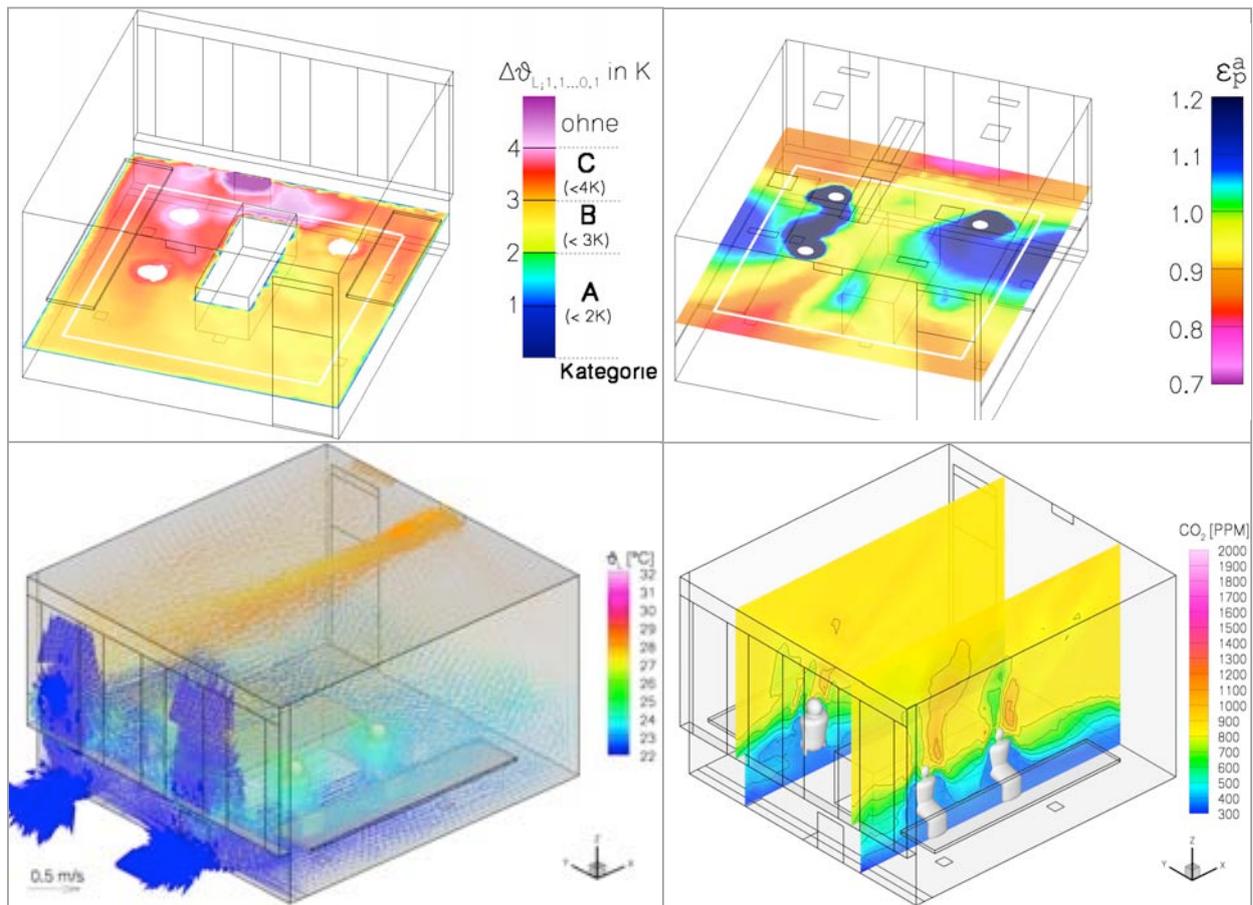


## Handbuch Komfort für Passivhaus-Büros





**Programmverantwortung:**  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und  
Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit



**Programmmanagement:**

..



**Autorenteam:**

IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie, Wien: Dr. Tobias Waltjen, Dr. Bernhard Lipp, DI Thomas Zelger, DI Erna Motz, DI Wolfgang Huber, Ing. Mag. Maria Fellner, DI (FH) Astrid Scharnhorst, DI (FH) Felix Heisinger, DI (FH) Niko Skarabela, Mario Schmitradner BSc

ALware Andreas Lahme, Braunschweig: Dipl. Phys.-Ing. Andreas Lahme, DI Sascha Buchholz

TU Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung:  
Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. W. Richter/Prof. Dr.-Ing. C. Felsmann. Bearbeiter: Dr.-Ing. Ralf Gritzki,  
Dr.-Ing. Alf Perschk, Dr.-Ing. Markus Rösler

newenergy consulting, Linz: Ing. Jürgen Obermayer

Mit einem Beitrag von m.o.o.con, Wien: Dipl. Ing. Bernhard Herzog

## INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	5
1.1. Aufgabenstellung	5
2. GRUNDLAGEN	6
2.1. Passivhausstandard	6
2.2. Thermischer Komfort	6
2.3. Innenraumluftqualität	7
2.4. Modellräume – Herleitung eines Planungsrasters für ein nutzerneutrales Verwaltungsgebäude	8
2.5. Die Gebäudetechnische Ausstattung des Modellraums	16
2.6. Lichtsimulationen – Einfluss von unterschiedlichen Parametern auf die Tageslichtversorgung des Büroraums	23
2.7. Verfahren zur Bewertung der Tageslichtnutzung	27
2.8. Methodik Besonnung und Beschattung	30
2.9. Dynamische Strömungssimulation (CFD-Simulation)	33
2.10. Methodik Thermische Simulationen	39
3. ERGEBNISSE DER LICHTSIMULATIONEN	58
3.1. Faktoren für natürliche Belichtung und Tageslichtnutzung	58
3.2. Ergebnisse Besonnung und Sonnenschutz	80
3.3. Bewertung der Ergebnisse der Lichtsimulationen	97
4. ERGEBNISSE STRÖMUNGSSIMULATIONEN – VARIANTEN – BESCHREIBUNG DER SPEZIFISCHEN RANDBEDINGUNGEN UND RESULTATE	103
4.1. Basisvariante PL4 F1D Sommer – Quelllüftung und Putzkühldecke mit Kapillarrohmatte	104
4.2. Variante PL5 F1D Sommer – Drallauslässe im Boden und Putzkühldecke mit Kapillarrohmatte	108
4.3. Variante PL5 F1D Winter – Drallauslässe im Boden und Putzheizdecke mit Kapillarrohmatte	112
4.4. Variante PL2 F5A Sommer – Lüftungsgitter und Fußbodenkühlung	116
4.5. Variante PL2 F5A Winter – Lüftungsgitter und Fußbodenheizung	120
4.6. Variante PL4 F2A Sommer – Quelllüftung und Betonkernaktivierung	124
4.7. Variante PL4 F2A Winter – Quelllüftung und Betonkernaktivierung	128
4.8. Variante PL2 L1A Sommer – Lüftungsgitter und Ventilatorkonvektoren	132
4.9. Variante PL2 L1A Winter – Lüftungsgitter und Ventilatorkonvektoren	137
4.10. Variante L1A Sommer – Ventilatorkonvektoren mit Primärluftanteil	143

4.11.	Variante L1A Winter – Ventilatorkonvektoren mit Primärluftanteil	149
4.12.	Variante L1b Sommer – Ventilatorkonvektoren Komfortbrüstungsgeräte	153
4.13.	Variante PL5 F2A Sommer – Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung	157
4.14.	Variante PL5 F2A Winter – Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung	161
4.15.	Variante PL2 F2A Sommer – Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung	165
4.16.	Variante PL2 F2A Winter – Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung	169
4.17.	Variante PL4 F5A Sommer – Quelllüftung und Fußbodenkühlung	173
4.18.	Variante PL4 F5A Winter – Quelllüftung und Fußbodenheizung	177
4.19.	Variante PL2 L2 Sommer – Lüftungsgitter und Deckenfancoil	181
4.20.	Variante PL2 L2 Winter – Lüftungsgitter und Deckenfancoil	185
4.21.	Variante L3 Sommer – Deckeneinbaugerät mit Drallauslässen	189
4.22.	Variante FL1 Sommer – Induktionskühlgerät (Kühlbalken)	194
4.23.	Variante FL1 Winter – Induktionsheizgerät (Heizbalken)	298
4.24.	Variante PL4 F3 Sommer – Kühlsegel mit Quellluftauslass	202
4.25.	Einzelauswertung Kohlenstoffdioxidgehalte der Innenraumlufte	206
4.26.	Einzelauswertung Luftaustauschindex in 1,1 m Höhe bei den Köpfen der Sitzenden	232
4.27.	Einzelauswertung Zugluft im Nacken	245
4.28.	Einzelauswertung vertikale Lufttemperaturunterschiede	264
4.29.	Einzelauswertung Strahlungsasymmetrie	274
4.30.	Einzelbesprechung der Haustechnikvarianten	398
5.	ERGEBNISSE THERMISCHE SIMULATIONEN	304
5.1.	Ergebnisse zur Ausgangsvariante Passivbüro_00	304
5.2.	Ergebnisse Nutzung und Architektur	313
5.3.	Ergebnisse Thermische Hülle	325
5.4.	Ergebnisse Tageslichtversorgung und Beleuchtung	334
5.5.	Ergebnisse Haustechnik	338
5.6.	Ergebnisse energetische und ökologische Bewertung	357
5.7.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	358
6	AUSBLICK UND EMPFEHLUNGEN	368
7	LITERATURVERZEICHNIS	370
7.1	Literatur zu Strömungssimulationen	370
7.2	Literatur zu Thermische Simulationen	370
8	ANHANG	371
8.1	Bauliche Varianten	371

# 1. Einleitung

## 1.1. Aufgabenstellung

Dieses Handbuch beleuchtet die Bedingungen für Tageslichtnutzung, thermischen Komfort und Innenraumlufthqualität in Gebäuden, die als Büro genutzt werden. Der energetische Aufwand für die Herstellung der Komfortbedingungen, insbesondere der Primärenergiebedarf, sollen dabei minimiert werden.

Sowohl der thermische Komfort als auch die Minimierung des Primärnergieaufwands werden durch den Passivhausstandard begünstigt. Daher setzen wir die Einhaltung dieses Baustandards bei unseren Modellräumen voraus. Auch die Bedingungen für gute Innenraumlufthqualität, wegen der obligatorischen mechanischen Lüftung, und die Möglichkeit guter Tageslichtnutzung, wegen des niedrigen Wärmedurchgangs der Verglasung, werden durch den Passivhausstandard erleichtert.

Dennoch genügt es nicht, Passivhauskriterien einzuhalten, um umfassenden Komfort in Bürogebäuden zu gewährleisten. Das liegt an den Besonderheiten der Büronutzung.

Im Vergleich zu Wohnnutzungen sind die Belegungsdichten in Büros in aller Regel höher. Personen belasten die Innenraumlufth mit Wärme und Kohlenstoffdioxid; Bürogeräte verbrauchen Strom, geben Wärme ab, manche auch Ozon. Dies vermindert den Heizenergiebedarf, schafft aber, auch in nördlicheren Breiten, Kühlbedarf und erhöhten Lüftungsbedarf. Erhöhte Luftaustauschraten bewirken im Winter sehr niedrige Luftfeuchten.

In Büros werden hohe Anforderungen an den thermischen Komfort, an die Versorgung mit Tageslicht und an eine Sichtverbindung ins Freie an jedem Arbeitsplatz gestellt. Denn BüronutzerInnen sind weniger mobil, als WohnungsnutzerInnen. Sie können sich nicht ein passendes Plätzchen suchen.

Ganzverglasung ist Architekturmode, aber der hohe Tageslichtbedarf benötigt jedenfalls großzügige Fensterflächen und nicht allzu große Raumtiefen und Traktiefen. Tageslicht muss außerdem blendfrei zur Verfügung gestellt werden. Schließlich muss der Wärmeeintrag durch direktes Sonnenlicht begrenzt werden, vor allem im Sommer. Ungeeignete Sonnenschutzrichtungen schließen mit dem direkten blendenden Sonnenlicht gleich auch das Tageslicht aus, das dann durch Kunstlicht ersetzt werden muss. Zusätzlicher Stromverbrauch, Wärmeeintrag und Komfortminderung sind der Preis.

Mit unserer vorliegenden Studie legen wir Simulationsergebnisse an Modellräumen vor, die

1. optimale Bedingungen für Tageslichtnutzung, Sonnenschutz und verbleibenden Kunstlichtbedarf mittels Tageslichtsimulation bestimmen;
2. die Wirkungsweise von Haustechnikkomponenten für Frischluft-, Wärme- und Kältezufuhr mittels dynamischer Strömungssimulation zeigen
3. die Gesamtheit der Energieströme im Modellraum unter allen relevanten Betriebszuständen mittels thermischer Gebäudesimulation aufzeigen.

## 2. Grundlagen

### 2.1. Passivhausstandard

Der Passivhausstandard vereint hohen Komfort, gute Raumluftqualität mit niedrigstem Aufwand an Energie- und Umweltressourcen. Vorhandene natürliche Ressourcen wie die Abwärme von Personen, die solare Einstrahlung, Erdwärme oder -kälte etc. sollen ein Gebäude bereits „passiv“ derart konditionieren, dass zur Erreichung von behaglichen Innenraumkonditionen nur mehr ein geringer Aufwand an Gebäudetechnik und Energie notwendig ist.

Die folgenden Grenzwerte müssen Gebäude einhalten, die prinzipiell als Passivhaus zertifizierbar sein sollen:

- Heizwärmebedarf  $\leq 15 \text{ kWh/m}^2$  und Jahr
- Kühlbedarf  $\leq 15 \text{ kWh/m}^2$  und Jahr
- Luftdichtigkeit  $n_{50} \leq 0,6 \text{ 1/h}$
- Primärenergiebedarf für alle Energiedienstleistungen  $\leq 120 \text{ kWh/m}^2$  und Jahr

Diese Kenngrößen beziehen sich auf die thermische Hülle, die Energiebezugsfläche entspricht in etwa der Nutzfläche, wobei Nebenräume nur mit 60 % einbezogen werden. Der Nachweis erfolgt mittels Passivhausprojektierungspaket (PHPP), derzeit in Version 2007.

