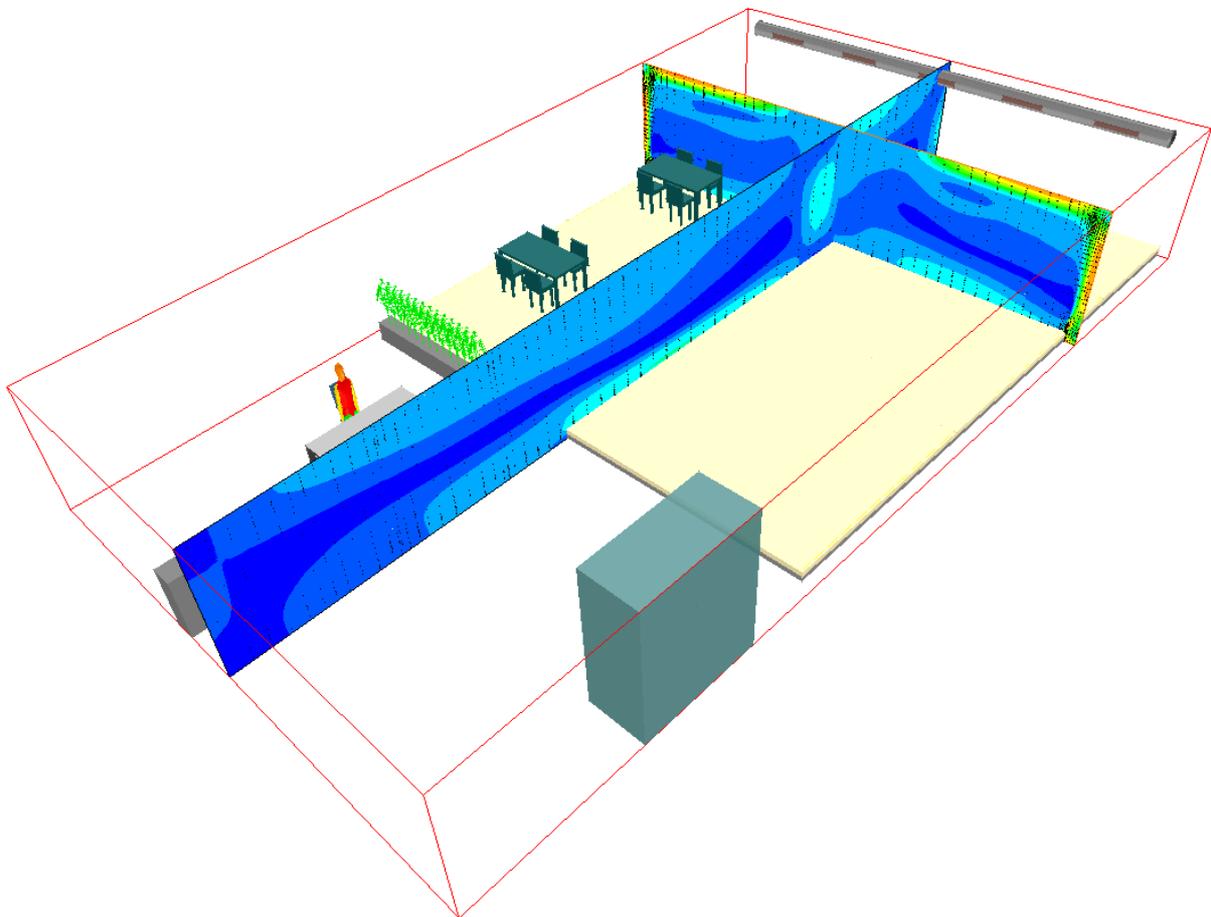


Funktionsnachweis durch
Simulationsberechnungen für das System
ClimaLevel



Köln, 15.05.2009

Inhalt

1	Aufgabenstellung	3
2	Grundlagen	4
2.1	Prinzip ClimateLevel.....	4
2.2	Eingabedaten	5
2.3	Behaglichkeit	6
3	Simulationswerkzeuge	8
3.1	Thermische Simulationen	8
3.2	Aerophysikalische Simulation	8
3.3	Aufbau des Modells	9
3.4	Randbedingungen	10
3.5	Variantenübersicht.....	10
4	Ergebnisse	11
4.1	Heizfall	11
4.2	Kühlfall	13
4.2.1	Zuluftvolumenstrom 900 m ³ /h.....	13
4.2.2	Zuluftvolumenstrom 1600 m ³ /h.....	15
4.2.3	natürliche Lüftung	17
4.3	Wärmeübertragungskoeffizient.....	19
5	Zusammenfassung und Empfehlung	22

1 Aufgabenstellung

Für das Hohlbodensystem ClimaLevel sollen thermische und aerophysikalische Simulationen durchgeführt werden.

Das System ClimaLevel wird bereits in der Praxis vorzugsweise im Bereich hochwertiger Wohngebäude eingesetzt und hat sich im Alltag bewährt. Diese Vorlage soll die Arbeitsweise und Funktionalität des Hohlbodensystems mit Hilfe von validierten Strömungssimulationen belegen und belastbare Aussagen hinsichtlich des aerophysikalischen Verhaltens erlauben. Ziel ist es, die Möglichkeiten für das System ClimaLevel im Bereich von Nichtwohngebäuden, im Hinblick auf Behaglichkeit und Komfort, zu untersuchen und darzustellen.

Die Firma Kemmer GmbH hat in ihrer Geschäftsstelle in Köln Lövenich einen Ausstellungsraum in dem das System installiert und betrieben wird. Anhand dieser Anlage werden die Simulationen durchgeführt und Ergebnisse gezeigt.

Die Untersuchungen wurden für den Heiz- und Kühlfall durchgeführt.

2 Grundlagen

2.1 Prinzip KlimaLevel

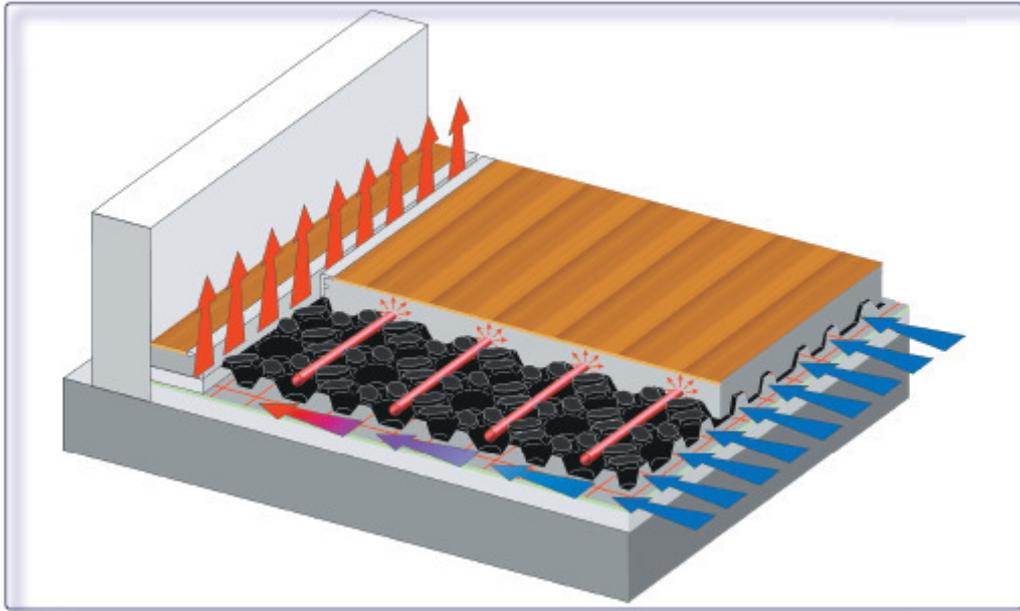


Bild 2-1 Aufbau und Luftführung, Quelle: www.climalevel.de

Das System KlimaLevel zeichnet sich dadurch aus, dass die Wärme nicht nur nach oben wie bei einer normalen Fußbodenheizung abgegeben wird, sondern auch nach unten in einen Hohlboden. Unterhalb der Systemplatte, auf der die Fußbodenheizungsrohre befestigt sind, befindet sich ein Hohlraum, durch den Luft geführt wird. Die vorkonditionierte Luft wird erhitzt und im Hohlboden bis vor die Fassade geführt und mittels Schlitzauslässen vor der Fassade in den Raum gebracht. Dies hat den Vorteil, dass zu dem trägen Heizungssystem der Fußbodenheizung ein schnell reagierendes System der Lüftung hinzugefügt wird. Außerdem kann durch die Frischluftzufuhr der Mindestaußenluftwechsel abgedeckt werden. Somit wird die Leistung der Fußbodenheizung zusätzlich genutzt und die herkömmliche Leitungsführung von Lüftungskanälen unter der Decke entfällt.

Außerdem ist es möglich das System im Kühlfall zu nutzen.

Im Winter wird die kalte Außenluft mittels Wärmerückgewinnung aus der Abluft vom Raum vorkonditioniert und in den Hohlboden eingeleitet. Im Hohlboden wird die Luft hauptsächlich durch Konvektion an der Unterseite der Systemplatte erwärmt und durch Schlitzauslässe vor der Fassade in den Raum geführt. Gleichzeitig wird an der Oberfläche der Fußbodenheizung die Wärme mittels Strahlung und Konvektion abgegeben. Vor allem an Glasfassaden kommt es durch kalte Oberflächen zu Kaltluftabfall. Wenn kühlere Raumluft auf der Innenseite des Fensters mit größerer Dichte nach unten strömt und sich am Boden ausbreitet, kann dies zu Unbehagen im Raum führen. Dies wird durch die Luft, die direkt vor der Fassade ausgeblasen wird, verhindert.

