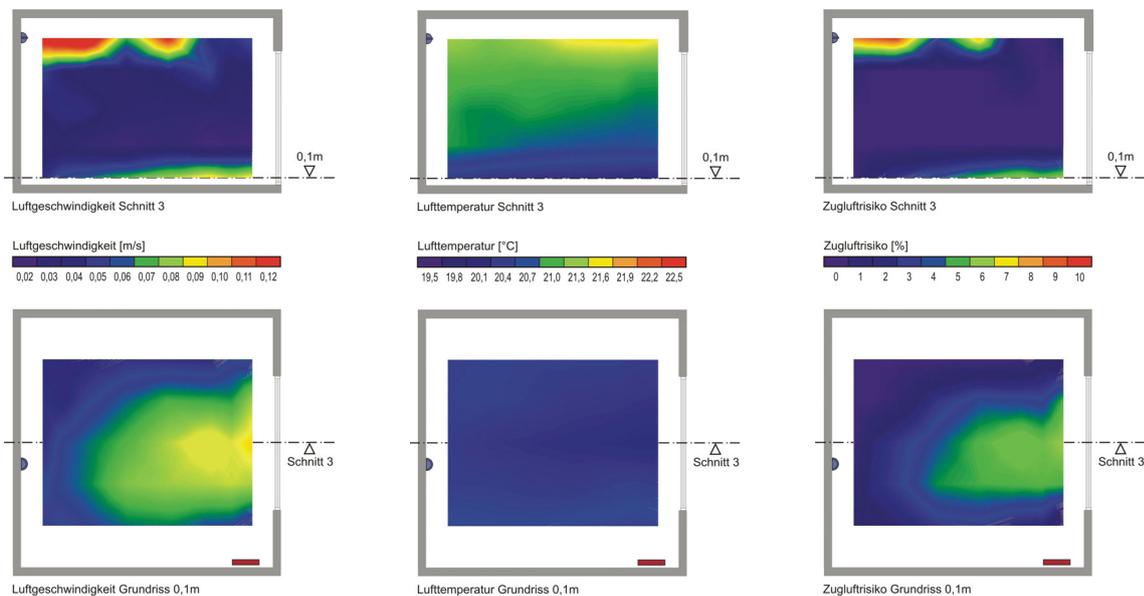
40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur:

16°C



Versuch 97

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,064	0,040	0,099
h = 0,60m	0,032	0,022	0,040
h = 1,10m	0,039	0,019	0,055
h = 1,70m	0,033	0,022	0,057
h = 2,20m	0,067	0,031	0,211

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,34	20,02	20,47
h = 0,60m	20,91	20,76	21,00
h = 1,10m	21,00	20,73	21,23
h = 1,70m	21,16	21,02	21,30
h = 2,20m	21,34	20,78	21,86

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,66	0,50	0,80
h = 0,10-1,70m	0,51	0,44	0,63
h = 0,10-2,20m	0,47	0,19	0,74

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Fassade

Luftmenge:

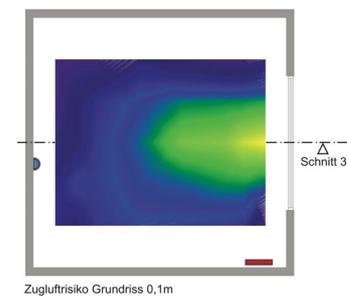
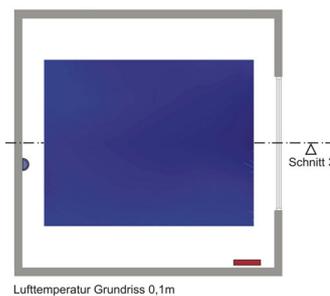
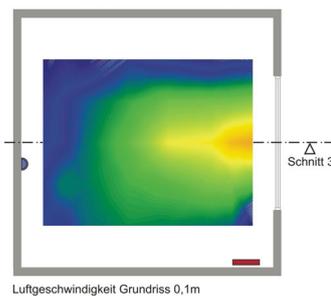
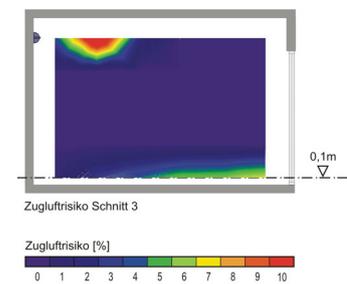
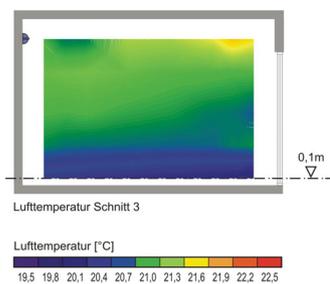
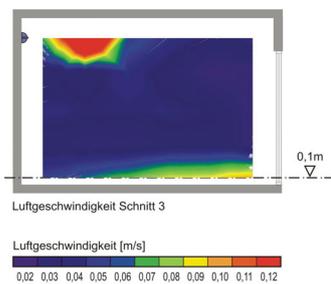
40 m³/h

Zuluftventil:

LowNoise

Zulufttemperatur:

16°C



Versuch 98

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,056	0,026	0,080
h = 0,60m	0,033	0,021	0,041
h = 1,10m	0,039	0,021	0,054
h = 1,70m	0,041	0,022	0,086
h = 2,20m	0,067	0,032	0,108

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,17	19,77	20,69
h = 0,60m	20,83	20,42	21,66
h = 1,10m	21,00	20,67	21,62
h = 1,70m	21,14	20,91	21,37
h = 2,20m	21,20	20,91	21,33

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,83	0,62	1,04
h = 0,10-1,70m	0,60	0,39	0,82
h = 0,10-2,20m	0,49	0,28	0,64

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

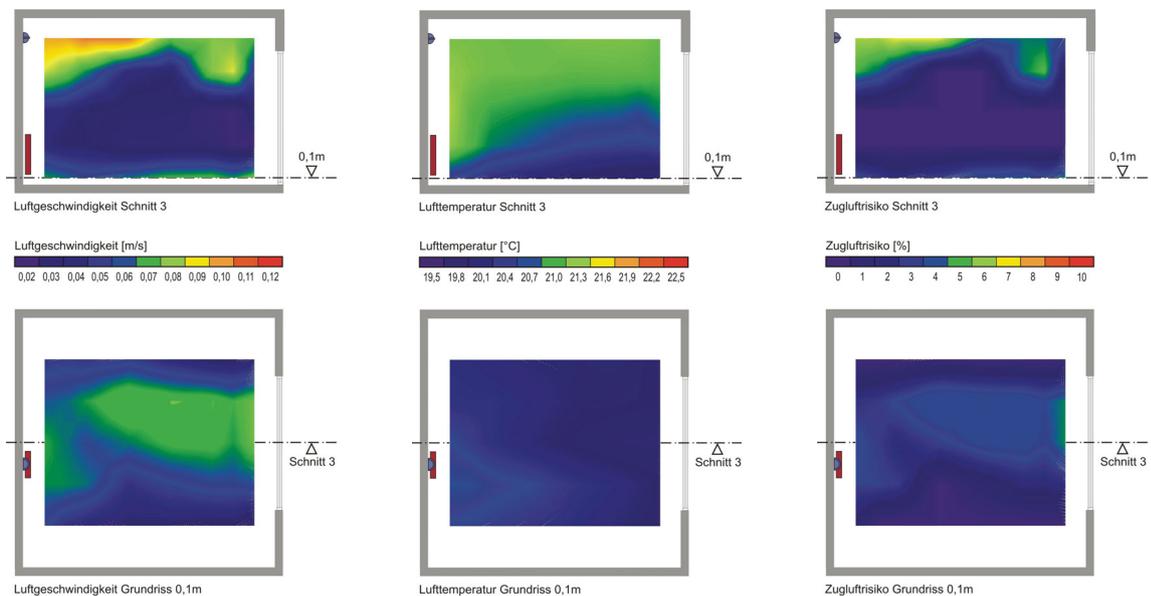
40 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur:

16°C



Versuch 99

Luftgeschwindigkeiten

[m/s]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,060	0,023	0,085
h = 0,60m	0,032	0,022	0,040
h = 1,10m	0,038	0,021	0,050
h = 1,70m	0,033	0,016	0,060
h = 2,20m	0,053	0,030	0,092

Lufttemperaturen

[°C]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,22	19,90	20,55
h = 0,60m	20,82	20,48	21,42
h = 1,10m	21,00	20,67	21,55
h = 1,70m	21,15	20,96	21,46
h = 2,20m	21,25	20,98	21,39

Lufttemperaturgradienten

[K/m]	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,78	0,58	0,99
h = 0,10-1,70m	0,58	0,38	0,71
h = 0,10-2,20m	0,49	0,37	0,58

Außentemperatur:

-16°C

Beheizung:

Heizkörper Türe

Luftmenge:

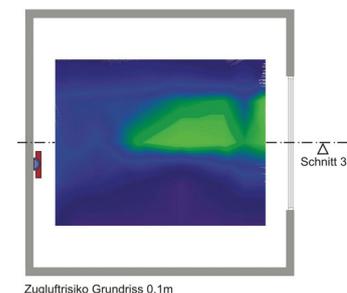
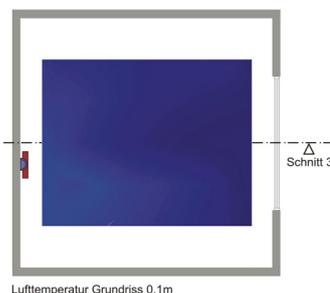
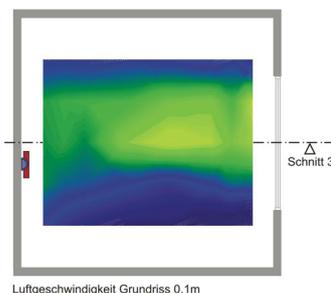
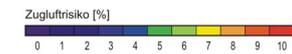
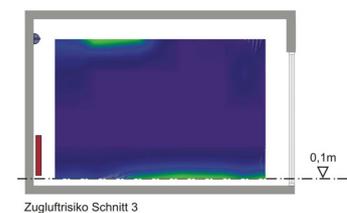
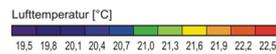
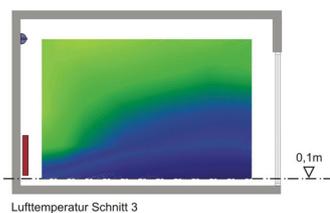
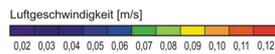
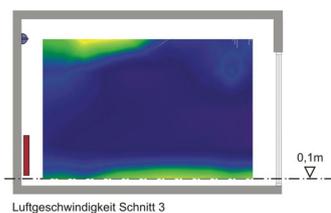
20 m³/h