### 2.2. Thermischer Komfort

Die ÖNORM EN ISO 7730:2006 bestimmt Bewertungsverfahren zum thermischen Komfort, die die Wärmebilanz des Körpers als Ganzes gegenüber der Umgebung abbilden: das vorausgesagte mittlere Votum, PMV (Predicted Mean Vote) und davon abgeleiteten vorausgesagten Prozentsatz an Unzufriedenen PPD, (Predicted Percentage of Dissatisfied). Zusätzlich bestimmen weitere Verfahren in der Norm lokale (auf einzelne Körperteile beschränkte) Störungen des thermischen Komforts: Das sind

1. Vorausgesagte Prozentsätze an Personen, die sich durch Zugluft im Nacken beeinträchtigt fühlen werden (DR für Drought). Dies betrifft insbesondere Personen mit hauptsächlich sitzender Tätigkeit.
2. Unzufriedenheit aufgrund hoher vertikaler Lufttemperaturunterschiede zwischen Kopf und Fußgelenken von Personen
3. Unzufriedenheit infolge kalter oder warmer Fußböden, für die beim Aufenthalt von Personen in leichten, für den Innenraum geeigneten, Schuhen die Fußbodentemperaturen ausschlaggebend sind
4. Unbehaglichkeit wegen Asymmetrien der Strahlungstemperatur. Dabei sind die Fälle Warme Decke, Kühle Wand (Fenster), Kühle Decke und Warme Wand zu unterscheiden. Besonders gering ist die Toleranz gegenüber einer warmen Decke, besonders groß gegenüber einer warmen Wand.
5. Von diesen Größen werden die Komfortklassen A, B und C abgeleitet, die sich durch zunehmende Toleranzen gegenüber einem Optimalwert unterscheiden (Tabelle 1):

Kategorie	Thermischer Zustand des Körpers insgesamt		Lokale Unbehaglichkeit			
	Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen	Vorausgesagtes mittleres Votum	Prozent an Unzufriedenen auf Grund von Zugluft	Prozent an Unzufriedenen auf Grund vertikaler Temperaturunterschiede	Prozent an Unzufriedenen auf Grund warmer oder kalter Fußböden	Prozent an Unzufriedenen auf Grund von asymmetrischer Strahlung
	PPD %	PMV	DR %	%	%	%
A	< 6	-0,2 < PMV < 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	-0,5 < PMV < +0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	-0,7 < PMV < +0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Tabelle 1: Behaglichkeitskategorien mit ihren Kriterien aus dem Anhang A der ÖNORM EN ISO 7730:2006

Aus der Tabelle geht hervor, dass eine Klasse nur dann als erreicht gelten kann, wenn sowohl die Kriterien für den thermischen Komfort des Körpers insgesamt als auch alle Kriterien für lokalen Komfort der jeweiligen Klasse entsprechen.

Für Gebäude ohne aktive Kühlung, die ausschließlich auf natürliche Kühlmaßnahmen setzen (z.B. verstärkter nächtlicher Fensterluftwechsel, verstärkter Fensterluftwechsel auch am Tag), wird für die quantitative Beurteilung der thermischen Behaglichkeit ÖNORM EN 15251 angewandt. Wesentlich am dort angewendeten adaptiven Modell ist der Ansatz, dass das Empfinden von thermischem Komfort nicht nur von klimatischen Bedingungen des Innenraums (neben Aktivität und Kleidung) abhängen, sondern auch von den Außenbedingungen (in der Norm der gleitenden Außenlufttemperatur). Die Anpassung des Nutzers an das Raumklima durch Änderung der Bekleidungsstärke oder die Öffnung der Fenster muss möglich sein, dadurch werden deutlich wärmere Raumzustände noch als komfortabel eingeschätzt.

### 2.3. Innenraumluftqualität<sup>1</sup>

In Innenräumen steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration infolge der Atemtätigkeit der Personen im Raum an und kann leicht Werte bis 2000 ppm erreichen. Bereits bei 800 ppm empfinden 20 % der Personen die Luft als nicht mehr „frisch“. (Dabei macht es einen Unterschied, ob eine Person sich im Raum aufhält, während der CO<sub>2</sub>-Gehalt langsam ansteigt oder ob sie von draußen von der frischen Luft den Raum betritt. Es gibt also einen subjektiven Gewöhnungseffekt. Das kommt in euren Unterlagen noch nicht vor).

Zulässige Konzentrationen von CO<sub>2</sub> in mechanisch belüfteten Innenräumen werden durch die ÖNORM EN 13779:2008<sup>2</sup>, die deutsche VDI 6022 sowie in Österreich durch die OIB Richtlinie 3<sup>3</sup>: geregelt. In Deutschland wurden Innenraumrichtwerte für CO<sub>2</sub> von der Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (Ad-hoc Arbeitsgruppe)<sup>4</sup> veröffentlicht.

<sup>1</sup> Wir danken Herrn DI Felix Twardik, IBO Innenraumanalytik, auf dessen Wissenschatz wir für diesen Abschnitt zurückgreifen durften!

<sup>2</sup> ÖNORM EN 13779 (2008): Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen (die Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft lehnte sich an die Version der Norm aus dem Jahre 2005 an)

<sup>3</sup> Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB-Richtlinie 3, OIB-300.3-005/07 ([http://www.oib.or.at/RL3\\_250407.pdf](http://www.oib.or.at/RL3_250407.pdf))

<sup>4</sup> Ad-hoc Arbeitsgruppe "Innenraumrichtwerte" der Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (2008): [Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft](#). Bundesgesundheitsbl Gesundheitsforsch Gesundheitsschutz 51. S 1358 -1369

Beurteilungswert als CO <sub>2</sub> -Konzentration (absolut)	Beschreibung der Innenraum-Luftqualität nach ÖNORM EN 13779 (2008)	Hygienische Bewertung der Ad-Hoc-Arbeitsgruppe	Empfehlungen der Ad-Hoc-Arbeitsgruppe
< etwa 800 ppm	Hohe Raumluftqualität (IDA 1, RAL 1)	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
etwa 800 - 1000 ppm	Mittlere Raumluftqualität (IDA 2, RAL 2)		
etwa 1000 - 1400 ppm	Mäßige Raumluftqualität (IDA 3, RAL 3)	Hygienisch auffällig	Lüftungsmaßnahme (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen). Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
etwa 1400 - 1900 ppm	Niedrige Raumluftqualität (IDA 4, RAL 4)		
> etwa 1900 ppm		Hygienisch inakzeptabel	Belüftbarkeit des Raums prüfen; ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen

Tabelle 2: Klassifizierung der Innenraumluftqualität und Anforderungen an mechanisch belüftete Gebäude in Hinblick auf CO<sub>2</sub> nach ÖNORM EN 13779 sowie nach Ad-hoc Arbeitsgruppe

Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft im Freien steigt seit Jahrzehnten an. Betrug er 1960 noch ca. 315 ppm, so sind es im Jahr 2010 schon 385 ppm gewesen<sup>5</sup>. Sie unterscheiden sich auch zwischen Stadt und Land. Deshalb sind die Grenzwerte in der Tabelle in der Norm als zulässige Erhöhung der Innenraumluftkonzentration über einer Außenluftkonzentration von 400 ppm definiert. Die oben in der Tabelle gebene Grenzwerte setzen bereits Innenraumluftkonzentrationen als Summenwerte.

Die Arbeitsräumen bei mechnischer Belüftung zuzuführenden Außenluftvolumina sind in der Arbeitsstättenverordnung definiert<sup>6</sup>:

§ 27 (3) Wird ein Arbeitsraum ausschließlich mechanisch be- und entlüftet, gilt folgendes:

1. Pro anwesender Person und Stunde ist mindestens folgendes Außenluftvolumen zuzuführen:

a) 35 m<sup>3</sup>, wenn in dem Raum nur Arbeiten mit geringer körperlicher Belastung durchgeführt werden.

Dies ist der Fall bei Büroarbeitsplätzen und ist daher von uns in den Strömungssimulationen so angesetzt worden.

## 2.4. Modellräume – Herleitung eines Planungsrasters für ein nutzerneutrales Verwaltungsgebäude

Von Bernhard Herzog, bene consulting/moocon

### 2.4.1. Allgemeines

Prinzipiell ist es aufgrund der sehr unterschiedlichen Anforderungen von Organisationen kaum möglich ein allgemein gültiges Planungsraster für ein nutzerneutrales Bürogebäude zu entwickeln. Aufgrund der Erfahrungen aus vielen umgesetzten Projekten, als auch aufgrund von Trends und Entwicklungen der

<sup>5</sup> ([http://scrippsco2.ucsd.edu/graphics\\_gallery/other\\_stations/global\\_stations\\_co2\\_concentration\\_trends.html](http://scrippsco2.ucsd.edu/graphics_gallery/other_stations/global_stations_co2_concentration_trends.html)).

<sup>6</sup> Arbeitsstättenverordnung AStV, BGBl. II Nr. 368/1998

letzten Jahre, soll ein für möglichst viele Büroobjekte gültiges Planungsraster als Basis des Forschungsprojektes herangezogen werden.

### **2.4.2. Reversibilität**

Unter dem Motto „Nichts ist steter als der Wandel“ stehen Organisationsveränderungen immer stärker im Mittelpunkt, um die sich immer rascher ändernden Rahmenbedingungen aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft bedienen zu können. Umzugsraten von 30 % und mehr (Arbeitsplatzumzüge pro Jahr) sind die Folge. Daher gewinnen die Anforderungen an reversible, flexible Infrastruktur (Daten- und Stromanschlüsse), Haustechnikausstattung (Wärme, Kälte, Beleuchtung) und Innenwände stetig an Bedeutung.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an Kommunikation und Konzentration – auch von verschiedenen Abteilungen innerhalb eines Unternehmens (z.B. Abteilung Recht = Konzentration; Abteilung Vertrieb = Kommunikation) – gilt es zunehmend reversible Bürokonzepte umzusetzen. Dies bedeutet innerhalb eines Baukörpers sowohl Zellen-, Kombi- als auch Großraumlösungen verwirklichen zu können und eine Veränderung, sowohl der Büroformen, als auch von Abteilungsgrößen jederzeit kosteneffizient umsetzen zu können.

Aus diesen Gründen wird ein reversibles Planungsraster als Basis für das Forschungsprojekt vorgeschlagen.

### **2.4.3. Arbeitsplatzgrundmodul**

In den letzten Jahren erfolgte zusehends eine Veränderung des Arbeitsplatzgrundmoduls von großflächigen Winkelkombinationsarbeitsplätzen zu kleinflächigeren linearen Tischen mit Anbaukombinationen. Die Veränderung gründet einerseits auf eine Steigerung der Flächeneffizienz, andererseits auch an einer Veränderung des IT-Arbeitsplatzes vom Röhrenbildschirm zum Flachbildschirm und der damit verbundenen Flächenanforderung am Arbeitsplatz.

Arbeitsplatzgrundmodule sollten sich im Wesentlichen an den Aufgaben von Gruppen einer Organisation orientieren. Als Basis der Ableitung eines reversiblen Planungsrasters sollen folgende Darstellungen dienen:

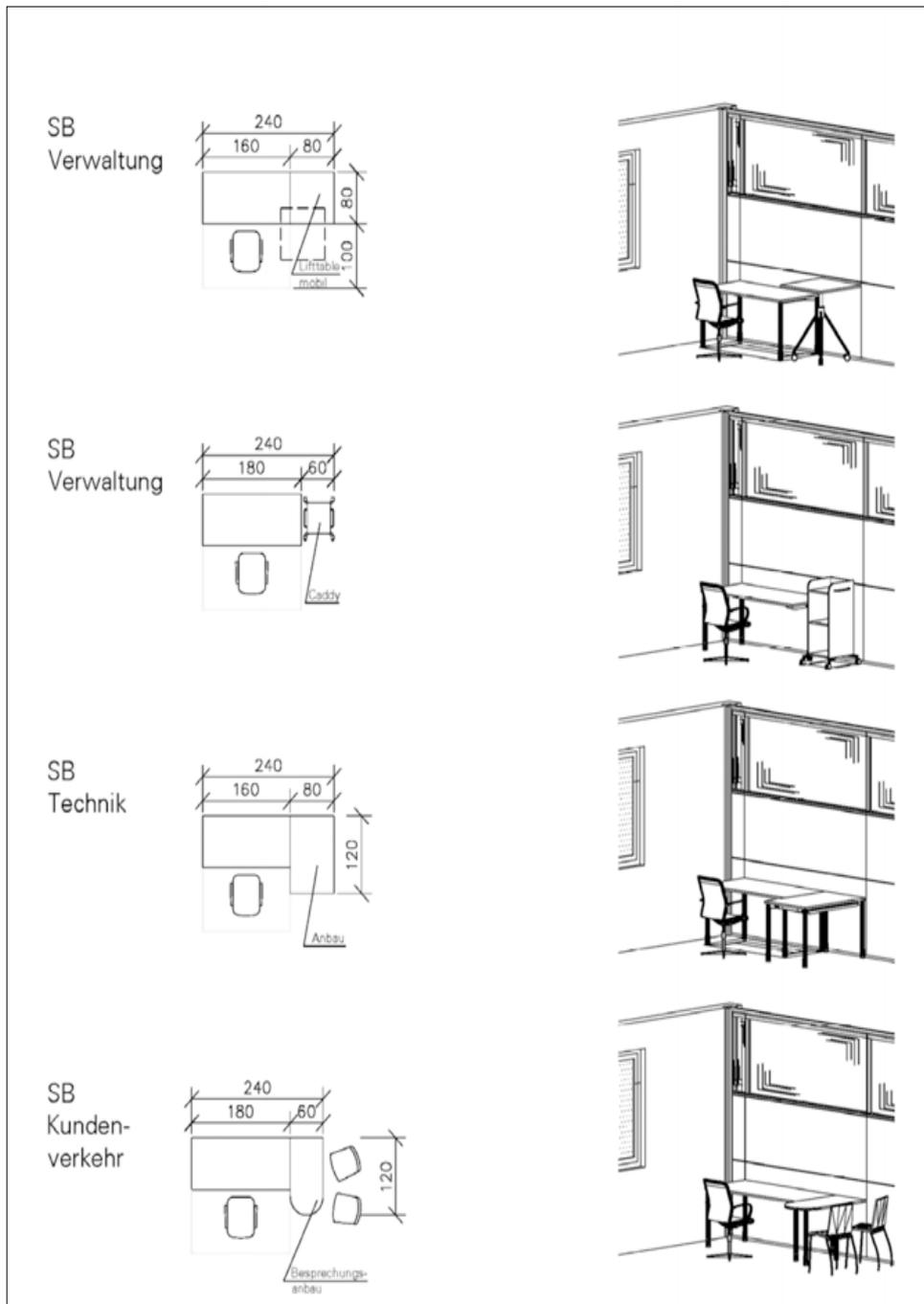


Abbildung 1: Bürokonfigurationen SB...Sachbearbeitung. Quelle: bene consulting/moocon

#### 2.4.4. Raumstandards Büro

Aufgrund der im deutschen Sprachraum stark verbreiteten Besiedlung entlang von Fassaden in ein bis zwei, selten drei Reihen sind nun Raumstandards für die Arbeitsplatzgrundmodule zu entwickeln. Die Raumstandards sollten hinsichtlich einer wandorientierten oder geblockten Belegung individuelle Freiheiten für die Mitarbeiter zulassen. Vor- und Nachteile in Bezug auf Kommunikation und Konzentration dieser Aufstellung sind jedenfalls zu beachten. Für das zu entwickelnde Planungsrastrer soll eine ein- bis zweireihige Belegung entlang der Fassade als durchschnittliche übliche Belegung angenommen werden. Hieraus ergeben sich die Raumtiefen.