Im Sommer wird die warme Außenluft durch eine Kältemaschine abgekühlt und mit ca. 20 grädiger Luft in den Hohlboden geführt. Im Hohlboden wird die Luft weiter heruntergekühlt und durch Schlitzauslässe vor der Fassade in den Raum geführt. Bei herkömmlichen Fußbodenkühlungen wird die Kälte hauptsächlich durch Strahlung abgegeben. Beim System KlimaLevel kommt ein konvektiver Anteil hinzu. Durch die Eindringung der Luft unmittelbar über dem Boden wird die Luft zusätzlich verwirbelt und durch die bessere Durchmischung wird der Wärmeübergang erhöht.

2.2 Eingabedaten

Für die durchgeführten Untersuchungen wurden die in Tabelle 2-1 aufgelisteten Unterlagen verwendet.

Tabelle 2-1: Quellenverzeichnis

Verfasser	Art	Bezeichnung	Datum
	Ortstermin	Besprechung, Hr. Masuch, Hr. Lyding, Hr. Kögler	13.11.08
Kemmer GmbH	CD-ROM	Messwerte	26.11.08
Kemmer GmbH	E-Mail	Messwerte	21.01.09
	Ortstermin	Besprechung, Hr. Kemmer, Hr. Masuch, Hr. Lyding, Hr. Kögler	04.03.09

2.3 Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Die wichtigsten Einflussgrößen sind:

- **Luftqualität**
- **Bekleidung**
- **Aktivitätsgrad**
- **Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen**
- **Lufttemperatur**
- **Luftgeschwindigkeit**

Die DIN EN ISO 7730 dient als Grundlage für diese und weitere Behaglichkeitskriterien.

Die bei den thermischen Simulationen ermittelten Temperaturen im Raum sind operative Temperaturen. Die operative Raumtemperatur, auch empfundene Raumtemperatur genannt, ist ein Maß für die Behaglichkeit und ist abhängig von der Lufttemperatur und der Strahlungstemperaturen der Umgebungsflächen. Damit wird der Strahlungsaustausch zwischen Hautoberfläche und raumumschließenden Flächen berücksichtigt. Somit kann die subjektiv empfundene Temperatur von den Werten aus der Norm abweichen und trotzdem ein behagliches Klima herrschen. Weiter ist die operative Temperatur abhängig von der Außenlufttemperatur und richtet sich nach den Vorgaben der DIN EN ISO 7730.

Die DIN EN 13779 legt als Ersatz für DIN 1946, T2 allgemeine Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage in Nichtwohngebäuden, wie zum Beispiel den Mindestaußenluftwechsel, fest.

Folgende Diagramme sind aus der DIN EN ISO 7730 hergeleitet und dienen der Darstellung der operativen Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur bzw. maximalen Luftgeschwindigkeit. Diese Diagramme beziehen sich auf einen Standardbüroraum, mit der üblichen Bekleidung und den entsprechenden Tätigkeitsgraden.

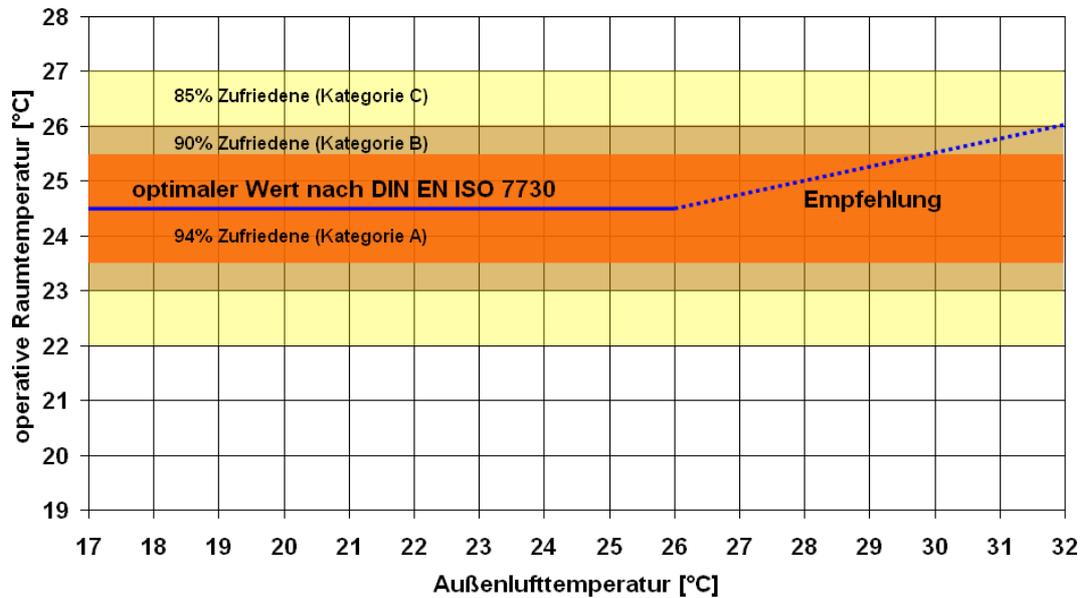


Bild 2-2: operative Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur

Die maximal zulässigen Luftgeschwindigkeiten, die nicht als unangenehme Zugscheinungen empfunden werden, sind im Wesentlichen bedingt durch den unterschiedlichen Aktivitätsgrad der sich in diesen Bereichen aufhaltenden Personen, abhängig von dem jeweiligen Nutzungsbereich.

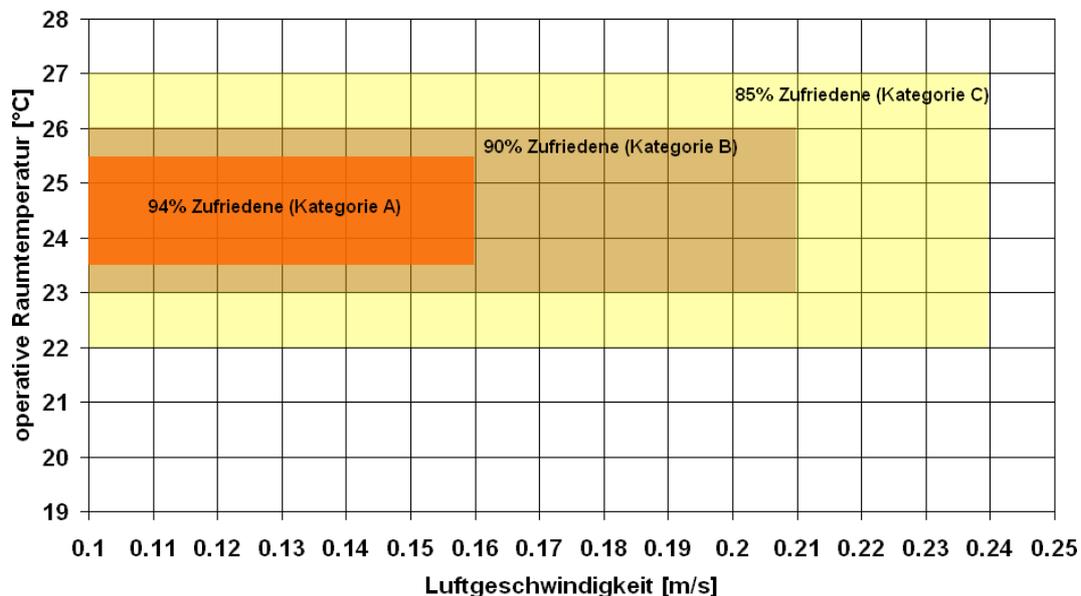


Bild 2-3: Beurteilungsgrundlage maximal zulässiger Luftgeschwindigkeiten

3 Simulationswerkzeuge

3.1 Thermische Simulationen

Die thermischen Simulationen werden mit dem Simulationsprogramm TRNSYS 16 durchgeführt. Das International anerkannte Programm wurde an der University of Wisconsin (USA) entwickelt. Mit dem Simulationsprogramm kann das instationäre thermische Verhalten einzelner oder mehrerer gekoppelter Zonen abgebildet werden. Das Simulationsprogramm erlaubt die Eingabe der exakten bauphysikalischen Randbedingungen, der Benutzerstruktur sowie der Eingaben für die thermische Belastung durch solare Einstrahlung und Personen und stündlicher Wetterdaten. Die Rechengenauigkeit des Programms konnte durch Messungen an ausgeführten Objekten nachgewiesen werden. Sie bewegt sich in einer Größenordnung von +/- 0,5K.

3.2 Aerophysikalische Simulation

Die aerophysikalischen Simulationsberechnungen werden mit dem CFD-Programm PHOENICS (Version 3.6.1) durchgeführt. PHOENICS wurde von der englischen Firma CHAM entwickelt. Der Untersuchungsraum wird bei der Strömungsmodellierung in zahlreiche kleine Volumenelemente unterteilt, durch die eine realitätsnahe Abbildung der Geometrien ermöglicht wird. Auf der Basis von numerischen Strömungssimulationen können belastbare Aussagen zu den sich einstellenden lokalen Temperatur- und Luftströmungsprofilen in den Räumen getroffen werden. Das Simulationsprogramm erlaubt die Eingabe der exakten bauphysikalischen Randbedingungen, der Benutzerstruktur sowie Eingaben für die thermische Belastung durch Maschinen, Personen und Wetterdaten. Die Rechengenauigkeit des Programms konnte durch Messungen an ausgeführten Objekten nachgewiesen werden. Sie bewegt sich in einer Größenordnung von +/- 1 K.