Zuluftventil:

Weitwurf

Zulufttemperatur:

16°C



Versuch 100

Luftgeschwindigkeiten

	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,047	0,027	0,064
h = 0,60m	0,033	0,022	0,037
h = 1,10m	0,040	0,031	0,045
h = 1,70m	0,032	0,014	0,073
h = 2,20m	0,074	0,036	0,113

Lufttemperaturen

	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,23	19,94	20,48
h = 0,60m	20,76	20,50	20,99
h = 1,10m	21,00	20,78	21,16
h = 1,70m	21,43	21,22	21,85
h = 2,20m	22,02	21,54	22,40

Lufttemperaturgradienten

	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,77	0,64	0,88
h = 0,10-1,70m	0,75	0,61	1,12
h = 0,10-2,20m	0,85	0,56	1,06

Außentemperatur:

-11°C

Beheizung:

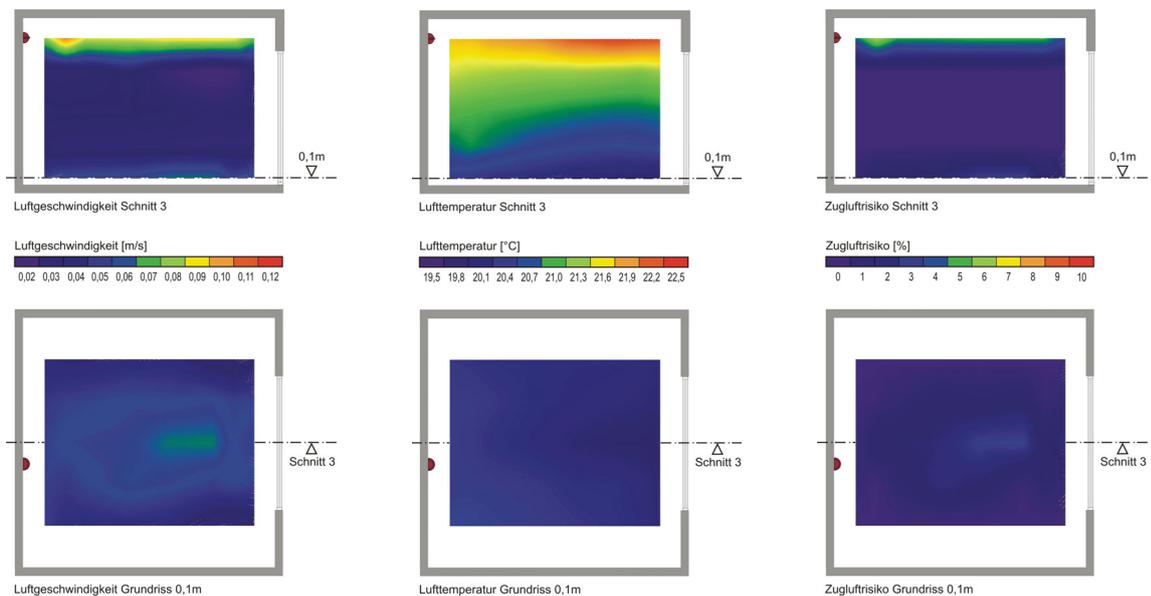
Zuluft

Luftmenge:

40 m³/h

Zuluftventil:

Lochblechventil



Versuch 101

Luftgeschwindigkeiten

	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	0,052	0,031	0,076
h = 0,60m	0,032	0,022	0,039
h = 1,10m	0,041	0,032	0,047
h = 1,70m	0,032	0,028	0,036
h = 2,20m	0,043	0,023	0,064

Lufttemperaturen

	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10m	20,37	20,10	20,55
h = 0,60m	20,82	20,56	21,00
h = 1,10m	21,00	20,76	21,18
h = 1,70m	21,28	21,08	21,42
h = 2,20m	21,85	21,53	22,35

Lufttemperaturgradienten

	Mittelwert	Minimum	Maximum
h = 0,10-1,10m	0,63	0,52	0,75
h = 0,10-1,70m	0,57	0,51	0,65
h = 0,10-2,20m	0,71	0,51	0,94

Außentemperatur:

-6°C

Beheizung:

Zuluft

Luftmenge:

20 m³/h

Zuluftventil:

Lochblechventil