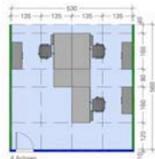
Die Raumbreite ergibt sich aus einer Achsrasterdiskussion, die je Organisation zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führt. Hierzu sind Arbeitsstättenverordnungen, Normen und Auslegungen der Arbeitsinspektorate rechtlich wesentlich – organisatorisch hängt die Wirtschaftlichkeit eines Achsrasters im Wesentlichen von der Verteilung der Raumtypen innerhalb der Organisation ab. Flächenoptimierungen von 20 % sind durch die richtige Wahl des Achsrasters zu erreichen. Rastergruppen zwischen 125 und 140, sowie um 150 bzw. 175 sind mögliche Lösungen. Der in Österreich oft abgebildete Raster 125 cm ist jedoch hinsichtlich der Abbildung des gewählten Arbeitsplatzgrundmoduls in Deutschland nicht zulässig und widerspricht auch der ab Frühjahr 2010 gültigen neuen ÖNORM A 8010. Als wirtschaftliches Achsmaß für Österreich wäre 135 cm bei dem gewählten Arbeitsplatzgrundmodul, für Deutschland 150 cm. Daraus ergeben sich folgende Raumstandards am Beispiel 135 cm:



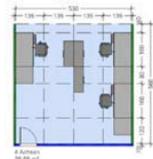
**Achsmaß 135 (125 – 140)**

**3 SB-Büro**

**geblockt**

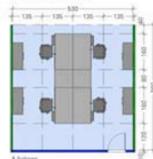


**geklappt**

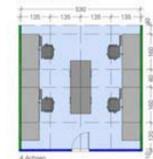


**4 SB-Büro**

**geblockt**



**geklappt**



**6 SB-Büro**

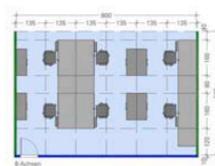
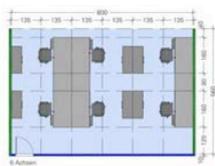


Abbildung 2: Bürokonfigurationen SB....Sachbearbeitung. Quelle: bene consulting/moocon

## 2.4.5. Bürobereich/Büroform

Starre Raumstrukturen behindern, wie oben erwähnt, die Veränderungsdynamik moderner Organisationen. Die polare Dogmatik der Büroformdiskussion (Zellenbüro, Gruppenbüro, Kombibüro, Gro.raumbüro, usw.) hat sich als nicht zielführend erwiesen. Zu unterschiedlich sind die Anforderungen der einzelnen Abteilungen auf der einen Seite und die Möglichkeit der bekannten Bürokonzepte auf der anderen Seite.

Dementsprechend sollte es möglich sein, Bürogeschoße mit unterschiedlichen Büroformen auszugestalten. Aufgrund der unterschiedlichen Arbeitsabläufe und Prozesse im Büro, sowie der Veränderungen der Informations- und Kommunikationstechnologien, werden in Unternehmen auch Mischformen dieser Grundtypen eingesetzt.

### PRO

#### Zellenbüro

- ausgeprägte Privatsphäre
- Diskretion ist gewährleistet
- Unterstützung konzentrierter Einzelarbeit
- akustische Störfreiheit

#### Gruppenbüro

- leichte Kontaktmöglichkeit durch visuelle Verbindung
- gute Gruppen und Abteilungsidentifikation
- großzügiger Raumeindruck
- kaum Umbaukosten

#### Kombibüro: Vereinigung der Vorteile von Zellen-/Gruppenbüro

- Wechselwirkung Konzentration / Kommunikation ideal gelöst
- informelle Kommunikation möglich
- Mittelzone zur Unterbringung von Bürosonderfläche
- höherer Marktwert („Verfügungsbau“)

### CONTRA

- schlechte Abteilungs- und Gruppenidentifikation
- Mangel an Kommunikation u. Transparenz
- informelle Kommunikation schwer möglich
- doppelte Verkehrswege
- höherer Aufwand Bei Umbau

- geringe visuelle Abschirmung
- akustische Störungen möglich
- ungeeignet für konzentrierte Arbeit

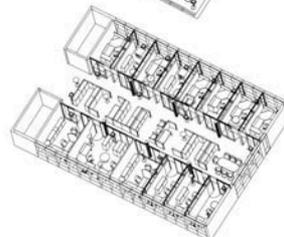
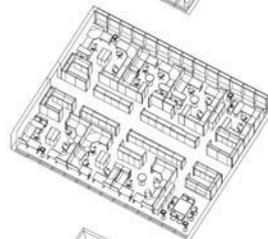
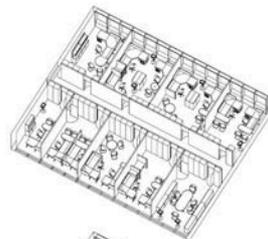
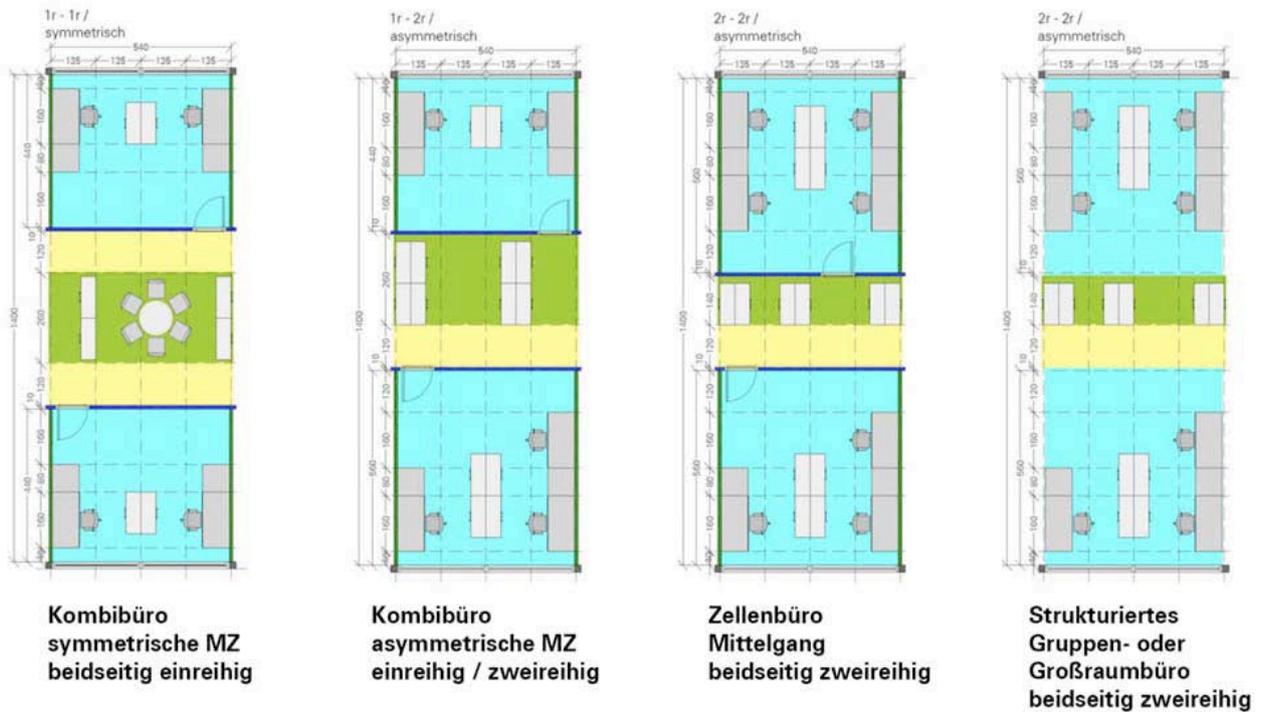


Abbildung 3: Bürokonfigurationen. Quelle: bene consulting/moocon

## 2.4.6. Planungsraster

Aus den o.a. Anforderungen ergibt sich in Kombination folgendes Planungsraster:



D: Achsraster 150 cm

A: Achsraster 135 cm

Abbildung 4: Planungsraster Quelle: bene consulting/moocon

## 2.4.7. Umsetzung der Vorschläge für die Simulationen

Für die Simulationen wurde das Zellenbüro mit Mittelgang und drei Arbeitsplätzen ausgewählt. Der Mittelgang (mit und ohne verglaste Oberlichten) wurde vorerst nicht in die Simulationen einbezogen.



Abbildung 5: Grundriss der ausgewählten Modellraumkonfiguration

## 2.4.8. Fassaden

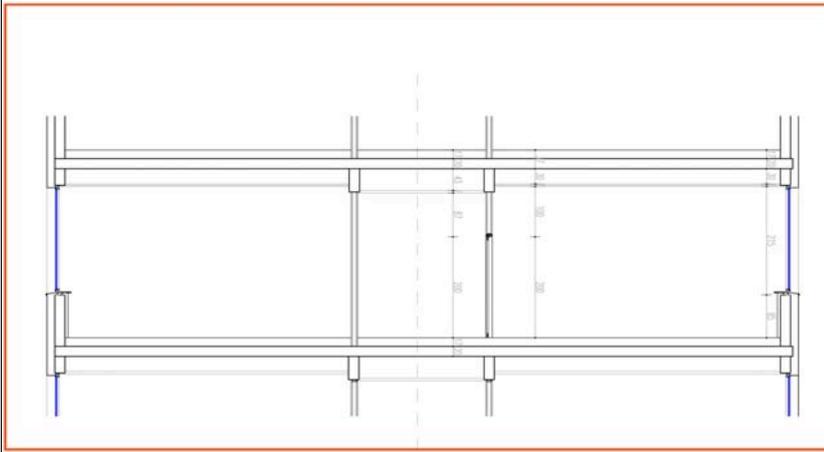


Abbildung 6: Schnitt der ausgewählten Modellraumkonfiguration mit Oberlichtern, einseitig.

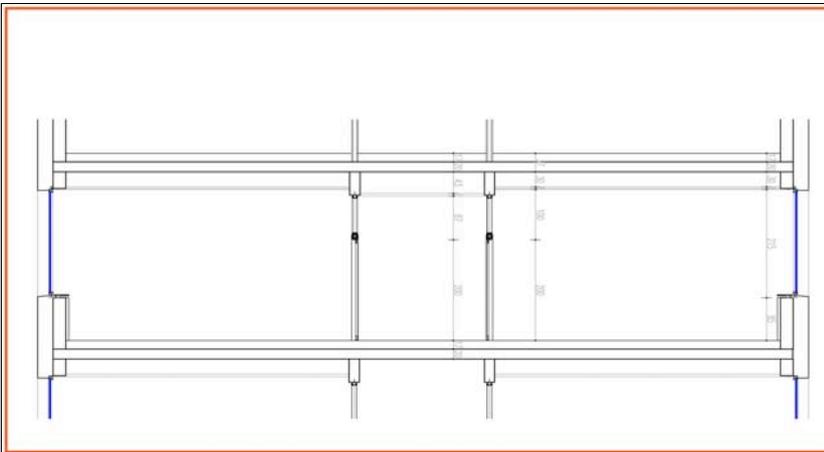


Abbildung 7: Schnitt der ausgewählten Modellraumkonfiguration mit Oberlichtern, beidseitig

Die Schnitte zeigen Bandfenster als Standardfall, die in den Lichtsimulationen abgewandelt wurden. Dazu die folgenden Bilder:

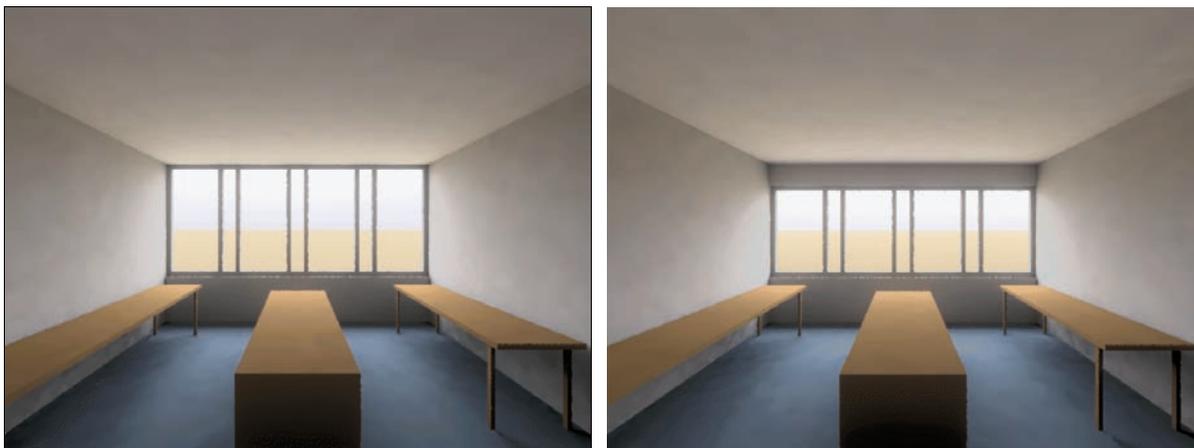


Abbildung 8: Standardvariante: Bandfenster ohne Sturz (links), Variante mit Sturz (rechts). Quelle: Alware



Abbildung 9: Variante Ganzverglasung. Quelle: Alware



Abbildung 10: Variante Fenstergröße 20 % der Grundfläche, ohne Sturz (links), mit Sturz (rechts). Quelle: Alware



Abbildung 11: Variante Fenstergröße 10 % der Grundfläche, keine Sturz (links), mit Sturz (rechts). Quelle: Alware

Die Fenster wurden für einige der Lichtsimulationen mit außen- und innenliegenden Verschattungseinrichtungen ausgestattet, die unten bei den Lichtsimulationen besprochen werden.

## 2.5. Die gebäudetechnische Ausstattung des Modellraums

Für die Strömungssimulationen wurden die Modellräume mit einer Vielzahl verschiedener Zuluft-führungen, Flächenkühlungen und -heizungen und Varianten für Luftheizung und -kühlung ausgestattet.