3.3 Aufbau des Modells

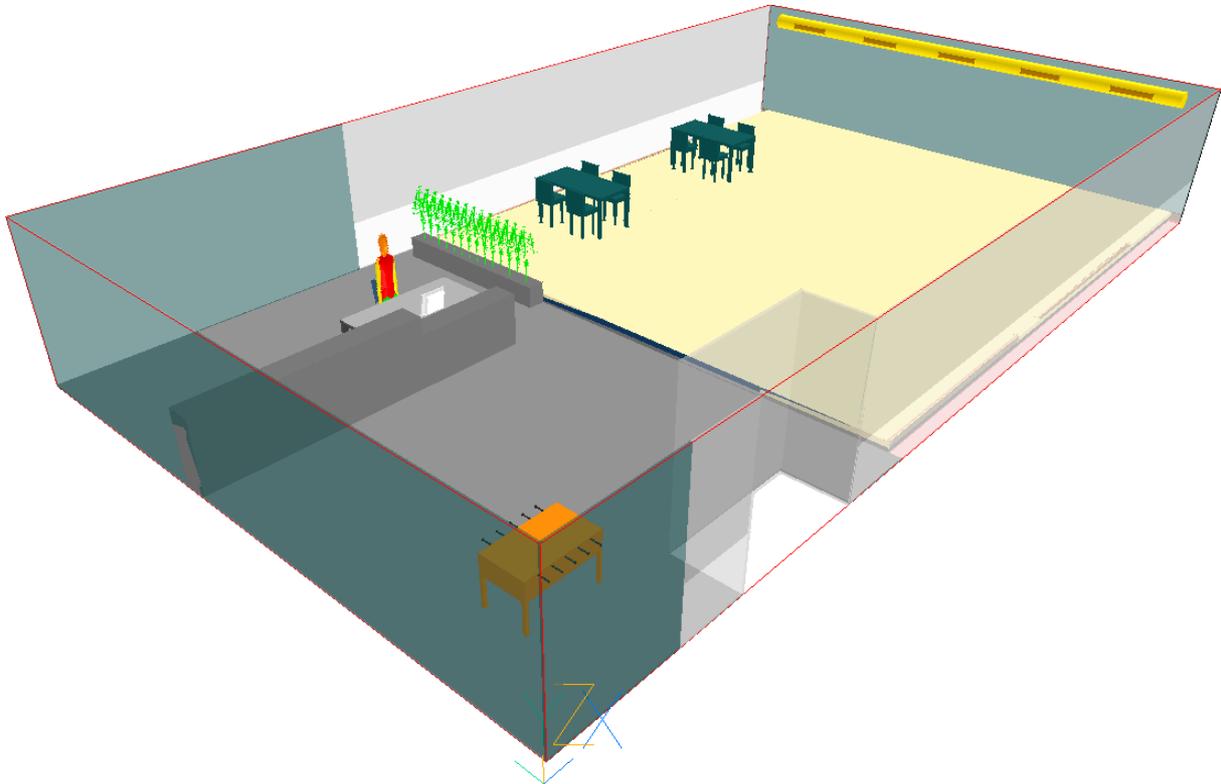


Bild 3-1: Isometrische Darstellung

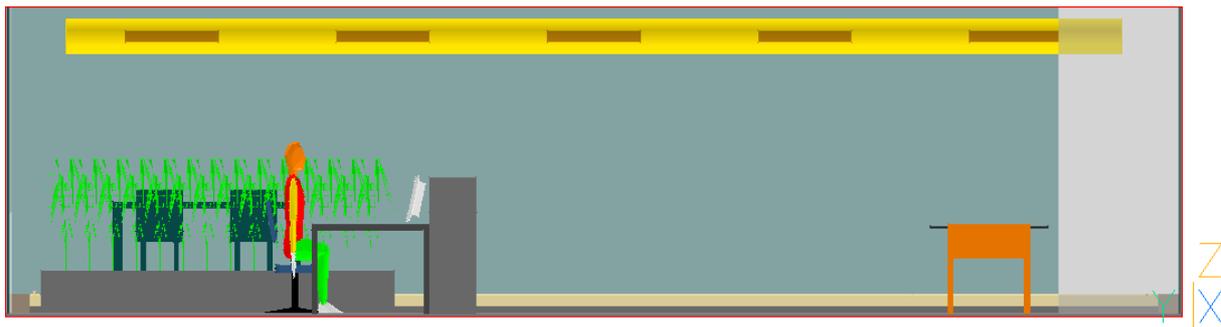


Bild 3-2: Schnitt des Raumes

3.4 Randbedingungen

Die folgenden Tabellen stellen die Randbedingungen für die thermischen Simulationen dar. Dazu gehören die bauphysikalischen Randbedingungen, Grundlagen der Fußbodenheizung sowie die angesetzten inneren Lasten durch Personen und Beleuchtung.

Tabelle 3-1: Bauphysikalische Randbedingungen

Bauphysik	Bauteil	U-Wert [W/(m ² K)]
	Decke	0,6
	Boden	3,5
	Boden (ClimaLevel und FBH)	1,7
	Außenwand	0,5
	Innenwand	2,5
	Außenfenster	5,0
Innere Lasten	1 PC mit 150 W Beleuchtung mit 12W/m ²	
Personenbelegung	1 Personen mit 75 W (sensible Wärmeabgabe)	
Betriebszeit	8.00 bis 18.00 Uhr	

3.5 Variantenübersicht

Tabelle 3-2: Variantenübersicht

	Simulation	Außen- temperatur [°C]	Zuluft- temperatur [°C]	Volumen- strom [m ³ /h]	Luft- wechsel [1/h]
Heizfall	1	-10	33	900	2
Kühlfall	2	32	20	900	2
	3	32	20	1600	3,5
	4	32	natürliche Lüftung		

Die Auswahl der Volumenströme erfolgt unter der Annahme:

- 900 m³/h, normaler Betrieb
- 1600 m³/h, Volllast (z. B: schnelles Herunterkühlen des Raumes)
- natürliche Lüftung, reine Fußbodenkühlung mit Fensterlüftung

4 Ergebnisse

Zur Ergebnisdarstellung wurden folgende Konturen gewählt:

- Lufttemperatur
- Strahlungstemperatur
- Luftgeschwindigkeit.

Die Bilder zeigen die Verteilung der jeweiligen Parameter quer durch den Raum auf Höhe der Luftauslässe.