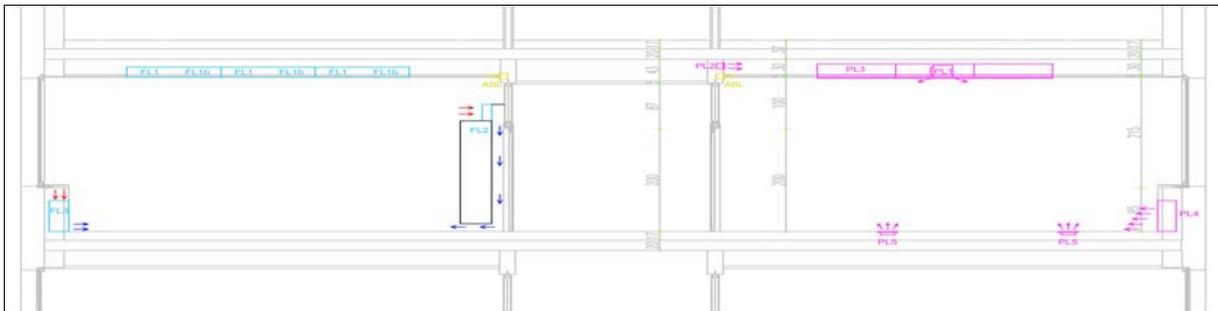
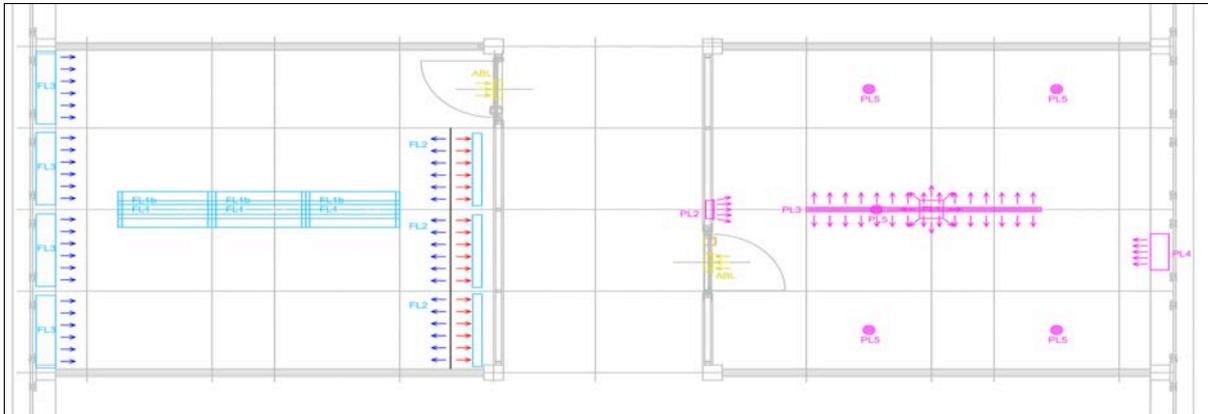
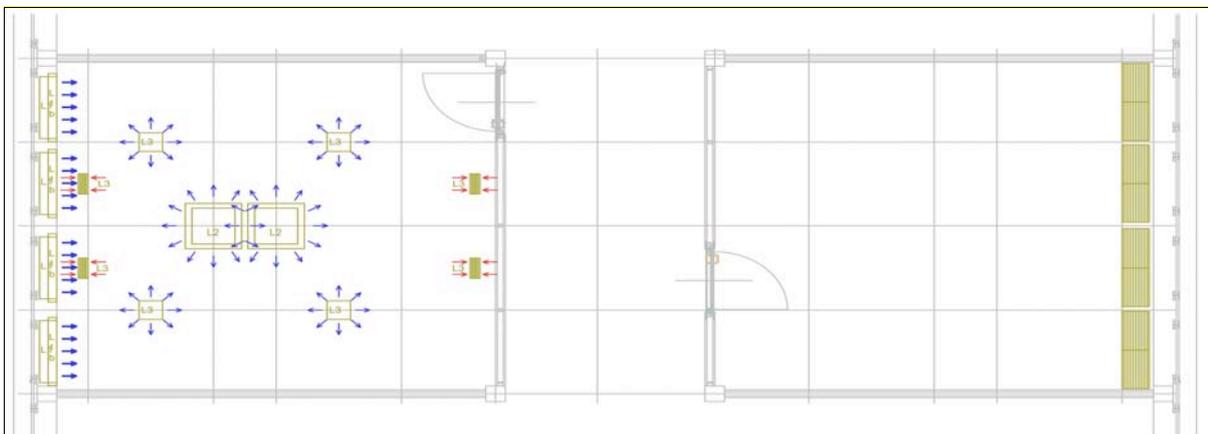


Abbildung 12: Modellraum mit haustechnischen Ausstattungsvarianten. Situierung der Systeme ABL: Abluft, FL1 Kühlbalken (Induktionsgerät), FL1b: wie FL1 mit Licht, FL2: Gravivent (passiver Kühlbalken mit Schacht), FL3: Umluftkühler mit Nachtkältenutzung (Phase Change Material), PL2: Lüftungsgitter mit Mengeneinstellsatz, PL3: Schlitzauslass, PL4: Quellluftauslass, PL5: Bodendrallluftauslässe. Quelle: newenergyconsulting



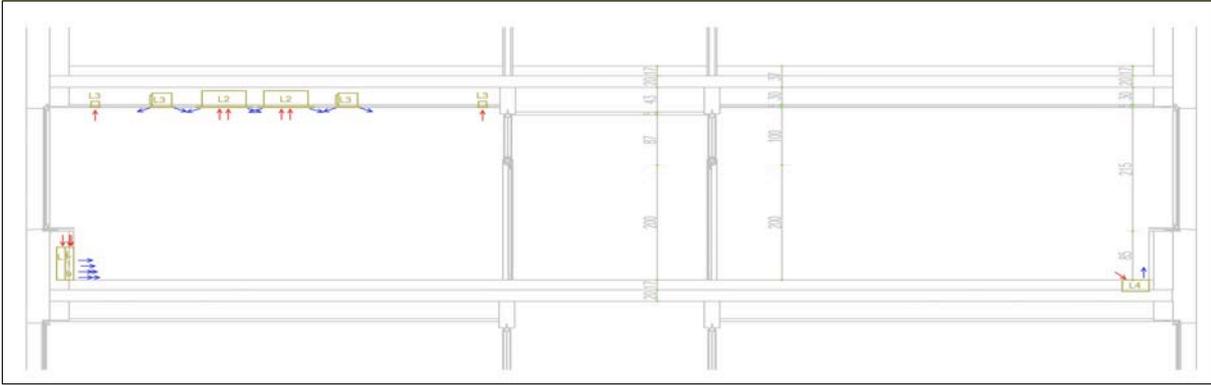


Abbildung 13: Modellraum mit haustechnischen Ausstattungsvarianten. Situierung der Systeme L1: Ventilator Kollektoren (Brüstungsgeräte), L1b: Ventilator Kollektoren (Komforbrüstungsgerät), L2: Deckenfancoil, L3: Deckeneinbaugerät mit Drallauslässen, L4: Unterflurkollektor Quelle: newenergyconsulting

Alle simulierten haustechnischen Ausstattungsvarianten sind Kombinationen folgender Elemente.

### Primärlufteinbringungen

(PL1: Drallauslass)

PL2: Lüftungsgitter

(PL3: Schlitzauslass)

PL4: Quellluftdurchlässe

PL5: Drallauslässe – Fußbodendurchlässe

### Strahlungssysteme

(F1a: Kühldecke mit Kupfermäander (Hochleistungskühldecke))

(F1b: Kühldecke mit Kupfermäander (Metallkassettendecke))

(F1c: Kühldecke mit Kupferl und Alupanelen (Gipskartonkühldecke))

F1d: Kühldecke mit PP-Kapillarrohrmatten (Putzkühldecken)

F2a: Betonkernaktivierung

(F2b: Betonkernaktivierung mit Zuluft)

(F2c: Betonoberflächenaktivierung)

F3: Kühlsegel, Heizsegel

(F4A: Fußbodenkühlung, -heizung (Nassestrich))

F5a: Fußbodenkühlung, -heizung (Trockenestrich))

### Misch- und Sondersysteme

FL1: Induktionskühl- und -heizgerät (Kühl-, Heizbalken)

(FL1: Induktionskühl- und -heizgerät mit Licht (Kühl-, Heizbalken))

(FL2: Gravivent (passiver Kühlbalken mit Schacht))

(FL3: Umluftkühler mit Nachtkältenutzung (Phase Change Material))

## Luftsysteme

L1A: Ventilatorkonvektoren (Brüstungsgerät)

L1B: Ventilatorkonvektoren (Komfortbrüstungsgerät)

L2: Deckenfancoil

L3: Deckeneinbaugerät mit Drallauslässen

(L4: Unterflurkonvektor)

(L5: System Bauer (Überdruck 2–3 Pa, Luft über Drallauslässe)

(Systeme in Klammern und kursiv: noch nicht in Simulationen verwendet)

Die Elemente werden im Folgenden näher vorgestellt:

### 2.5.1. PL2: Lüftungsgitter

„Lüftungsgitter sowie Gitterbänder sind als Luftdurchlässe zur Belüftung (Zuluft) und Entlüftung (Abluft) von Räumen und Gebäuden einsetzbar. Sie sind geeignet für Wand-, Fußboden-, Tür-, Kanal- und Rohreinbau. Der Einbau kann direkt im Kanal- oder Rohrausschnitt sowie wahlweise mit Einbaurahmen, z. B. in Mauerwerken erfolgen“ (Trox-Technik, [www.trox.de](http://www.trox.de), Lüftungsgitter Gitterbänder für Wand-, Fußboden-, Tür-, Kanal- und Rohreinbau).

Ausschreibungstext für das Produkt, das für die Simulationen angenommen wurde:

„Lüftungsgitter, einsetzbar für Zu- oder Abluft, vorzugsweise für Wand-, Brüstungs- und Kanaleinbau geeignet, bestehend aus dem umlaufenden Frontrahmen (Rahmenteile auf Gehrung geschnitten, fugenlos miteinander verbunden) mit umlaufender Dichtung sowie den Frontlamellen.“



### 2.5.2. PL4: Quellluftdurchlässe

„Im Gegensatz zum bekannten Prinzip der Mischströmung über Decken- oder Wanddurchlässe gewährleisten Quellluftdurchlässe eine turbulenzarme Einbringung der Zuluft. Die Austrittsgeschwindigkeit liegt sehr niedrig. Während man bei der Mischströmung bestrebt ist, eine möglichst hohe Induktion zu erreichen (Beimischen von Raumluft in den Zuluftstrahl), gilt es beim Prinzip der Quelllüftung eine möglichst induktionsarme Strömung zu erzielen.“

Je nach Aktivitätsgrad der Personen im Aufenthaltsbereich, kann die Zuluft mit einer Temperaturdifferenz von -1 bis -6 K eingeblasen werden. Hierbei breitet sich die Zuluft am Boden aus und wird durch Konvektionsströmung von Wärmequellen (Maschinen, elektrischen Geräten, Personen etc.) nach oben gefördert. Die Zuluft findet somit zwangsläufig den Weg zur Wärmequelle, deren thermische Last abzuführen ist. Handelt es sich um Personen, ist gleichzeitig dadurch die Frischluftversorgung gewährleistet.

Beim Prinzip der Quelllüftung sollten die Abluftdurchlässe im oberen Raumbereich angeordnet sein. Durch gleichmäßige Verteilung von Quellluftdurchlässen können selbst große Hallen (Auditorien, Industriehallen etc.) zugfrei und in ökonomischer Betriebsweise klimatisiert werden“ (Trox-Technik, [www.trox.de](http://www.trox.de), Quellluftdurchlässe Serien QLE · QLF).

Ausschreibungstext für das Produkt, das für die Simulationen angenommen wurde:

Quellluftdurchlässe der Serien QLE und QLF bestehen aus einem Gehäuse mit Lochblech-Frontplatte (bei 1-seitiger Ausblasrichtung) bzw. zusätzlichen Lochblech-Seitenplatten (bei 3-seitiger Ausblasrichtung), dem rechteckigen Luftanschlussstutzen, wahlweise oben oder unten angeordnet, und dem eingesetzten Lochblechkorb zur gleichmäßigen Luftverteilung.

Material: Gehäuse, Lochblech-Front und Lochblechkorb bestehen aus verzinktem Stahlblech. Das Gehäuse und die Lochbleche werden vorbehandelt und im Farbton reinweiß (RAL 9010, Glanzeinheit 50 %) pulverbeschichtet, wahlweise Pulverbeschichtung entsprechend der RAL-Farbskala. Die Gehäuserückwand und der innenliegende Lochblechkorb sind im Farbton schwarz (RAL 9005) beschichtet.

### **2.5.3. PL5: Drallauslässe – Fußbodendurchlässe**

„Die Einbringung von Zuluft durch Doppelbodensysteme wird vorzugsweise dort vorgenommen, wo in den Aufenthaltsbereichen vorhandene Konvektionsströmungen unterstützt werden sollen. Konvektions- oder Auftriebsströmungen können durch Personen, Maschinen oder elektrische Geräte entstehen. Bei Einsatz von Computern und anderen elektronischen Geräten in den Büros wird die Luftführung von unten nach oben zunehmend bevorzugt. Örtliche thermische Lasten werden bei diesem Prinzip gezielt abgeführt. Änderung der Luftstrahlrichtung – von vertikal nach horizontal oder umgekehrt – wird voreingestellt oder kann leicht durch Verdrehen des Verstellflügels vor Ort vorgenommen werden. Fußbodendurchlässe werden dort angeordnet, wo kein Daueraufenthaltsbereich für Personen ist. Bereits im Abstand von 40 cm zu Sitzplätzen können sie eingesetzt werden.

Fußbodendurchlässe sind akustisch unproblematisch. Bei Umgruppierungen von Arbeitsplätzen können Bodenplatten mit integrierten Durchlässen ohne großen Aufwand ausgetauscht werden.“ (Trox-Technik, [www.trox.de](http://www.trox.de), Fußbodendurchlässe Serie FB).

Ausschreibungstext für das Produkt, das für die Simulationen angenommen wurde:

Fußbodendurchlässe geeignet zum Einbau in Doppelböden. Durch drallförmige Ausblasung wird eine Anpassung an kritische Betriebsverhältnisse gewährleistet. Somit wird eine hohe Induktion erzeugt, wodurch die Luftaustrittsgeschwindigkeit und die Lufttemperaturdifferenz schnell abgebaut wird. Das Fußbodengitter hat eine große Anzahl von schräg angeordneten Querrippen zur Erzeugung der drallförmigen Ausblasung. Zur Änderung der Luftstrahlrichtung wird der Verstellflügel verdreht, so dass wahlweise ein vertikaler oder horizontaler Luftaustritt möglich ist. Für die Luftstrahlrichtung vertikal/horizontal (V,H) und vertikal-fest (VF) werden unterschiedliche Verstellflügel eingesetzt. Der Klemmflansch wird zum Einbau in Teppichböden verwendet, um ein Ausfransen der Stoßkanten zu verhindern. Je nach Raumbeschaffenheit bzw. Raumnutzung können Schmutzfangkörbe und Anschlusskästen eingesetzt werden. Bei Ausführung mit Schmutzfangkorb kann eine Mengenregulierung wahlweise durch eine frontseitige- bzw. rückseitige Verstellung erfolgen.“ Material: Aluminium oder Polyamid.

### **2.5.4. F1D: Putzkühldecken**

„Direkt unter der Rohdecke bzw. Gipskartondecke befestigte PP-Kapillarrohrmatten werden mit einer dünnen Putzschicht bzw. mit Akustikputz überzogen“ (climaMineral Integrale Climasyteme).

### **2.5.5. F2A: Betonkernaktivierung**

„Betondecken können zum Kühlen bzw. Wärmen von mehrgeschossigen Gebäuden genutzt werden. Dies ... führt zu thermisch aktiven Decken mittels wasserdurchflossener Register in Modulbauweise. Die Module werden zusammen mit der bauseitigen Bewehrung in die Betondecke eingelegt. Die Betonkernaktivierung empfiehlt sich für Gebäude mit kleinen bis mittleren Kühllasten, um einer Aufheizung im Sommer entgegenzuwirken. In Gebäuden mit mittleren bis größeren Kühllasten kann die Betonkernaktivierung zur Deckung der Grundlasten dienen. So tritt die Betonkernaktivierung zunehmend als Alternative zu RLT-Anlagen zum Heizen/Kühlen oder zu Kühldecken auf. Sie ermöglicht eine Reduzierung des Luftwechsels auf den noch notwendigen hygienischen Wert (1- bis 2-fach)“ (Aus: Uponor Haustechnik Technischer Gesamtkatalog 04/2009, S. 177).

### **2.5.6. F3: Kühlsegel, Heizsegel**

„Die Deckenkühlelemente der Serie WK-D-WF sind zur offenen Verlegung oder in Verbindung mit offenen Rasterdecken als Konvektionskühldecke einsetzbar. Der Konvektionsanteil beträgt ca. 70% und der Strahlungsanteil ca. 30 %. Aufgrund des hohen Konvektionsanteils können sehr hohe innere Wärmelasten abgeführt werden, wobei die energetischen Vorzüge der Lastabführung durch das Medium Wasser hierbei besonders zur Geltung kommen. Bei zusätzlich untergehangenen offenen Rasterdecken sollte der effektive freie Querschnitt möglichst groß sein, um die hohe Effizienz der Konvektionskühldecke beizubehalten. In Abhängigkeit von den maximal gewünschten Druckverlusten und den baulichen Gegebenheiten werden entsprechend große Kühlelemente erstellt bzw. zu entsprechenden Gruppen zusammengefügt. Für die Verbindung der einzelnen Kühlelemente untereinander bzw. zur Anbindung dieser an das Rohrsystem, können wahlweise starre Verrohrungen (löten), sowie flexible Schlauchverbindungen vorgesehen werden. Die Kaltwasser-Vorlauftemperatur ist wie bei allen Kühldecken so zu wählen, dass eine Taupunktunterschreitung verhindert wird.

#### **Ausführung**

Das Kühlelement Typ WK-D-WF besteht aus wellenförmig ausgebildeten Profillamellen mit einer Breite von 170 mm. Der Abstand der Profillamellen zueinander beträgt in der Standardausführung 30 mm, woraus sich ein Teilungsmaß von 200 mm ergibt. Die Kupfermäander werden in die Profillamellen eingepresst, wodurch ein optimaler wärmeleitender Kontakt zwischen dem Profil und dem Kupferrohr gewährleistet wird. Die Kühlelemente werden bauseits an der Rohdecke abgehängt. Hierfür sind an den Kühlelementen entsprechende Profile vorhanden. Die Profile zur Abhängung dienen gleichzeitig zur Abdeckung der überstehenden Mäander, sodass von unten keine Kupferrohrmäanderbögen erkennbar sind, und eine symmetrische Optik erzielt wird. Die Kühlelemente können sowohl als geschlossene Paneeldecke, als auch als frei abgehängene Kühlsegel eingesetzt werden. Eine gestalterische Kombination in Bandrasterdecken und Gipskartondecken ist möglich. Die Abhängung der Kühlelemente zur Rohdecke kann mittels Gewindestangen oder Nonius-Abhängern sowie mit entsprechend geeigneten Unterkonstruktionssystemen erfolgen.“ (Trox-Technik, [www.trox.de](http://www.trox.de), Deckenkühlelemente Serie WK-D-WF)

## Ausschreibungstext

Deckenkühlelemente Serie WK-D-WF sind geeignet zur sichtbaren Montage unterhalb von Rohdecken oder in Verbindung mit offenen Unterdecken, sowie zur Integration in Metall- oder Gipskartondecken. Die inneren Lasten werden zu ca. 70 % über Konvektion und zu ca. 30 % über Strahlung abgeführt. Die Kühlelemente bestehen aus horizontal angeordneten Profillamellen, die in einer Teilung von 200 mm angeordnet sind und über entsprechende Montage-/Abdeckwinkel zu Feldern zusammengefügt werden. In den Profilen sind durchgängig mäanderförmig gebogene Kupferrohre eingepresst. Die Anschlüsse dieser Mäander können wahlweise für Lötverbindungen (Innendurchmesser 12 mm) oder für die schnelle Verbindung mit flexiblen Schläuchen (Außendurchmesser 12 mm) genutzt werden.

### 2.5.7. F5A: Fußbodenkühlung, -heizung

Bei der Fußbodenkühlung unterscheidet man zwischen Trockensystemen und Naßsystemen. Bei Naßsystemen werden die Rohre auf dem Wärmeschutz über dem Rohbeton verlegt und mit Estrich vergossen. Bei Trockensystemen werden die Rohre in Systemplatten verlegt, die meist auch die untere Wärmedämmung bilden. Darauf kommen anschließend Trockenestrichplatten. (Quelle: baumarkt.de)

### 2.5.8. FL1: Induktionskühl- und -heizgerät (Kühl-, Heizbalken)

„TROX Deckeninduktionsdurchlässe der Serie DID300B werden in Luft-Wasser-Klimasystemen eingesetzt. Sie verbinden die strömungstechnischen Eigenschaften von Deckenluftdurchlässen mit den energetischen Vorzügen der Lastabfuhr (Heizen/Kühlen) durch das Medium Wasser. Der zur Außenluftversorgung erforderliche Primärluftvolumenstrom wird durch einen Zuluftstutzen in die obere Gehäusekammer geführt und über ein Düsenblech ausgeblasen. Die Sekundärluft wird aus dem Raum angesaugt und über einen Wärmeaustauscher geführt. In der Mischzone des DID300B wird die Sekundärluft mit der Primärluft vermischt und über Ausblassechlitze dem Raum zugeführt.



Der DID300B kann zur Kühlung und/oder zur Heizung eingesetzt werden. Zur Absaugung von Abluft kann ein zusätzlicher Anschlussstutzen neben der Gehäusekammer für die Primärluft angeordnet sein (Zu- und Abluft-Ausführung).“ (Trox-Technik, [www.trox.de](http://www.trox.de), Deckeninduktionsdurchlässe Serie DID300B)

Ausschreibungstext für das Produkt, das für die Simulationen angenommen wurde:

Deckeninduktionsdurchlässe der Serie DID300B, geeignet zur Abfuhr von hohen inneren Raumlasten mit Wasser und Luft, bestehend aus dem Gehäuseoberteil, welches als Primärluftkanal dient, dem Düsenblech mit verschiedenen freien Querschnitten, zweiseitig an den Längsseiten angeordnet. Unter der Haube (Gehäuseoberteil) bzw. Düsenblech ist ein Wärmeaustauscher angeordnet. Das Induktionsgitter unterhalb des Wärmeaustauschers ist als Lochblechgitter ausgeführt. Der Wärmeaustauscher kann wahlweise für Kühl- oder Heizbetrieb als 2-Leiter-System bzw. für Kühl- und Heizbetrieb als 4-Leiter-System ausgeführt werden. Die blanken Anschlussrohren haben einen Außendurchmesser von 12 mm.

Zur Absaugung von Abluft kann ein zusätzlicher Anschlussstutzen neben der Gehäusekammer für die Primärluft angeordnet sein (Zu- und Abluft-Ausführung). Primär- und Induktionsluft werden im Gerät

vermischt und über zwei Ausblassechlitze, bestehend aus dem Außenrahmen und den Innenprofilen, mit Coanda-Effekt horizontal ausgeblasen.

### **2.5.9. L1A: Ventilator-konvektoren**

Angenommen wurde ein Yardi Brüstungskonvektor.

### **2.5.10. L1B: Komfortbrüstungsgeräte**

„Grundsätzlich kann der Brüstungskühlkonvektor sowohl für die Aufgabe „Kühlen“ als auch für die Aufgabe „Heizen“ eingesetzt werden.

Im Kühlfall wird der Rippenrohrwärmetauscher mit Kaltwasser durchströmt, wobei die Vorlauftemperatur einen Wert von 16 °C nicht unterschreiten sollte. Damit ist gesichert, dass in der Regel die Taupunkttemperatur nicht unterschritten wird. Sollte sie dennoch unterschritten werden, so wird die Raumluft entfeuchtet. In diesem Falle ist für einen ausreichenden Abfluss des Kondensates zu sorgen. In jedem Falle kühlt sich die Raumluft an den kälteren Lamellen ab und strömt infolge der größeren Dichte (freie Konvektion) zunächst nach unten und dann über die Perforierung quellluftartig in den Raum. Da die Differenz zwischen Raumlufttemperatur und mittlerer Oberflächentemperatur des Rippenrohrwärmetauschers bei max. 10 K liegen wird, bleiben die Kühlleistungen in freier Konvektion begrenzt. Eine deutliche Erhöhung wird über eine Zwangskonvektion mit Hilfe des eingebauten Querstromventilators erreicht. Auch in diesem Falle ist gesichert, dass die gekühlte Luft noch quellluftartig dem Raum zuströmt.

Im Heizfall wird der Rippenrohrwärmetauscher mit Warmwasser durchströmt. Dabei läuft der Vorgang umgekehrt ab, die Raumluft erwärmt sich an den Lamellen und steigt nach oben. Da im Heizfall in der Regel größere Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft und Tauscheroberfläche als im Kühlfall vorhanden sind, können üblicherweise bereits in freier Konvektion Wärmeleistungen erreicht werden, die vom Betrage her über den Kühlleistungen bei Zwangskonvektion liegen.“ (emcotherm BKQ. Brüstungskühlkonvektor Typ BKQ für Sekundärluftbetrieb zum Kühlen und Heizen)

### **2.5.11. L2: Deckenfancoil**

Das Gerät „wird normalerweise über Zwischendecken installiert und gestattet Luftausblas in zwei, drei oder vier Richtungen. Die Geräte halten genaue Temperatur- und Feuchtebedingungen aufrecht und verhindern so Zugluft und Zonen mit abgestandener Luft. Da die Geräte Anschlußmöglichkeit für Frischluftkanäle haben, kann auch Zigarettenrauch aus der Luft entfernt werden.

Die Geräte sind mit Kühlleistungen von 2–11 kW und Heizleistungen von 4–14 kW erhältlich. Sie können von einem Flüssigkeitskühler, einer Wärmepumpe oder einem Kessel versorgt werden.“ (Hydronik-Kassettengeräte, Carrier, Villasanta, Italien)



### **2.5.12. L3: Deckeneinbaugerät mit Drallauslässen**

Angenommen wurde ein YardiEV COP mit Saug- und Druckplenum mit runden Ausblasen.

## 2.6. Methodik Tageslichtsimulationen

von Andreas Lahme, Alware

### 2.6.1. Modellbildung und Berechnung

Für die Studie wird ein parametrisierbares 3D-Modell des Büroraumes für die Lichtsimulation aufgebaut.

Für jeden Simulationslauf wird jeweils ein Parameter den Vorgaben entsprechend verändert.

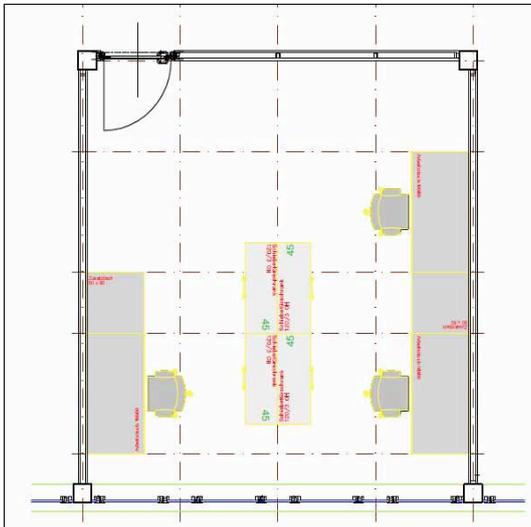


Abbildung 14: Grundriss des Modellbüroraums

Ort: Wien

Nutzung: Gruppenbüro

Orientierung: Süd (Südfassade)

Fassade: Lichtband, ohne Sturz

Wichtige Maße:

Raumtiefe 5,60 m

Raumbreite 5,40 m

Lichte Raumhöhe 3,00 m

Vorgehen, Aufgabe, Anforderung und Ziel:

Der zugrunde liegende Modellbüroraum wird in seinen Parametern und Randbedingungen festgelegt.

Tageslicht und künstliche Beleuchtung sollen die Anforderung von 500 Lux erfüllen.

Vorgehensweise:

Aus den lichttechnisch wirkenden Oberflächen wird ein 3D-Modell für den Büroraum mit Berücksichtigung der Möblierung aufgebaut. Den Oberflächen werden die optischen Eigenschaften für den Reflexionsgrad und Transmissionsgrad zugewiesen.

Durch die Tageslichtsimulation können die Lichtverteilung im Raum berechnet und daraus optische Kenngrößen (Tageslichtquotienten, Leuchtdichten) als auch energetische Kenngrößen (Tageslichtnutzung) abgeleitet werden.

Eingabe: Lichttechnische Eigenschaften (Basis-Modell )

Das Simulationsmodell wird den Vorgaben entsprechend aufgebaut.

Reflexionsgrade:

- Fußboden (innen) = 20 % (blau)
- Wand (innen) = 50 %
- Decke (innen) = 80 %
- Schrank = 27 % (braun)
- Tisch = 27 % (braun)
- Tür (innen) = 27 % (braun)
- Fensterrahmen = 35 %

Lichttransmissionsgrade:

- Verglasung (Fenster) = 60 % (70 % x Verschmutzungsfaktor 0,85)

Eingabe: Abweichungen von den Vorgaben und Anmerkungen

Abweichend von den Vorgaben werden folgende Änderungen bei der Eingabe bzw. Bearbeitung vorgenommen:

Möblierung: Die Höhe des Aktenschrankes<sup>2</sup> ist von 3 OH auf 2 OH reduziert worden, um unterhalb der Auswertungsebene für die Tageslichtquotienten (85 cm Raumhöhe) zu liegen. Würde sich das Möbelstück innerhalb der Auswertungsebene befinden, wäre keine korrekte Analyse des Tageslichtquotientenverlaufs möglich.

Parameter-Studie „Orientierung des Raumes“<sup>3</sup>: Diese Studie wird nur bei Besonnung durchgeführt. Bei bedecktem Himmel ist das Ergebnis für die Tageslichtversorgung für jede beliebige Orientierung der Fassade identisch (rotationssymmetrischer Himmelsmodell).

Anmerkungen: Für den bedeckten Himmel wird der Zeitpunkt am 21. März um 10:30 Uhr stellvertretend für einen mittleren Tag im Jahr simuliert.

## Simulationsmodell (Basis-Modell)

Die folgenden Abbildungen dokumentieren auszugsweise das Simulationsmodell.