4.1 Heizfall

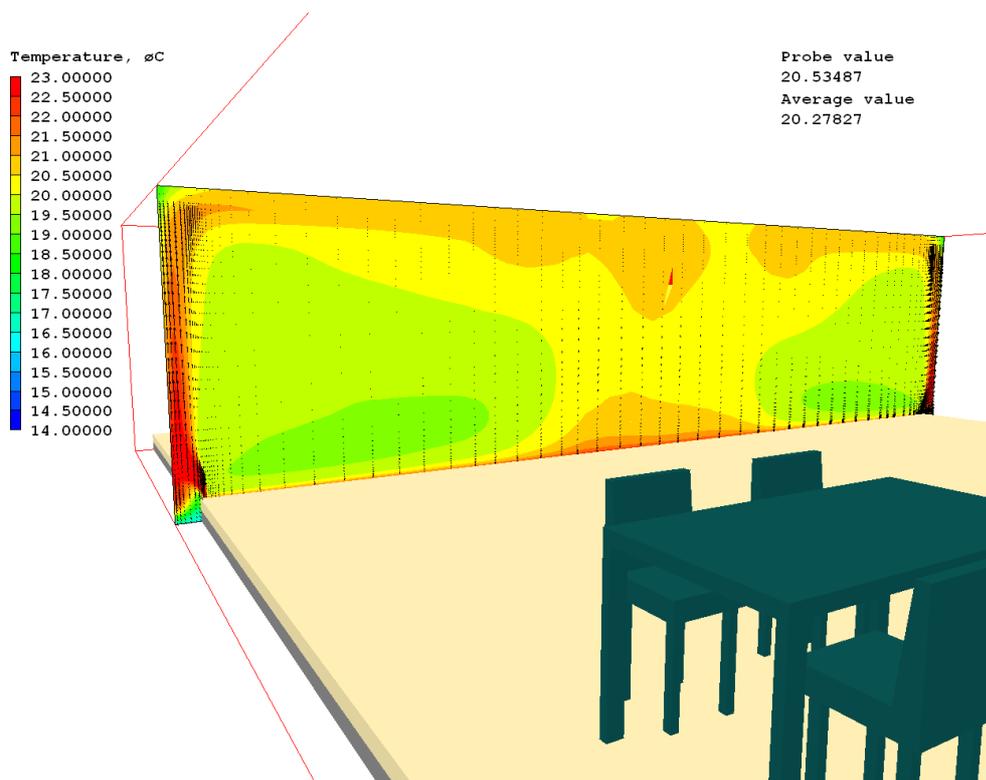


Bild 4-1: Temperaturverteilung, für den Heizfall

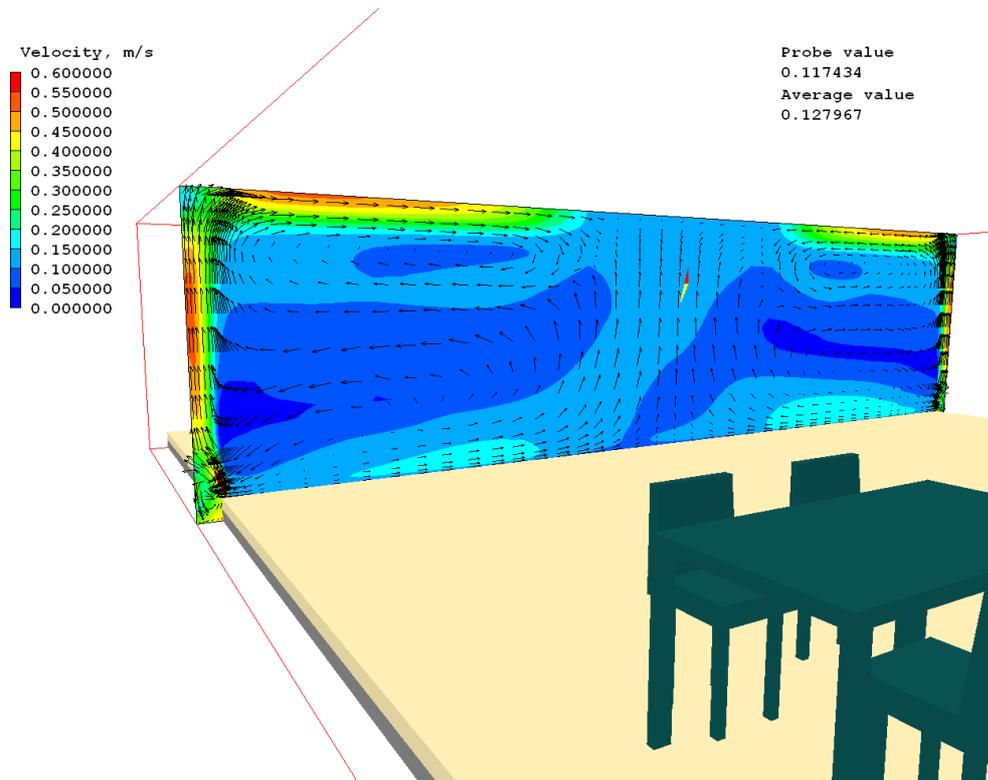


Bild 4-2: Geschwindigkeitsverteilung, für den Heizfall

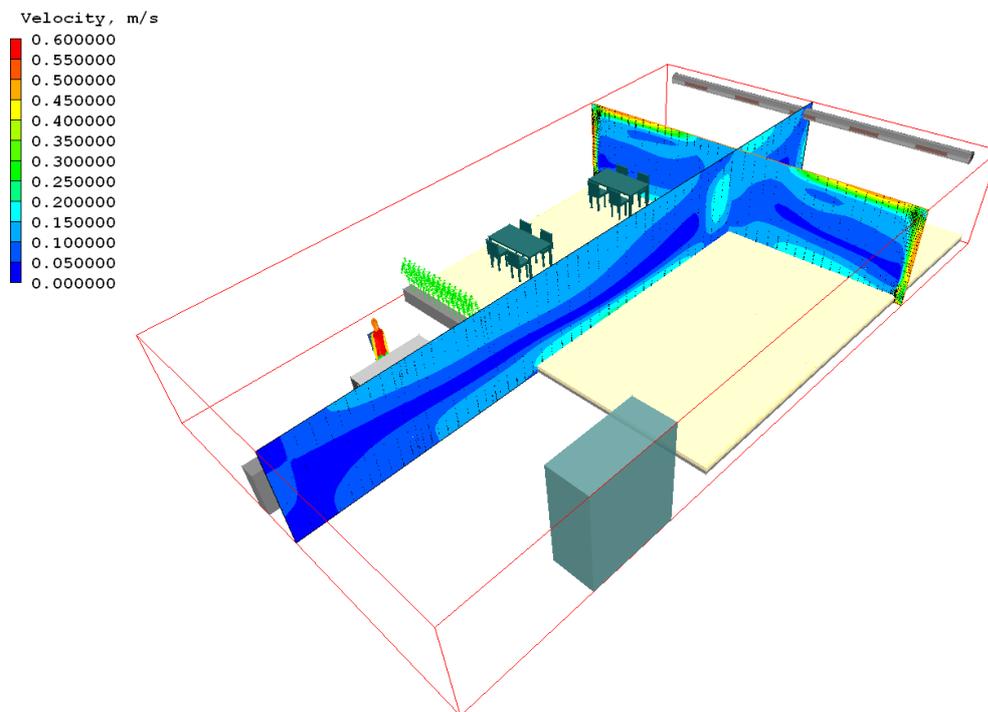


Bild 4-3: Geschwindigkeitsverteilung, für den Heizfall

4.2 Kühlfall

4.2.1 Zuluftvolumenstrom 900 m³/h

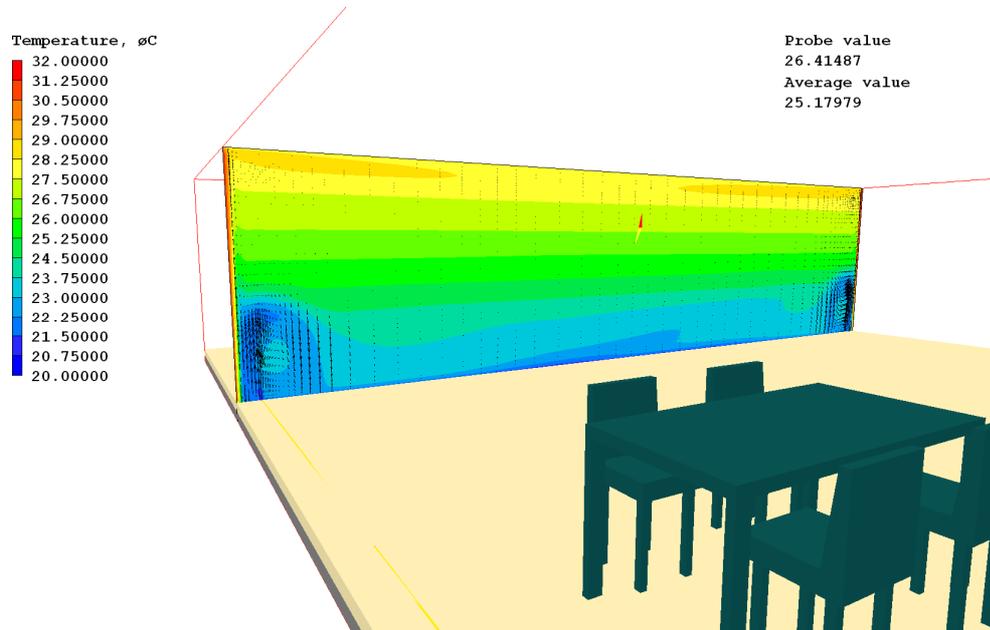