Abbildung 15: Blick vom Standpunkt 1 zur Fassade stehend



Abbildung 16: Schnittansicht von oben

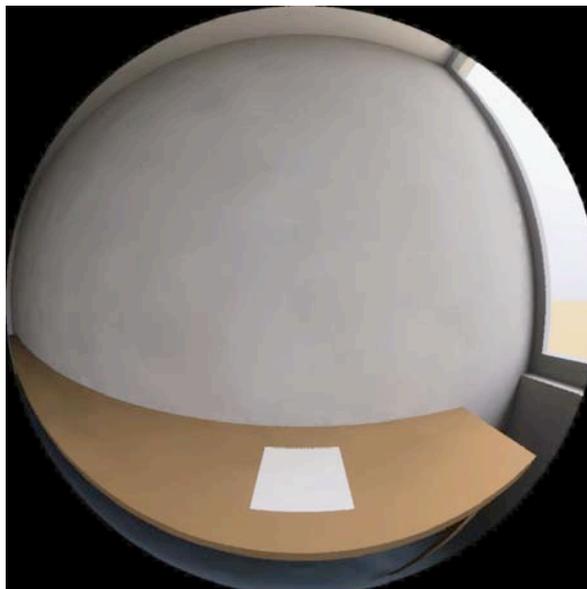


Abbildung 17: Blick am Arbeitsplatz rechts, sitzend  
(Fischaugen-Darstellung)

Rechenverfahren: Tageslichtsimulation

Die Simulation von Tageslicht im Gebäude wird über 3D Lighting<sup>7</sup> mit Rayfront (enthält die international anerkannte Rechensoftware Radiance<sup>8</sup>) durchgeführt.

Das Berechnungsverfahren der Lichtsimulation per Strahlverfolgung mit dem Rechenkern Radiance rechnet physikalisch korrekt.

Radiance dient zur Vorhersage der Verteilung sichtbarer Strahlung in beleuchteten Räumen. Als Eingabe wird ein dreidimensionales Geometrie-Modell verwendet. Als Ausgabe wird eine Karte mit spektralen

<sup>7</sup> [www.alware.de](http://www.alware.de)

<sup>8</sup> <http://radsite.lbl.gov/>

Strahlungswerten in einem farbigen Bild erzeugt. Dabei wird die Ray-Tracing-Methode (Strahlverfolgung) verwendet, womit diffuse und spektral reflektierende Oberflächen simuliert werden können.

Radiance generiert realitätsnahe Bilder: Aus 3D-Beschreibung und gewählter Blickrichtung wird ein zweidimensionales Leuchtdichten-Bild (z.B. auch als Iso-Linien- und Falschfarben-Darstellung) erzeugt. Auch Beleuchtungsstärke und Tageslichtquotienten auf einer Fläche können berechnet und als Bild dargestellt werden. Außerdem kann für jeden beliebigen Punkt die Beleuchtungsstärke bestimmt werden.

## 2.6.2. Bewertungskriterien

Für diese Untersuchung werden die Büror.ume nach den Kriterien für ausreichendes Tageslicht aus der DIN 5034 bewertet.

Zur weiteren Information sind darüber hinaus hier auch weitere Bewertungskriterien für ausreichendes Tageslicht laut Arbeitsstättenverordnung, Arbeitsstättenrichtlinien und berufsgenossenschaftlichen Richtlinien wiedergegeben.

Bewertungskriterien nach DIN 5034 Teil 4

Die DIN 5034-4 (Tageslicht in Innenräumen)<sup>9</sup> gibt folgende Kriterien für eine ausreichende Tageslichtversorgung an:

- Der Tageslichtquotient an den Referenzpunkten P1 und P2 (in halber Raumtiefe jeweils 1,00 m Abstand von der Seitenwand) ist mindestens 0,75 % und
- der Mittelwert der Tageslichtquotienten beträgt mindestens 0,90 %.

Bewertungskriterien nach ArbStättV, ASR und BGR

Die Regelwerke für Tageslicht in Arbeitsstätten

- Arbeitsstättenverordnung ArbStättV<sup>10</sup> [1]
- Arbeitsstättenrichtlinien ASR 7.1<sup>11</sup> [2]
- Arbeitsstättenrichtlinien ASR A 3.4<sup>12</sup> [3]
- berufsgenossenschaftliche Richtlinien BGR-131-1<sup>13</sup> [4]

---

<sup>9</sup> DIN 5034-4 Tageslicht in Innenräumen

<sup>10</sup> ArbStättV Arbeitsstättenverordnung

<sup>11</sup> ASR 7/1 Arbeitsstättenrichtlinie

<sup>12</sup> interne Dokumentation zum Entwurf der neuen Arbeitsstättenrichtlinie ASR A 3.4, Stand Juli 2009 . Diese wurde inzwischen ersetzt durch: Technische Regel für Arbeitsstätten ASR A3.4 – Neues Bewertungskriterium für Beleuchtung mit Tageslicht. Beleuchtung - Ausgabe: April 2011 (GMBI. 2011, S. 303 [Nr. 16]) - Gemäß § 8 Abs. 2 Arbeitsstättenverordnung gelten mit Bekanntmachung der neuen Technischen Regel für Arbeitsstätten ASR A3.4 "Beleuchtung" die alten Arbeitsstätten-Richtlinien ASR 7/3 Künstliche Beleuchtung und ASR 41/3 Künstliche Beleuchtung für Arbeitsplätze und Verkehrswege im Freien nicht weiter fort.

Die ASR A3.4 legt in Kapitel 4.1 Ausreichendes Tageslicht (Absatz 3) ein neues Bewertungskriterium fest: Die Anforderung nach ausreichendem Tageslicht wird erfüllt, wenn in Arbeitsräumen am Arbeitsplatz ein Tageslichtquotient größer als 2 %, bei Dachoberlichtern größer als 4 % erreicht wird.

Die alte Anforderung, dass der Tageslichtquotient in Raummitte größer als 2 % sein muss, ist damit aufgehoben.

<sup>13</sup> BGR-131-1 (BG-Regel „Natürliche und künstliche Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 1: Handlungshilfen für den Unternehmer“)

- berufsgenossenschaftliche Richtlinien BGR-131-2<sup>14</sup> [5]
- BGI/GUV-I 7007<sup>15</sup> [6]  
stellen folgende Anforderungen und Empfehlungen an die ausreichende Tageslichtversorgung:
- Gebot von Tageslichtbeleuchtung [1], [2], [3], [4], [5], [6]
- Sichtverbindung nach außen [2], [5], [6]
- Brüstungshöhe  $\leq 0,85$  m [2], [3], [6]
- Fenstermaße (durchsichtige Fläche): Breite  $\geq 1,00$  m, Höhe  $\geq 1,25$  m [2], [3], [6]
- Fensterfläche  $\geq 1,25$  m<sup>2</sup> (für Büros unter 5 m Raumtiefe) bzw.  $\geq 1,50$  m<sup>2</sup> (für Büros über 5 m Raumtiefe) [2]
- Gesamtfläche der Sichtverbindungen  $\geq 1/5$  der Raumgrundfläche [2], [3], [5], [6]
- Sturzhöhe: Unterkante über 2,20 m [2]
- Tageslichtquotient in Raummitte  $\geq 2\%$  („empfohlen“) [2], [6], bei Büros besser 3% („sinnvoll“) [6]
- Gebot von Blendschutz gegen Sonneneinstrahlung [2], [5], [6]
- Empfehlung tageslichtabhängiger Steuerung der Kunstlichtbeleuchtung [4], [5], [6]
- Empfehlung farbneutraler Verglasung [4], [5], [6]
- Empfehlung fensternaher Arbeitsplätze [2], [5], [6]

## 2.7. Verfahren zur Bewertung der Tageslichtnutzung

Auf Basis stündlicher Diffusstrahlungsdaten<sup>16</sup> wird die Tageslichtnutzung berechnet. Der alleinigen Verwendung der diffusen Einstrahlung zur Berechnung der Tageslicht-Autonomie liegt die Annahme zugrunde, dass ein geeignetes Verschattungssystem die direkte Einstrahlung gerade in diesem Maße reduzieren würde. Ein gutes Verschattungssystem könnte mit Sonne vielleicht mehr Tageslicht nutzen.



Abbildung 18: Begründung der Verwendung von Diffusstrahlungsdaten für die Untersuchung der Tageslichtnutzung.  
Quelle: alware

Die Umrechnung der stündlichen Diffusstrahlungsdaten (W) mittels der Lichtausbeute für natürliches Tageslicht:  $100 \text{ lm/W}$  bzw.  $1 \text{ W/m}^2 = 100 \text{ lx}$  ermöglicht die Zuordnung von Bestrahlungsstärken (lx) zu jedem Ort im Raum, dessen Tageslichtquotient aus der vorangegangenen Untersuchung bekannt ist.

<sup>14</sup> BGR-131-2 (Die BG-Regel „Natürliche und künstliche Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 2: Leitfaden zur Planung und zum Betrieb der Beleuchtung“)

<sup>15</sup> BGI/GUV-I 7007 Tageslicht am Arbeitsplatz

<sup>16</sup> Stündliche Wetterdaten nach ASHRAE für Wien

### 2.7.1. Nutzungsprofil

Diesem Potential an Tageslichtnutzung wird im nächsten Schritt ein angenommener Bedarf gegenübergestellt, der sich aus dem Büronutzungsprofil ergibt. Das Büronutzungsprofil gibt die Wahrscheinlichkeit für Anwesenheiten/Nutzungen der Räume im Tageslauf an. Bei Gruppenbüros und Großraumbüros sind diese Wahrscheinlichkeiten jeweils etwas höher, weil bereits bei nur einer anwesenden Person die künstliche Beleuchtung angeschaltet werden muss (falls die natürliche Belichtung zum betrachteten Zeitpunkt nicht ausreicht). Es werden 250 Arbeitstage im Jahr angenommen.

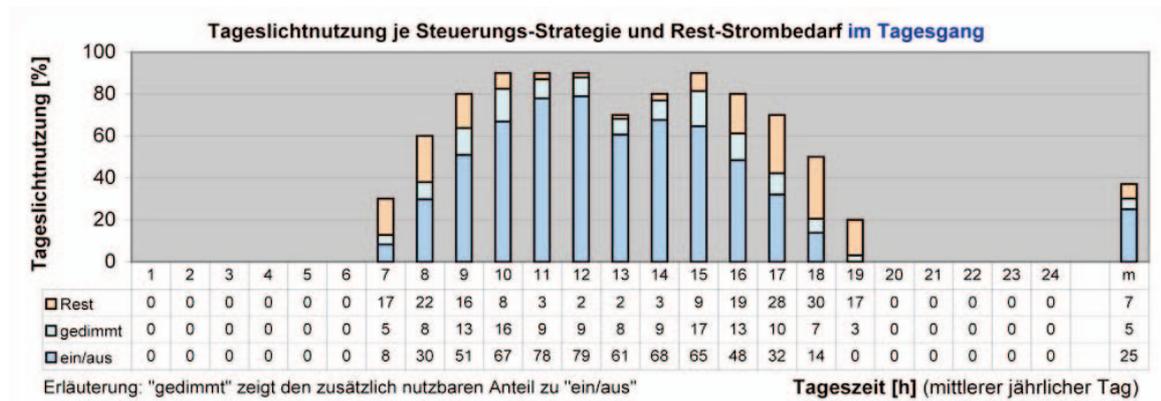


Abbildung 19: Nutzungsprofil des Modellbüros mit Häufigkeiten (%) der alleinigen Tageslichtnutzung (blau), der teilweisen künstlichen Beleuchtung durch gedimmtes Licht (hellblau) und der ausschließlich künstlichen Beleuchtung (gelb). Im Falle einer nicht dimmbaren Beleuchtungsanlage sind hellblauen Anteile der Säulen den gelben Anteilen zuzurechnen. Quelle ALWare

### 2.7.2. Beleuchtungsstärkeniveau und Installierte Leistung

Die zweite Anforderung für das Tageslichtangebot ist das erforderliche Beleuchtungsstärkeniveau für Büroarbeitsplätze (EN 12464:1) : 500 lx.

Für die natürliche Belichtung sind 300 lx ausreichend (DIN 5034), da das natürliche Licht die Wände und Decken besser belichtet als die künstliche Beleuchtung, die mehr auf die Arbeitsflächen fokussiert ist.

Die installierte Leistung für die künstliche Beleuchtung wird mit 15 W/m<sup>2</sup> angenommen. Für andere Annahmen (siehe thermische Simulationen) können die Ergebnisse der Tageslichtnutzung leicht umgerechnet werden.

### 2.7.3. Wie wird geschaltet?

Lichtsensoren werden in halber Raumtiefe angenommen. Die Sensoren schalten (in der Simulation) ein, wenn die Sollbeleuchtungsstärke für natürliches Licht 300 lx unterschritten wird. In der Praxis sollten die Nutzer manuell einschalten, was sie erfahrungsgemäß erst dann tun, wenn 200 lx unterschritten werden. Die Sensoren schalten im Ein/aus-Modus aus, wenn 800 lx überschritten werden, so dass 300 lx Tageslicht übrigbleiben. Im Dimm-Modus halten sie die Sollbeleuchtungsstärke für künstliche Beleuchtung (500 lx) aufrecht, bis der Anteil der künstlichen Beleuchtung unter 200 lx sinkt. Dann schalten sie aus, 300 lx natürliche Beleuchtung bleiben übrig.

## 2.7.4. Berechnung der Tageslichtnutzung

Der flächenbezogene jährliche Strombedarf für künstliche Beleuchtung ohne Tageslichtnutzung ergibt sich als Produkt der installierten Leistung ( $15 \text{ W/m}^2$ ) mal durchschnittliche tägliche Nutzungsdauer (37,5 %) mal Jahresnutzungsdauer (250 d) zu  $33,8 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ .

Dieser Jahresbedarf wird durch Tageslichtnutzung vermindert. Die Verminderung wird als verbleibender Prozentanteil des jährlichen Strombedarfs ohne Tageslichtnutzung angegeben.

Die Absolutwerte der Tageslichtnutzung sind vom gewählten Büronutzungsprofil abhängig. Ebenso Vergleiche mit demselben Büronutzungsprofil und Variation gebäudebezogener Größen wie Fensterposition und -größe.