Bild 4-4: Temperaturverteilung, Kühlfall - 900 m³/h

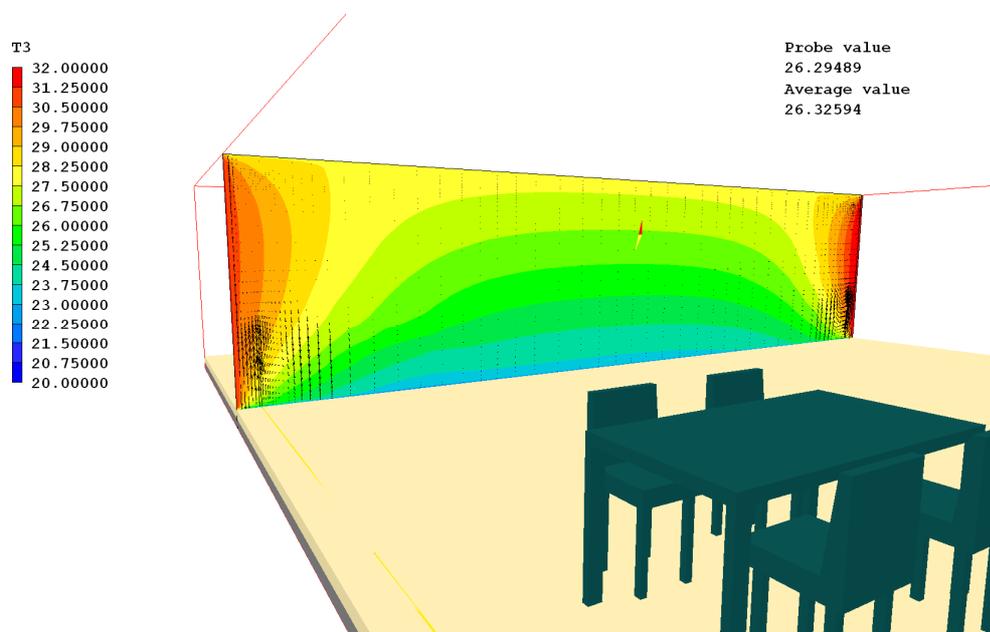


Bild 4-5: Strahlungstemperatur, Kühlfall - 900 m³/h

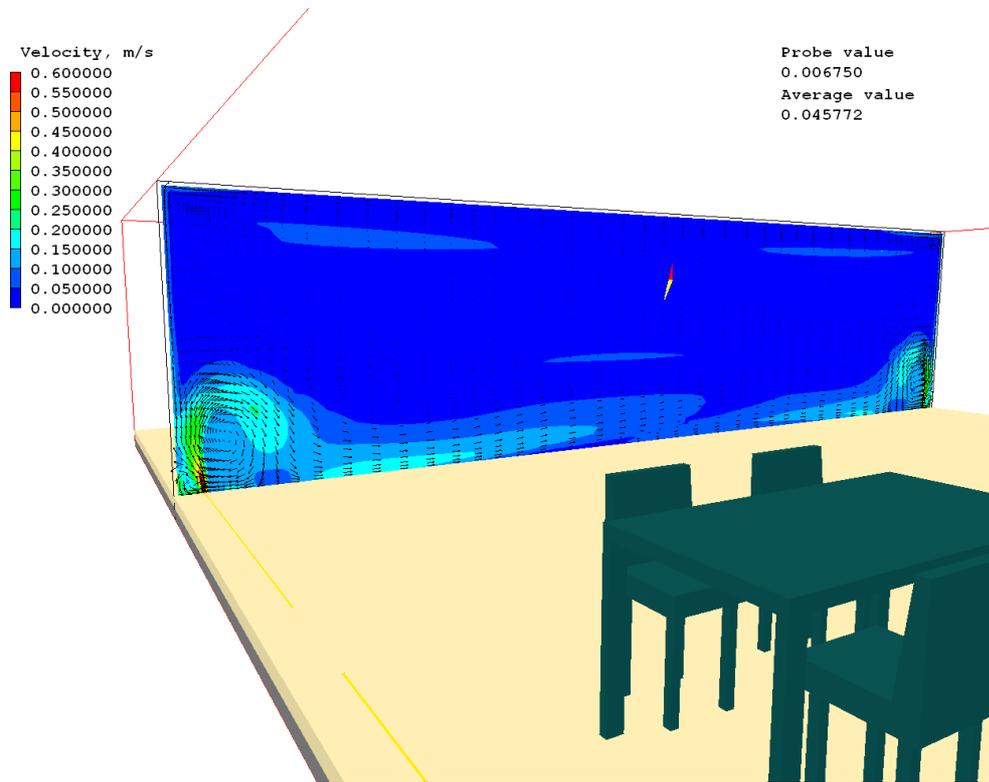


Bild 4-6: Geschwindigkeitsverteilung, Kühlfall - 900 m³/h

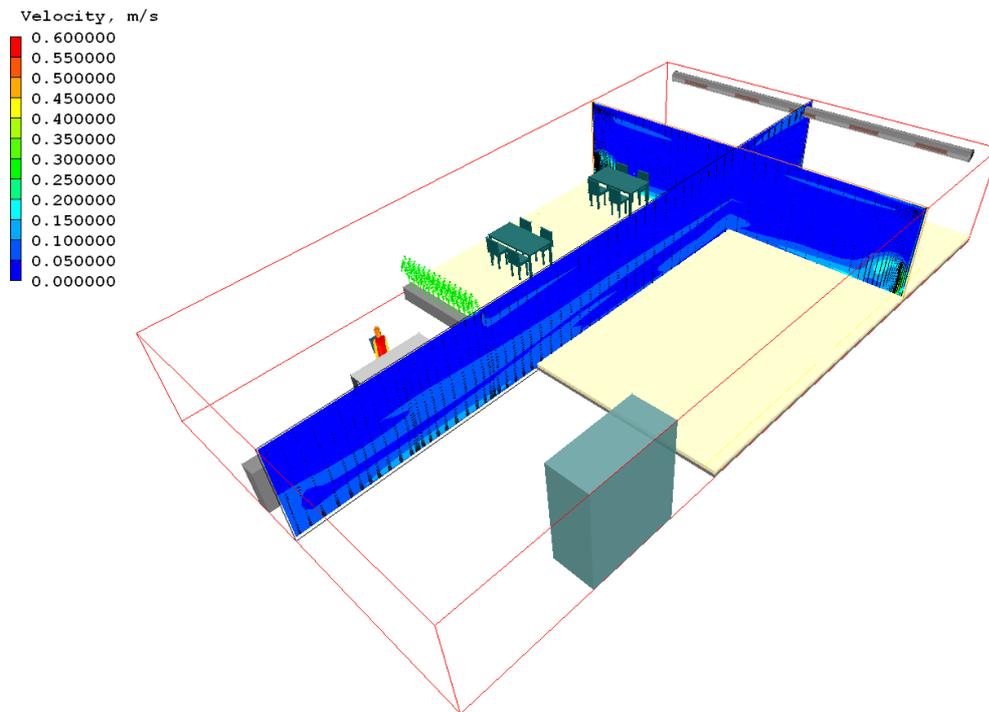


Bild 4-7: Geschwindigkeitsverteilung, Kühlfall - 900 m³/h

4.2.2 Zuluftvolumenstrom 1600 m³/h

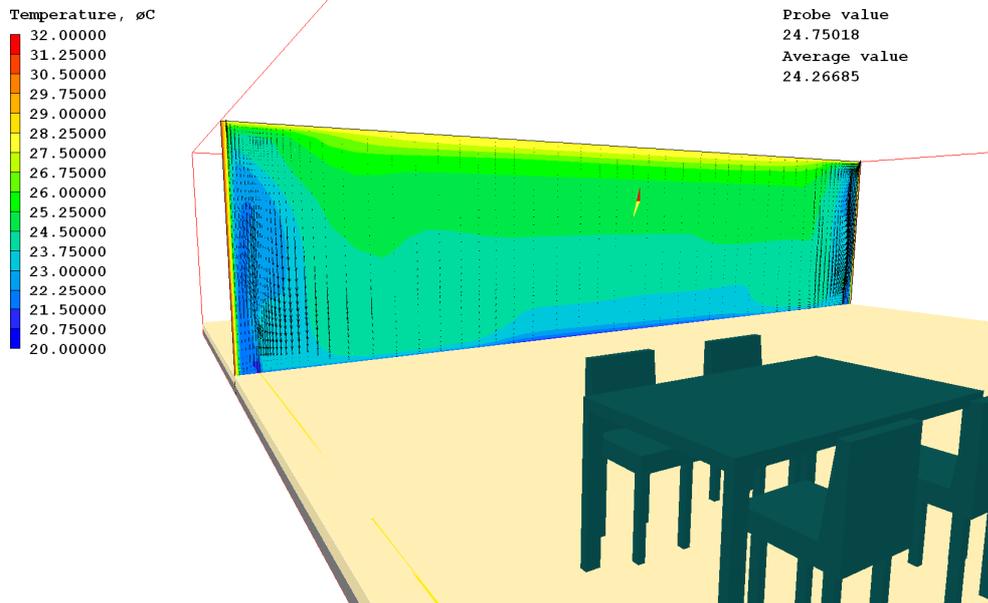


Bild 4-8: Temperaturverteilung, Kühlfall - 1600 m³/h

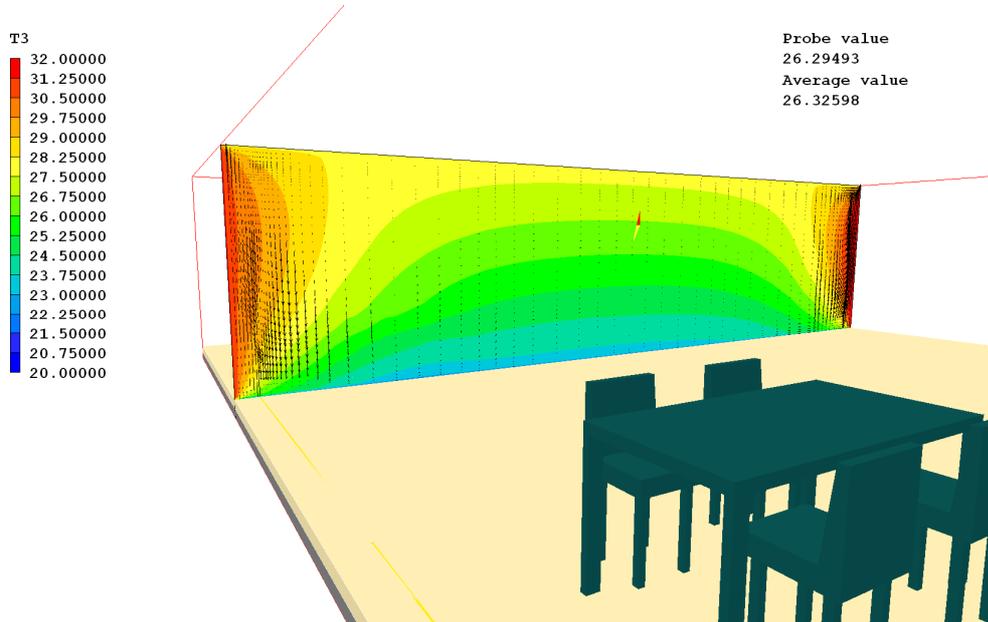
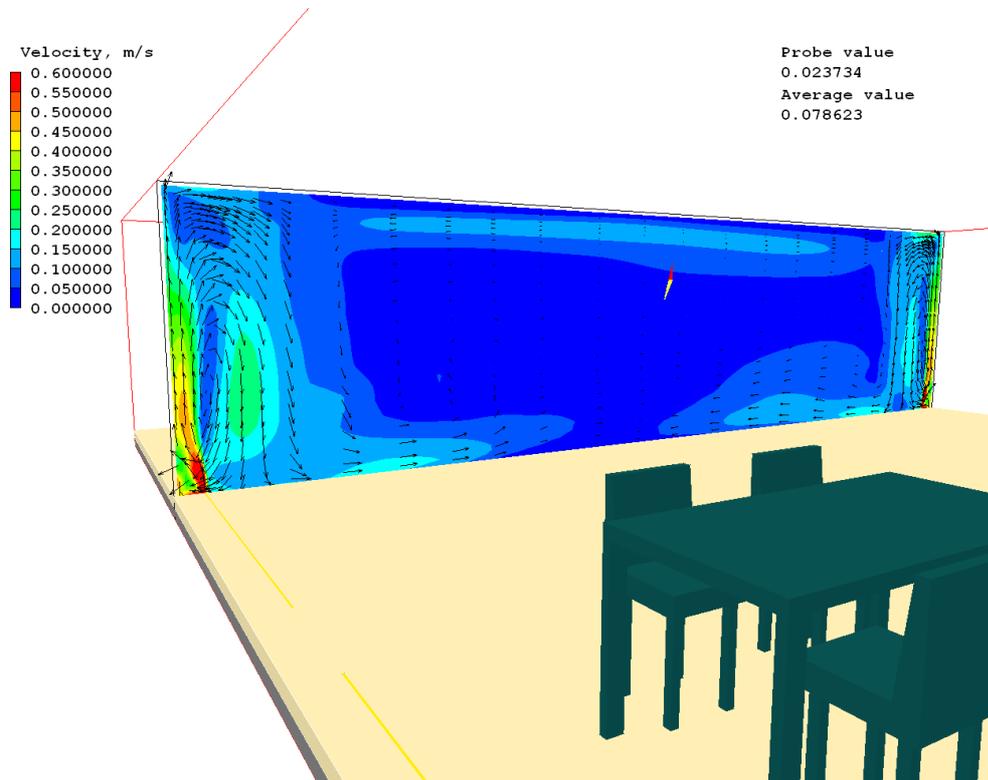
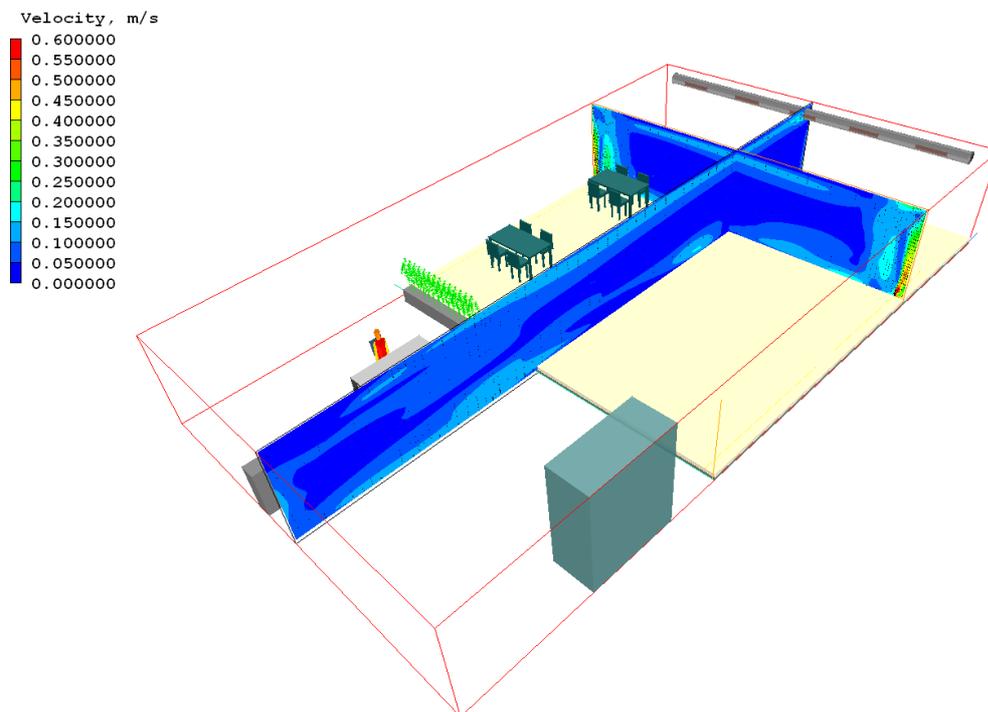


Bild 4-9: Strahlungstemperatur, Kühlfall -1600 m³/h

Bild 4-10: Geschwindigkeitsprofil, Kühlfall - 1600 m³/hBild 4-11: Geschwindigkeitsverteilung, Kühlfall - 1600 m³/h