Für den Tageslichtquotient kann, abhängig von der Steuerung des Kunstlichtes, die Tageslichtnutzung abgelesen werden:

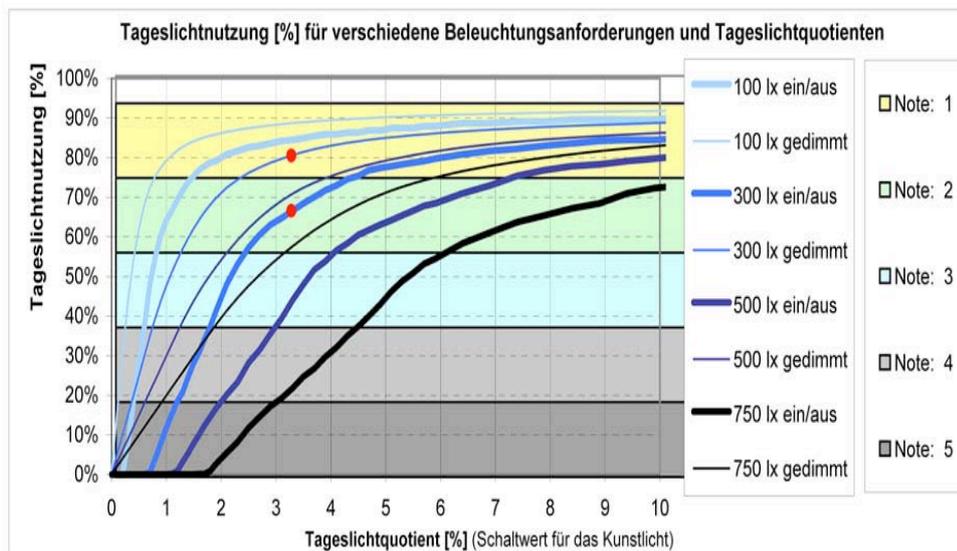


Abbildung 20: Tageslichtnutzungskurven in Abhängigkeit vom Tageslichtquotienten (TQ %) für verschiedene Sollbestrahlungsstärken (lx) für das verwendete Büronutzungsprofil.

Die Benotung bezieht sich auf die maximal mögliche Tageslichtnutzung, anders gesagt: Nur wenn Tageslicht angeboten wird kann man es nutzen. Damit ist die Note eine Bewertung der Architektur, die unabhängig vom Zeitprofil der Nutzung ist. Man kann der Architektur nicht anlasten, dass Nutzungszeiten in der Nacht liegen und dadurch die absolute Tageslichtnutzung ebenfalls gering ist.

Je höher die Anforderung an die Sollbeleuchtungsstärke oder je geringer der TQ, desto größer ist der Vorteil für eine Beleuchtungssteuerung mit Dimmung. Je geringer die Anforderung an Sollbeleuchtungsstärke oder je größer der TQ, desto geringer wird die zusätzliche Ersparnis durch gedimmte Beleuchtungssteuerung. Es kann dann eine Eine/Aus-Steuerung empfohlen werden, wenn die zusätzliche Ersparnis bei gedimmter Beleuchtungssteuerung bei  $< 15 \%$  liegt (Alware).

## 2.8. Methodik Besonnung und Beschattung

### 2.8.1. Lichtdaten

Die Besonnungsstudien wurden mit Ashrae Lichtdaten von Wien Schwechat durchgeführt [AUT\_Vienna.Schwechat.Ashrae\_IWEC.txt].

### 2.8.2. Darstellung der Leuchtdichte

Die Abbildungen der Simulationsergebnisse nehmen auf die Lichtempfindlichkeit des Auges Bezug. Hierzu folgender Vergleich:



Abbildung 21: Lichtsimulation des Modellraums: Blick zur Fassade (stehend). Beliebig belichtete Darstellung.

- Ergebnisbild der Leuchtdichte [1] aus der Lichtsimulation
- Mit einer ausreichend langen Belichtungszeit kann jedes Bild hell aussehen.
- Daher kann ein solches Bild nicht bewertet werden.

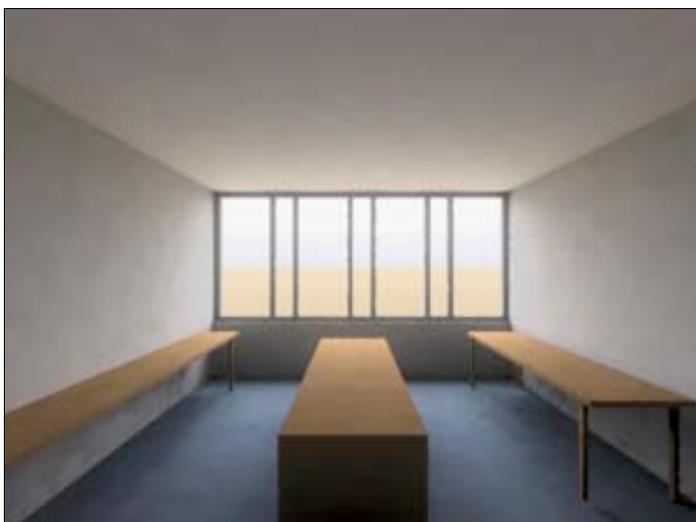


Abbildung 22: Dasselbe Bild in der Helligkeit, wie sie dem Auge erscheint.

- Zur Bewertung von Raumeindruck und Helligkeit werden die simulierten Leuchtdichtebilder analysiert.
- Bewertung der Lichtwahrnehmung der Helligkeit durch das menschliche Auge aus Sicht des Nutzers
- Aus dieser Analysedarstellung lassen sich Bereiche mit zu niedriger Leuchtdichte (schwarze Bereiche) und mit zu hoher (Schleier-)Leuchtdichte ablesen.

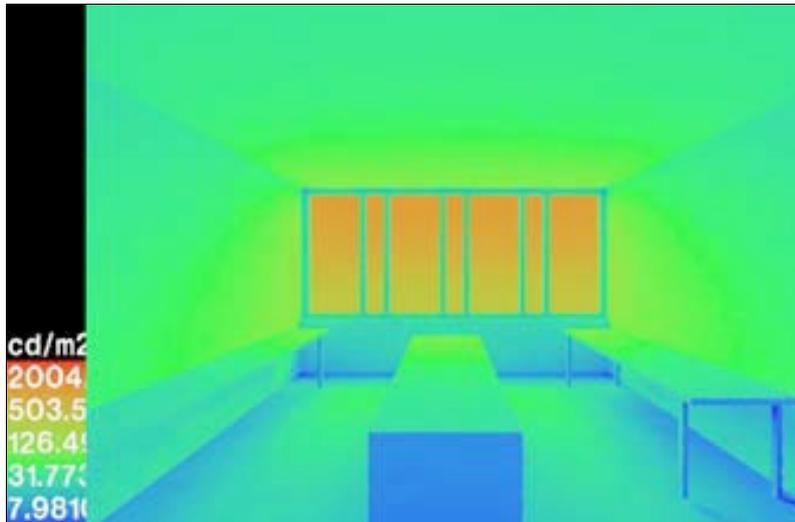


Abbildung 23: Dasselbe Bild als Leuchtdichte-Analyse in Falschfarben-Darstellung

### 2.8.3. Zielwerte

- Die logarithmische Skalierung der Leuchtdichte entspricht der Wahrnehmung des Auges.
- Gleiche Farbe bedeutet gleiche Wahrnehmung der Helligkeit.
- Zielwerte der Leuchtdichte<sup>17</sup>: Wand 150, Decke ~300, Umfeld max. 2 – 4000 cd

### 2.8.4. Beschattungssysteme

Rollos sind textile Flächen mit einer definierten Lichtdurchlässigkeit (TL in %), die innenseitig, zwischen den Scheiben oder außen montiert sein können. Als Innenrollos, die vor allem dem Blendschutz dienen, werden sie zweckmäßig von unten nach oben geschlossen (aufgezogen). Rollos verhindern den Sichtkontakt nach außen. Der Montageort außen oder innen ist sehr bedeutsam für den Wärmeeintrag in den Raum (siehe thermische Simulationen). Für die Lichteinfall ist er dagegen unerheblich.

Lamellen sind fixe oder bewegliche, horizontale oder vertikal ausgerichtete Gebilde aus Streifen, die aus Kunststoff oder Metall hergestellt und zur Versteifung, gleichzeitig aber auch zur besseren Lichtlenkung in Längsrichtung gebogen sind. Die Lamellen werden gut reflektierend ausgeführt. Durch Drehung um die

<sup>17</sup> Blendung durch natürliches Licht ist noch nicht normenmäßig erfasst. Die Formeln für Blendung durch künstliche Lichtquellen sind nicht anwendbar. Die angegebenen Werte sind Erfahrungswerte von ALware Andreas Lahme.

Längsachse lässt sich die direkte Strahlung ausblenden. Dennoch bleibt die Durchsicht auf den Himmel (diffuses Licht) und der Sichtkontakt mit der Umgebung erhalten. Wir haben ausschließlich bewegliche, wegfahrbare (nicht fixe) und horizontale Lamellen für die Simulationen herangezogen.

Markisen sind textile Flächen, die außen angebracht, wie Rollos (nach oben) wegfahrbar sind. Zusätzlich lassen sie sich unten bis zu Winkeln von fast 90 ° ausstellen und ermöglichen dann einen freien Ausblick auf einen größeren oder kleineren Ausschnitt der Umgebung. Der hinterlüftete Abstand zwischen Textil und Fensterfläche bietet einen noch besseren Wärmeschutz als ein außenliegendes Rollo.

Markisoletten sind eine Sonderform der Markise, bei der nur ein unterer Teil der Markise ausstellbar ist und der obere Teil dem Fenster parallel anliegt. Vorteil ist ein besserer Blendschutz.

<b>Bezeichnung</b>	<b>TL %</b>	<b>% Fensterfläche bedeckt</b>	<b>verwendet in Variante Nr.</b>	<b>Verwendet für Himmelsrichtung</b>
Rollo	70	voll	33	Norden
Rollo	10	rechts offen	23	
Rollo	70	50	34	
Lamellen 10°		voll	27	Süden
Markise	10	Ausstellwinkel	28	
Markisolette	15	Ausstellwinkel 30 °	29	
Markisolette	15	Ausstellwinkel 60 °	29	
Lamellen 10°, Wölbung oben		voll	30	
Lamellen 10°, Wölbung unten		voll	31	
Rollo	6	80 % geschlossen	36	Osten
Rollo	6	60 % geschlossen	37	
Lamellen 25°, Wölbung oben			38	
Lamellen 25°			24	Westen

*Tabelle 3: Liste der verwendeten Verschattungseinrichtungen*

## 2.9. Dynamische Strömungssimulation (CFD-Simulation).

Von Markus Rösler, Ralf Gritzki, TU Dresden

Diese Varianten wurden mit einer thermischen Simulationen und nachgeschalteten dynamischen CFD-Simulationen (CFD, computer fluid dynamics) untersucht.

### 2.9.1. Programmsystem

#### **Übersicht – Verfahren**

Das hier genutzte Programmpaket entstand als Forschungscode innerhalb der vergangenen 12 Jahre in gemeinschaftlicher Entwicklung verschiedener Institute der TU Dresden und der Universität Göttingen. Im Einzelnen handelt es sich um ein gekoppeltes System aus thermischer Gebäudesimulation und Strömungssimulation, mit dem die kombinierte Untersuchung thermischer und aerodynamischer Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit und Luftqualität in Räumen und Gebäuden möglich ist. Aufgrund des vollständigen Quelltextzugriffs und aufgrund des modularen Aufbaus, verbunden mit der offenen Kopplungsstrategie ergibt sich eine hervorragende Möglichkeit, das Paket optimal an die jeweils aktuell zu bearbeitenden Problemstellungen anzupassen.

Das Programmpaket ist inzwischen in zahlreichen Projekten eingesetzt und verifiziert worden. Detaillierte Angaben zu den einzelnen Programmkomponenten und zur Kopplung folgen in den nächsten Abschnitten.

#### **Das Strömungssimulationsprogramm ParalleINS**

Der im Rahmen dieses Projekts für die Strömungssimulation eingesetzte Forschungscode ParalleINS [1], [2] arbeitet auf Basis eines stabilisierten Finite Elemente Ansatzes (GLS-FEM) unter Nutzung linearer Tetraederelemente. Zur Untersuchung der hier relevanten Strömungsverhältnisse erfolgt die Lösung der instationären, inkompressiblen und nichtisothermen Impulstransportgleichung, der Energiegleichung und der Transportgleichung für das lokale Luftalter. Zusätzlich ist die Berechnung weiterer Transportgleichungen z.B. für die Simulation der CO<sub>2</sub>-Ausbreitung bzw. -Verteilung möglich.

Die Vorgabe beliebiger lokaler und globaler Wärme-, Feuchte- und Schadstoffquellen ist ebenso realisierbar, wie die Definition komplexer Eintritts- und Austrittsbedingungen. Somit ergibt sich eine sehr gute Möglichkeit der Berechnung komplizierter Strömungsverhältnisse, wie sie z.B. bei natürlicher Lüftung oder bei Berücksichtigung von Personen und technischen Anlagen auftreten.

Die Approximation der in dieser Strömungskategorie dominanten turbulenten Strömungsstrukturen erfolgt auf Basis eines statistischen Turbulenzmodells. In diesem Fall handelt es sich um ein  $k - \epsilon$  Turbulenzmodell mit spezieller Wandbehandlung. Konkret wurden die sonst üblichen Wandfunktionen durch eine iterative Grenzschichtberechnung ersetzt, die eine sehr gute und von der Vernetzung der wandnahen Bereiche weitgehend unabhängige Vorhersage des Wärmeübergangs an den Umfassungskonstruktionen ermöglicht.

Die Berechnungen können parallelisiert, also auf mehrere Teilgebiete und Prozessoren verteilt ausgeführt werden. Für die Parallelisierung kommt eine nichtüberlappende Gebietszerlegung zum Einsatz, deren Vorteile letztlich auch bei der Anbindung der thermischen Gebäudesimulation genutzt werden.

Zudem eignet sich das Programm hervorragend für die Untersuchungen beliebiger Zuluft- und Abluftkonzepte in Hinblick auf die Bewertung von Luftqualität und Luftalter. Hierzu wurde neben der Berücksichtigung der entsprechenden Transportgleichungen die Berechnung einer Vielzahl von Bewertungskriterien und Referenzgrößen implementiert, mit deren Hilfe man die berechneten Strömungen sehr gut beurteilen kann [1]. Beispielhaft sei als globale Größe der instationäre Luftaustauschwirkungsgrad  $\varepsilon_t^a$  oder als Feldgröße der lokale instationäre Luftaustauschindex  $\varepsilon_{p,t}^a$  zu nennen. Während das erstgenannte Kriterium Aussagen über den Anteil an Kurzschlusseffekten beim Luftaustausch des gesamten Raumes ermöglicht, stellt die zweite Größe eine mit dem mittleren Luftalter am Austritt normierte, lokale Altersverteilung der Raumluft dar. Sie ermöglicht somit Aussagen zur Qualität der Versorgung spezieller Bereiche, wie z.B. der Aufenthaltszone mit Frischluft. Weitere, ausführliche Informationen zu den kompletten zugrunde liegenden mathematischen Modellen befinden sich in [1] bis [4].

### **Das Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS-TUD**

Für die Kopplung mit der Umfassungskonstruktion und somit auch für die Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen kommt eine an der TU Dresden umfassend erweiterte Version des kommerziellen Gebäudesimulationsprogramms TRNSYS [5] zur Anwendung, siehe [6], [7]. Hierbei handelt es sich um ein Programm zur Gebäude- und Anlagensimulation, das (knotenmodellbasiert) thermische Simulationen über große Zeiträume (Jahresgänge) und in sehr komplexen Gebäuden ermöglicht. Die guten Voraussetzungen zur Erweiterung begründen sich im modularen Aufbau des Programmsystems und in den allgemein gültigen Nutzerschnittstellen.