4.2.3 natürliche Lüftung

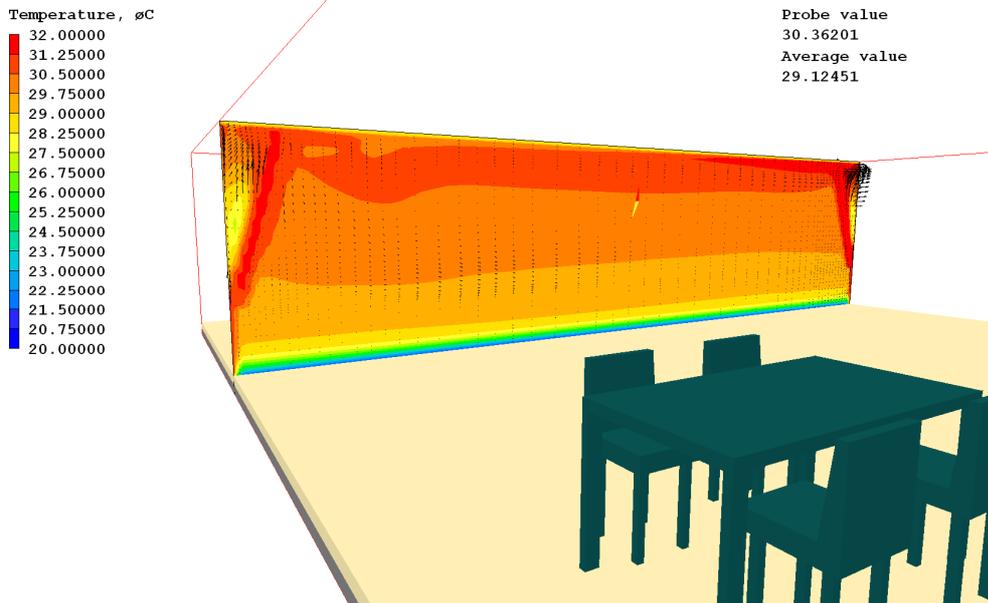


Bild 4-12: Temperaturverteilung, Kühlfall - natürliche Lüftung

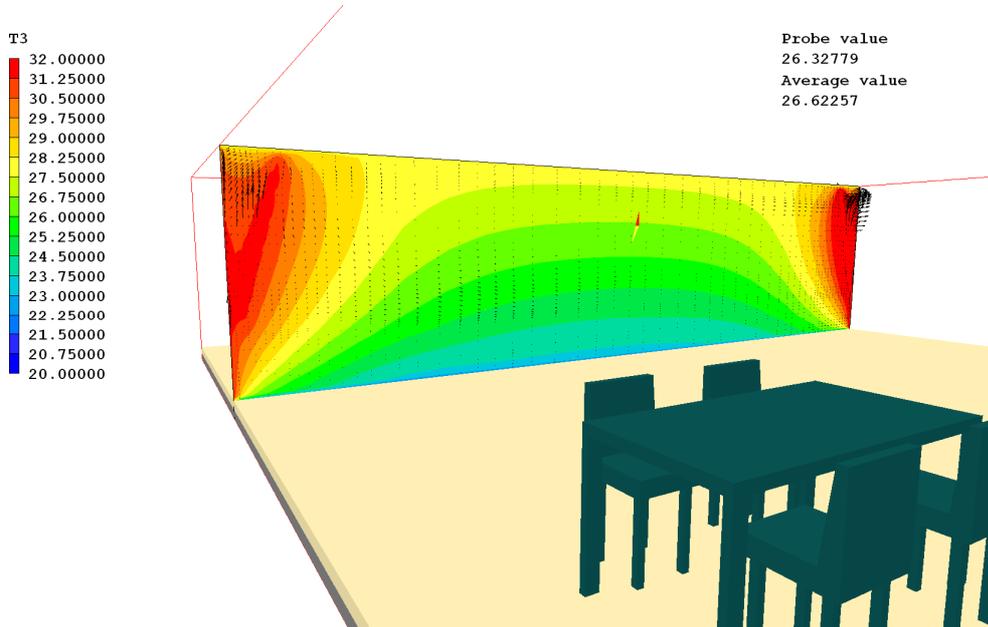


Bild 4-13: Strahlungstemperatur, Kühlfall - natürliche Lüftung

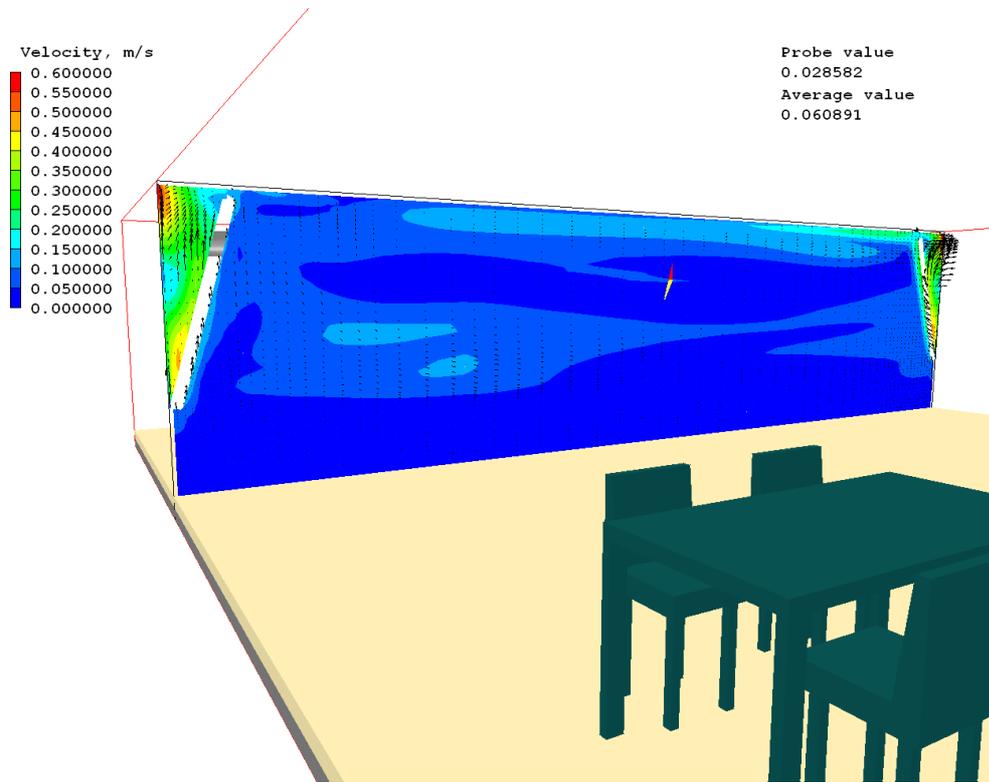


Bild 4-14: Geschwindigkeitsverteilung, Kühlfall - natürliche Lüftung

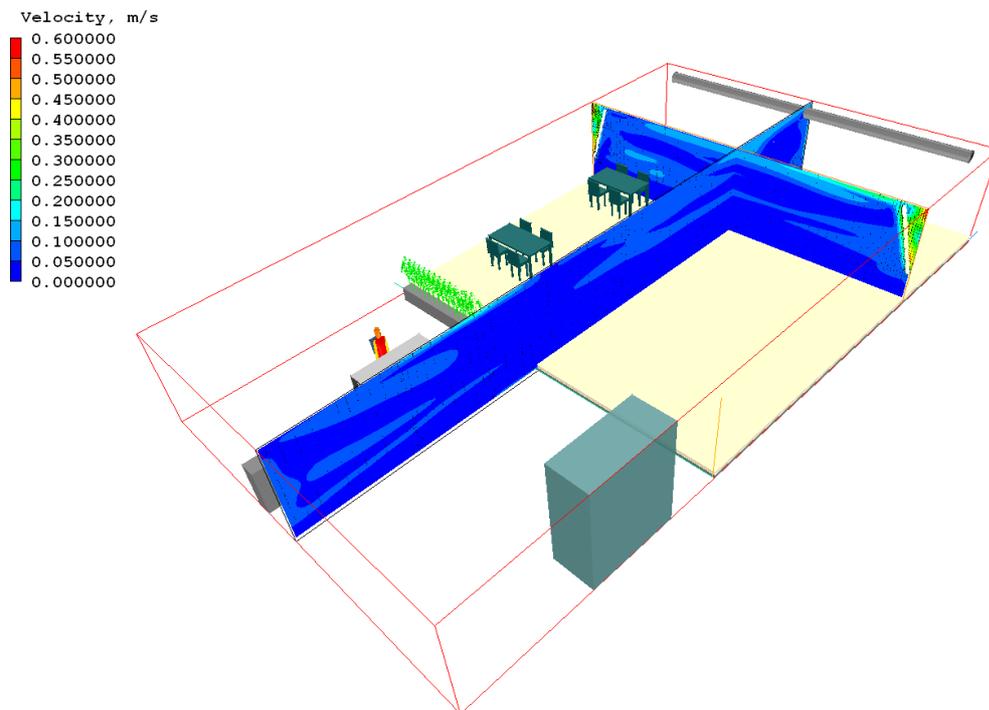


Bild 4-15: Geschwindigkeitsverteilung, Kühlfall - natürliche Lüftung

4.3 Wärmeübertragungskoeffizient

Der Einfluss des Systems KlimaLevel wird hier für den Kühlfall betrachtet. In der Literatur wird der Wärmeübertragungskoeffizient für die reine Fußbodenkühlung mit 6 bis 7 W/(m²K) angegeben, wobei der konvektive Anteil lediglich bei 0,5 W/(m²K) liegt. Dadurch dass die Zuluft nach oben in den Raum geblasen wird, hat die Zuluft zunächst keinen Einfluss auf den Wärmeübergang am Boden. Durch das Absinken der kalten Luft erhöht sich die Luftgeschwindigkeit unmittelbar über dem Boden (bis ca. 10 cm), was zu einem besseren Wärmeübergang führt und somit zu einem höheren Wärmeübertragungskoeffizienten. Durch das System KlimaLevel wird auf der Fußbodenoberfläche aus der freien eine erzwungene Konvektion. Der Wärmeübertragungskoeffizient ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Besonderen Einfluss haben die Geschwindigkeit sowie die Nusselt-Zahl. In diesem Fall wurde die Nusselt-Korrelation nach [Merker]¹, "Wärmeübergang an der ebenen Platte" verwendet. Um den Einfluss der Geschwindigkeit auf den Wärmeübertragungskoeffizienten zu zeigen, wurde der Alpha-Wert alle 30 cm mit Hilfe der o.g. Nusselt-Korrelation berechnet und in einem Diagramm dargestellt.

¹ Merker, Günter (1987): Konvektive Wärmeübergang. 1. Auflage, [Springer Verlag]

Folgende Abbildung dient als Hilfe zur Orientierung für Bild 4-18 und Bild 4-19. Der erste Wert wurde ca. 0,25 m von der Wand ermittelt. Begonnen wurde mit der Berechnung an der Ostseite des Raumes.

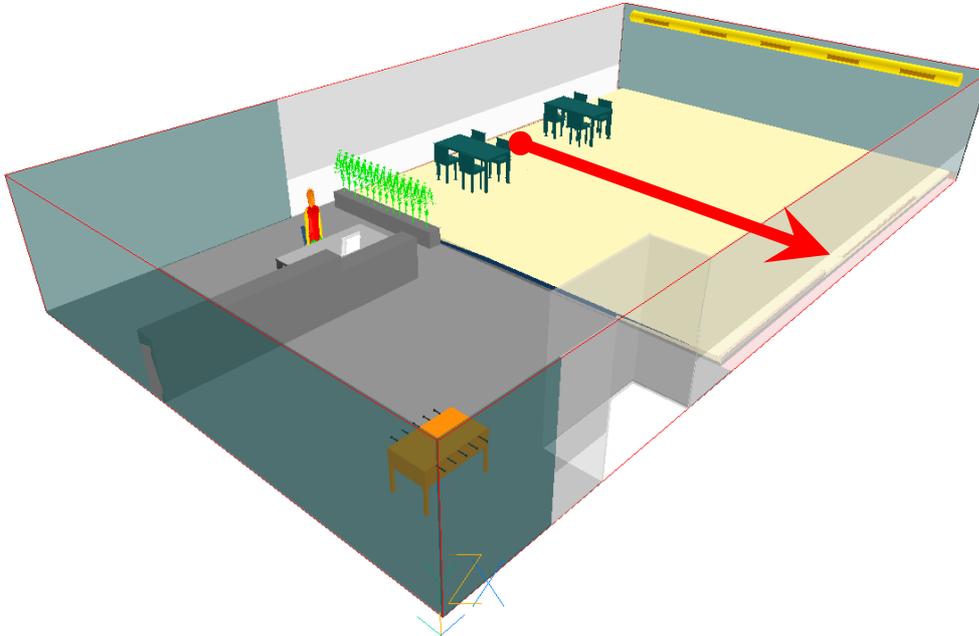


Bild 4-16: Isometrische Ansicht des Raumes mit Verlauf der verwendeten Messpunkte
 Die Abbildung zeigt die Geschwindigkeitsverteilung bei einem Zuluftvolumenstrom von 900 m³/h über dem Boden. Diese Abbildung dient als Grundlage für die Diagramme.

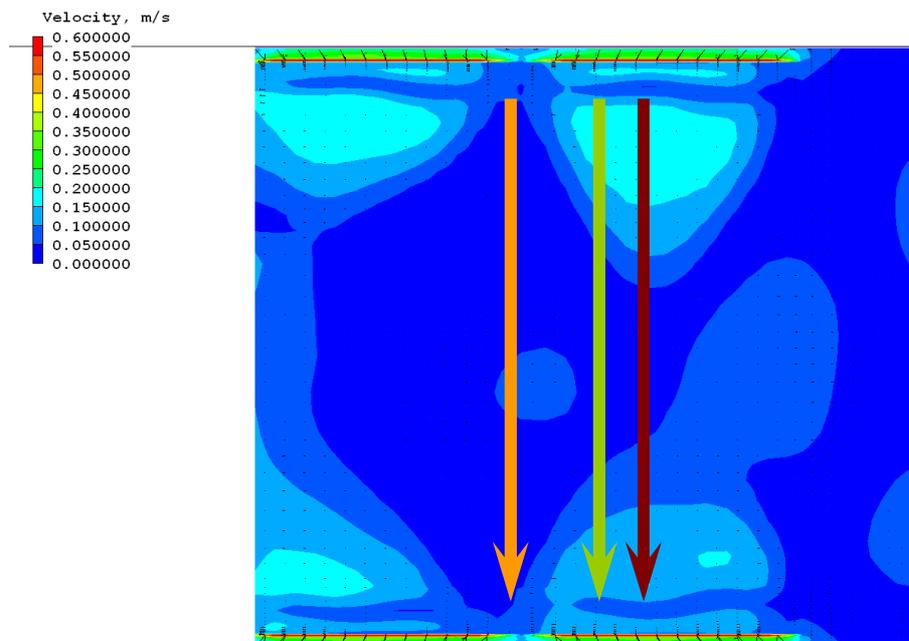


Bild 4-17: Geschwindigkeitsverteilung über dem Boden, 900 m³/h

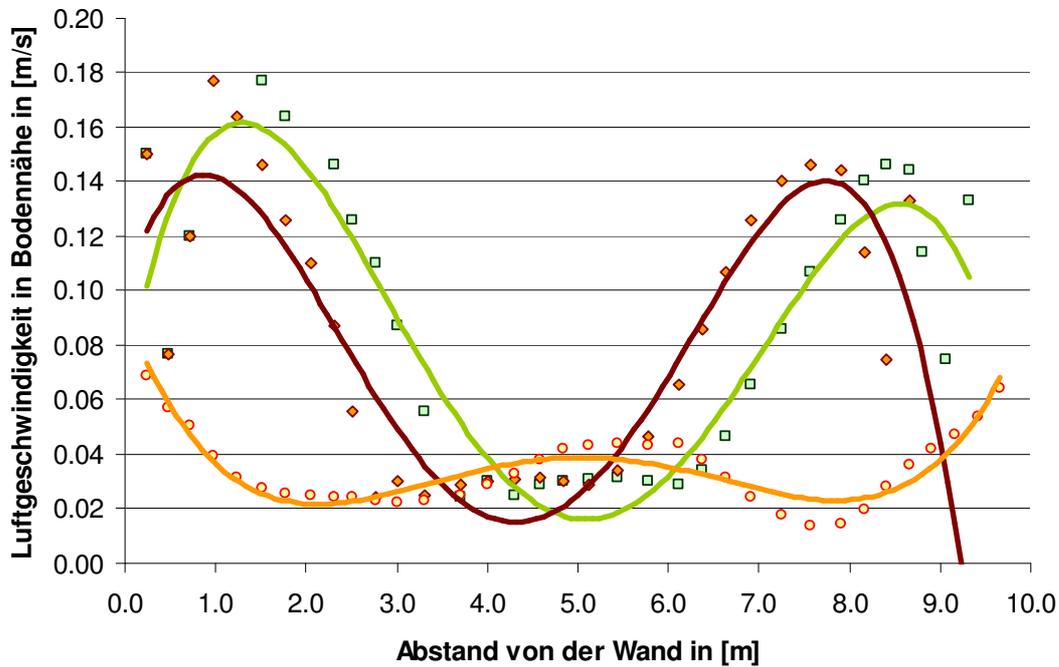


Bild 4-18: Geschwindigkeiten zur Berechnung des konvektiven Wärmeübertragungskoeffizienten

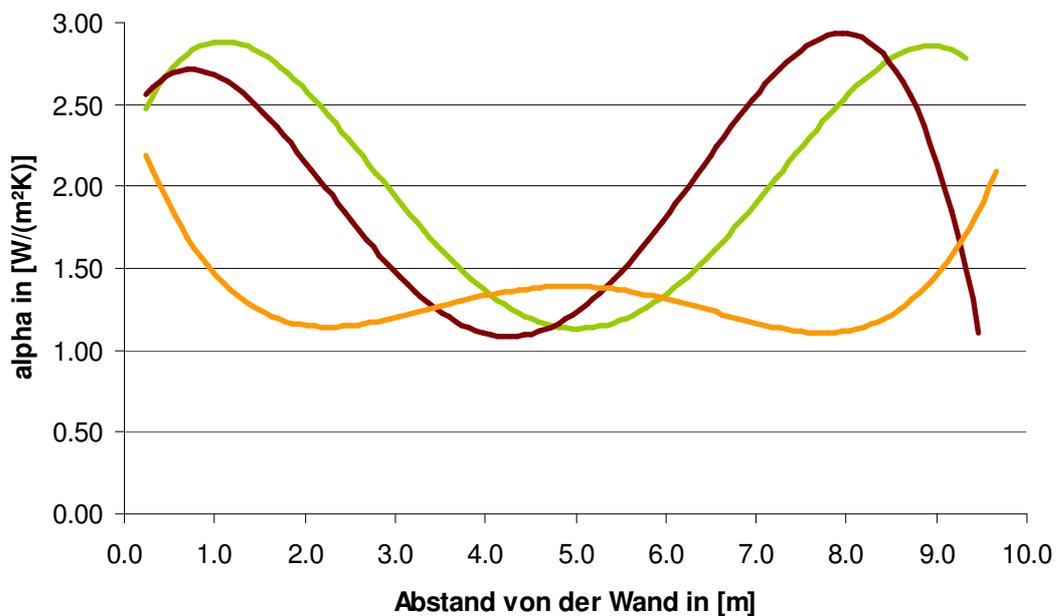


Bild 4-19: konvektiver Wärmeübertragungskoeffizient über die Raumbreite

5 Zusammenfassung und Empfehlung

Die Berechnungen für den Heizfall zeigen die zu erwartenden Ergebnisse. Im Aufenthaltsbereich (nach DIN EN 13779 definiert) ist eine gute Durchmischung der Raumluft vorhanden und dadurch eine hohe Raumluftqualität gewährleistet. Es ist keine unerwünschte Schichtung im Raum erkennbar. Die an der Fassade in den Raum geführte Luft verhindert den Kaltluftabfall an der Glasscheibe und somit mögliche Zugerscheinungen und Unbehagen. Zudem wird durch die warme Luft an der Fassade die Oberflächentemperatur erhöht. Daher ist der Strahlungsaustausch zwischen den Oberflächen geringer und der negative Einfluss auf die operative Raumtemperatur verhindert.

Die Berechnungen für den Kühlfall beinhalten drei Betriebsmodi:

- 900 m³/h, normaler Betrieb
- 1600 m³/h, Volllast (z. B. schnelles Herunterkühlen des Raumes)
- natürliche Lüftung, reine Fußbodenkühlung mit Fensterlüftung

Der Einfluss der mechanischen Lüftung mit dem System KlimaLevel bewirkt einen besseren Luftaustausch und führt bei einem Volumenstrom von 900 m³/h zu einer Lufttemperatur von ca. 26 °C im Aufenthaltsbereich, bzw. 24 °C bei einem Volumenstrom von 1600 m³/h.

Die natürliche Lüftung ergibt einen stark aufgeheizten Raum. Die gemittelte Lufttemperatur ist im Raum mit ca. 30 °C deutlich zu hoch, um die Behaglichkeitskriterien zu erfüllen. Durch die unzureichende Luftdurchmischung bildet sich in Bodennähe ein "Kaltluftsee" aus und die Oberflächentemperaturen der Außenwände sind deutlich höher als bei den Varianten mit mechanischer Lüftung. Durch den Kaltluftsee ergibt sich ein sehr steiler Temperaturgradient von etwa 4-5 K/m (Lufttemperatur am Boden ca. 21 °C, Lufttemperatur in Kopfhöhe ca. 30°C). Dieser Umstand und die große Strahlungsasymmetrie führen zu einem unbehaglichen Raumklima.

Die Strahlungstemperatur ist bei allen untersuchten Varianten nahezu gleich. Somit ist die operative Temperatur allein von der Schichtung der Lufttemperatur abhängig.

Die Geschwindigkeiten unmittelbar über dem Fußboden sind höher als bei der natürlichen Lüftung. Aufgrund dessen ist der Wärmeübergang auf dem Fußboden größer und somit auch der Alpha-Wert höher. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ist in einer Entfernung von 1,0-1,5 m von der Wand mit ca. 3 W/(m²K) am größten und sinkt mit zunehmendem Abstand zum Luftauslass. Bei einer reinen Fußbodenkühlung ohne eine zusätzliche mechanische Lüftung beträgt der konvektive Wärmeübertragungskoeffizient lediglich 0,5 W/(m²K).

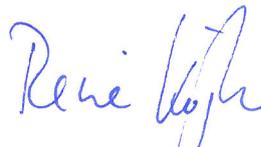
Wie die Ergebnisse zeigen, erfüllt das System KlimaLevel erhöhte Anforderungen im Hinblick auf die Behaglichkeit im Sommer und eine gute Luftqualität. Das System bietet darüber hinaus einen besseren Komfort als eine Fensterlüftung und ermöglicht eine vollständige Deckung der Heizlast. Zur Erfüllung der Behaglichkeitskriterien ist der normale Betrieb mit 900 m³/h ausreichend. Weiterhin verfügt das System über Vorteile in Bezug auf die Energieeffizienz, insbesondere wird durch die Wärmerückgewinnung Energie eingespart und somit der Primärenergiebedarf gesenkt (Energieeinsparverordnung, EnEV).

SCHMIDT REUTER
Integrale Planung und Beratung GmbH

Köln, 15. Mai 2009



ppa. Dr. Dieter Thiel



i.A. René Kögler