Einige grundlegende Merkmale und Eigenschaften der an der TU Dresden entstandenen Version sind:

- Die Möglichkeit der Simulation des thermischen und anlagentechnischen Verhaltens komplexer Gebäude auf Basis eines *geometrischen Modells*, hierbei ist auch eine mehrfache Zonierung größerer Räume möglich
- Einbeziehung der Berechnung des räumlich hoch aufgelösten Strahlungswärmeaustauschs, Berücksichtigung direkter Solarstrahlung
- Möglichkeit der Einbeziehung der Gebäudedurch- und Umströmung, Nutzung verschiedener Ansätze zur Durchströmung großer Öffnungen
- Berechnung des instationären Feuchtetransports in Raumumschließungskonstruktionen und in Räumen unter Nutzung entsprechender Modelle
- Integrierte Simulation verschiedenster Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung, wie Heizkessel, Heizungsnetze, Regelungstechnik u.v.m.
- Räumlich hoch aufgelöste Berechnung der Temperatur- und Strömungsfelder sowie des lokalen Wärmeüberganges an den beteiligten Wandflächen durch wechselseitige Kopplung mit der Strömungssimulation

Das Programmsystem wird permanent weiterentwickelt und validiert und wurde ebenfalls bereits in einer Vielzahl von Projekten erfolgreich eingesetzt, siehe auch [8].

### **Details zur Kopplung**

Die Kopplung der Programme erfolgt, wie auch die Parallelisierung innerhalb der Strömungssimulation, über die Virtualisierungssoftware PVM [9]. Diese Software ermöglicht den Zusammenschluss beliebiger

einzelner Rechner zu einem virtuellen Mehrprozessorsystem, das sich den gesamten Speicher der Einzelsysteme teilt.

Das Verfahren an sich funktioniert gemäß Abbildung 22 über den wechselseitigen Austausch von Rand- und Anfangsbedingungen im Zeitbereich. Auf geometrischer Ebene erfolgt hierfür im Gebäudesimulationsprogramm eine Diskretisierung der einzelnen Teilflächen der Umfassungskonstruktion. Dieses so diskretisierte Modell ist die Grundlage für eine weitere Diskretisierung / Verfeinerung innerhalb der Strömungssimulation. Der Austausch der Randbedingungen erfolgt dann schließlich über entsprechend gebildete Mittelwerte dieser diskreten Teilflächen der Gebäudesimulation. Dabei werden üblicherweise von der Gebäudesimulation aus der energetischen Bilanz Oberflächentemperaturen ermittelt, die die Randbedingungen für den nächsten Zeitschritt der Strömungssimulation darstellen. Innerhalb der Strömungssimulation kommt es bis zum nächsten Kopplungszeitpunkt zur Bestimmung der resultierenden Wärmeströme. Diese wiederum bilden die Randbedingungen für den nächsten Zeitschritt innerhalb der Gebäudesimulation.

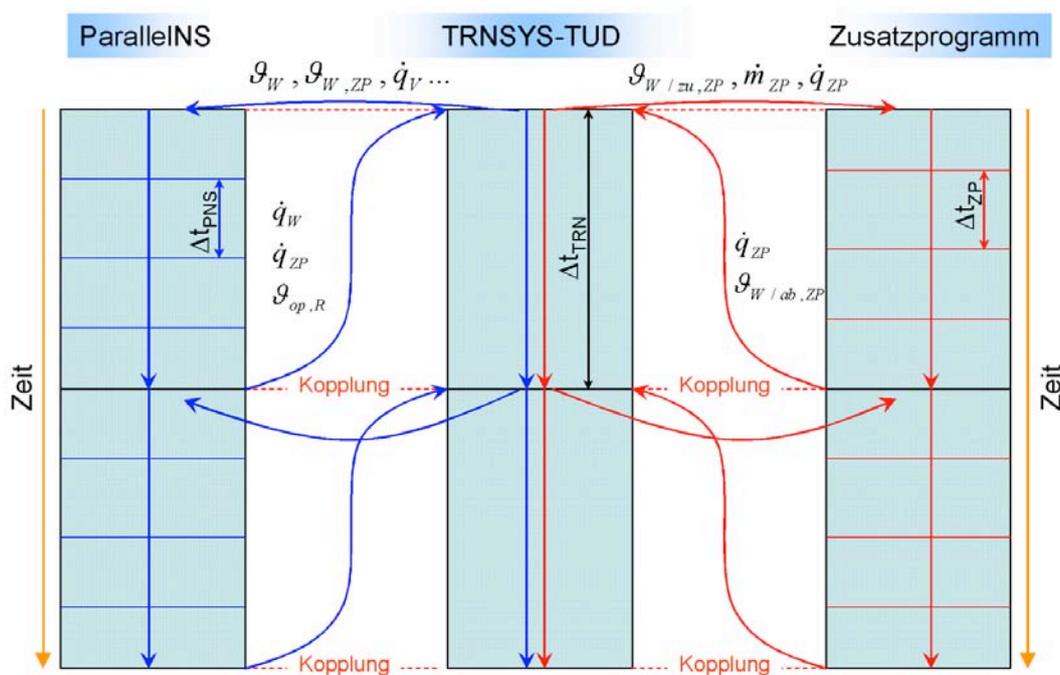


Abbildung 24: Abbildung 22: Zeitlicher Ablauf der Kopplung zwischen den einzelnen Programmkomponenten. Quelle TU Dresden

Neben diesen Größen erfolgt über das Austauschverfahren auch die komplette Kommunikation zwischen Raumluft und Gebäude / Anlagentechnik. Beispielhaft wären hier Temperatur- oder Behaglichkeitssensoren und innere Wärme- Feuchtequellen zu nennen. Einer der entscheidenden Vorteile ist, dass der Austausch sich komplett innerhalb der virtuellen Maschine also sehr schnell und effizient im Arbeitsspeicher über die Verteilung von Speicheradressen abspielt.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Kopplung um zusätzliche spezialisierte Programme zu erweitern. In der aktuellen Fassung existieren Anbindungen an ein weiteres hochkomplexes Strömungssimulationsprogramm zur Nachbildung vollständiger Heiz-Kühlkörper und an ein Programm zur Berechnung dreidimensionaler Wärmeleitung. Nähere Informationen sind unter anderem in [10] zu finden.

## 2.9.2. Zusammenstellung der Rand- und Berechnungsbedingungen

### **Simulation:**

- Vernetzung des Raumes tetraederbasiert, etwa 350 000 bis 450 000 Elemente, abhängig von der Lüftungssituation.
- Gitter mit Wandgrenzschichten
- Modellierung der strömungsrelevanten Hindernisse wie Personen, Tische und Schränke
- Berechnung einer 14tägigen Einschwingphase
- Start der gekoppelten Gebäude- und Strömungssimulation am 15.Tag (Montag) um 06:00 Uhr, bzw. 8:00 Uhr
- voll gekoppelte Berechnung bis 20:00 Uhr
- Instationäre Simulation von:
  - Geschwindigkeitsfeld
  - Temperaturverteilung
  - Luftalter
  - CO<sub>2</sub>-Verteilung.
  - Berechnung abgeleiteter Größen, wie PMV, Operativer Temperatur
- Ergebnisauswertung zu jeder vollen Stunde verfügbar, ausgewertet 10, 12, 14, 16 Uhr.

### **Gebäude:**

- Wandaufbauten entsprechend Vorgaben IBO Wien (siehe unten Thermische Gebäudesimulation)
- Fenster: Wärmeschutzverglasung entsprechend Vorgaben mit U-Wert von 0.6 W/m<sup>2</sup>/K
- Boden als Hohlraumboden oder Fußbodenheizung/Trockenestrich, Standard ist Hohlraumboden
- Verschattung: Intelligente Außenverschattung
  - 0 % direkte Solarstrahlung
  - 90 % diffuse Solarstrahlung

### **Zeitplanfunktionen/Nutzer:**

- Belegung/Nutzung werktags zwischen 08:00 Uhr und 18:00 Uhr,
- davon 08:00–08:30 und 17:30–18:00 halb, sonst voll belegt mit 3 Personen und 300 W Technik
- Beleuchtung zusätzlich 8 bzw. 15 W/m<sup>2</sup>
- Anlagenregelung startet 06:00 und endet um 20:00 Uhr, Betonkernaktivierung startet 0 Uhr
- Personen geometrisch als Strömungshindernis modelliert, sitzend, Oberfläche adiabatisch

### Energieabgabe:

Berechnung temperaturabhängig anhand Tabelle A1 aus VDI 2078, etwa 55 W/Person konvektiv und 25 W/Person Strahlung,

Bekleidungsgrad für PMV jahreszeitabhängig,

Energieeintrag als zylindrische, die Personen einschließende Volumenquelle (Radius 0.4 m, Höhe 1.1 m)

### CO<sub>2</sub>-Abgabe:

20 l CO<sub>2</sub>/h

Eintrag als zylindrische, die Köpfe der Personen einschließende Volumenquelle (Radius 0.4 m, Höhe 0.3 m, Mittelpunkt bei Z = 1.15 m)

### Energieabgabe Technik:

Volumenquelle im gesamten Raum, 100 % konvektiv

### Wärmequelle für die Beleuchtung:

Anteil Konvektion/Strahlung 60/40 %.

5 x 5 x 0.3 m Quelle bei 2.85 m Höhe, in beiden Raumhöhen gleich

Leistung 8 bzw 15 W/m<sup>2</sup>

### **Grundlüftung:**

- 105 m<sup>3</sup>/h, auf die jeweiligen entsprechenden Lüftungsöffnungen verteilt
- Untertemperatur siehe Variantenbeschreibung

### **Wetter:**

#### Sommer:

Sehr heißer, stetig wiederkehrender Sommertag aus dem Wetterdatensatz *wieniec\_mit\_heiBer\_Woche*, zweites Jahr.

#### Winter:

Stetig wiederkehrender Tag mit konstanten Bedingungen, t<sub>a</sub> = -5 °C, keine direkte Solarstrahlung, 100 W/m<sup>2</sup> diffuse Solarstrahlung (tagsüber).

### **2.9.3. Ausgewertete Variablen und Feldgrößen**

In diesem Abschnitt erfolgt eine kurze Erläuterung der für die Untersuchungen und Bewertungen der einzelnen Varianten herangezogenen Variablen und Feldgrößen. Hierbei wird neben den für die Behaglichkeitsauswertung erforderlichen Variablen vertiefend auf die Definition des Prozentsatzes Unzufriedener infolge Zugbelastung (Draught Rating, DR) und auf das lokale Luftalter eingegangen, da sich diese Größen besonders für die Beurteilung und den Vergleich von Lüftungskonzepten eignen. Weitere ausführliche Informationen zu den verwendeten Hilfsgrößen befinden sich in DIN ISO 7730 [11] sowie in [12].

### **Lufttemperatur $\vartheta_L$**

Die Temperatur der Luft im untersuchten Simulationsgebiet steht im Rahmen der Strömungssimulation als Feldgröße an allen Punkten zur Verfügung und ermöglicht somit erste Teil-Aussagen bezüglich der thermischen Behaglichkeit im Aufenthaltsbereich. Zudem ist sie eine der Basis-Eingangsgrößen für die Berechnung der Behaglichkeitskriterien.

### **Operative Temperatur $\vartheta_{op}$**

Die operative Temperatur wird als geschwindigkeitsabhängiges Verhältnis der lokalen Strahlungstemperatur und der dazugehörigen Lufttemperatur gebildet und steht ebenfalls im Rahmen der Strömungssimulation als Feldgröße an allen Punkten zur Verfügung. Auch diese Größe ermöglicht wichtige Aussagen bezüglich der thermischen Behaglichkeit im Aufenthaltsbereich.

### **Vorausgesagtes mittleres Votum PMV**

PMV ist eine auf Versuchsreihen basierende empirische Größe, die Aussagen über das thermische Behaglichkeitsempfinden im Untersuchungsgebiet ermöglicht. Da diese Größe eine Vielzahl von Einflussgrößen, wie die Luft- und Strahlungstemperatur, die Luftgeschwindigkeit, die Bekleidung sowie die Aktivität der Personen berücksichtigt, ist sie als ein summatives Behaglichkeitskriterium aufzufassen. PMV kann Werte von -3 (sehr kalt) bis +3 (sehr warm) annehmen, wobei 0 als thermisch neutral, also uneingeschränkt behaglich einzustufen ist.

### **Lokaler Luftaustauschindex $\varepsilon_{p,t}^a$**

Der lokale Luftaustauschindex ist ein ebenfalls als Feldgröße verfügbares Kriterium für das lokale Alter bzw. die Verweilzeit der Raumluft im Untersuchungsgebiet und somit ein Maß für die Luftqualität und die Frischluftversorgung. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit verschiedener Simulationen untereinander wurde das Luftalter mit dem entsprechenden Wert am Austritt normiert. Hierbei bedeutet  $\varepsilon_{p,t}^a > 1$  eine sehr gute Frischluftversorgung,  $\varepsilon_{p,t}^a$  um 1 dagegen, ein Alter, welches bei idealer Durchmischung zu erwarten wäre, Werte deutlich unter 1 weisen auf Regionen mit verbrauchter, alter Luft und somit auf Kurzschlusseffekte in den untersuchten Strömungsstrukturen hin. Weitere detaillierte Informationen zu den verwendeten Größen finden sich in [3] und [4].

### **CO<sub>2</sub>-Konzentration**

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration steht als Feldgröße der CO<sub>2</sub>-Ausbreitung und -Verteilung und somit ebenfalls ein Maß für die Qualität der Raumluft aus hygienischer Sicht zur Verfügung.

### **Zugluftrisiko DR**

Die oft mit „Zugluftrisiko“ (engl. Draught-Rating, DR) bezeichnete Größe stellt den Prozentsatz Unzufriedener infolge Zugbelastung gemäß DIN EN 7730 dar. Hierbei handelt es sich ebenfalls um eine summative und empirische Größe, mit deren Hilfe man allgemeingültige Aussagen bezüglich eventuell auftretender Probleme durch Zugerscheinungen quantifizieren kann. In diesem Sinne ist DR also ein weiteres Kriterium bezüglich der thermischen Behaglichkeit im Aufenthaltsbereich. Aufgrund der

gleichzeitigen Berücksichtigung mehrerer Einflussgrößen (Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Turbulenzgrad der Luft) eignet sich DR besonders für die hier vorgenommenen Untersuchungen. Aus diesem Grunde erfolgte in Abbildung 23 beispielhaft eine Darstellung der Abhängigkeiten dieses Kriteriums von den einzelnen Größen.

### Draft Risk in Abhängigkeit aller Variablen (Isofläche bei 30 %)

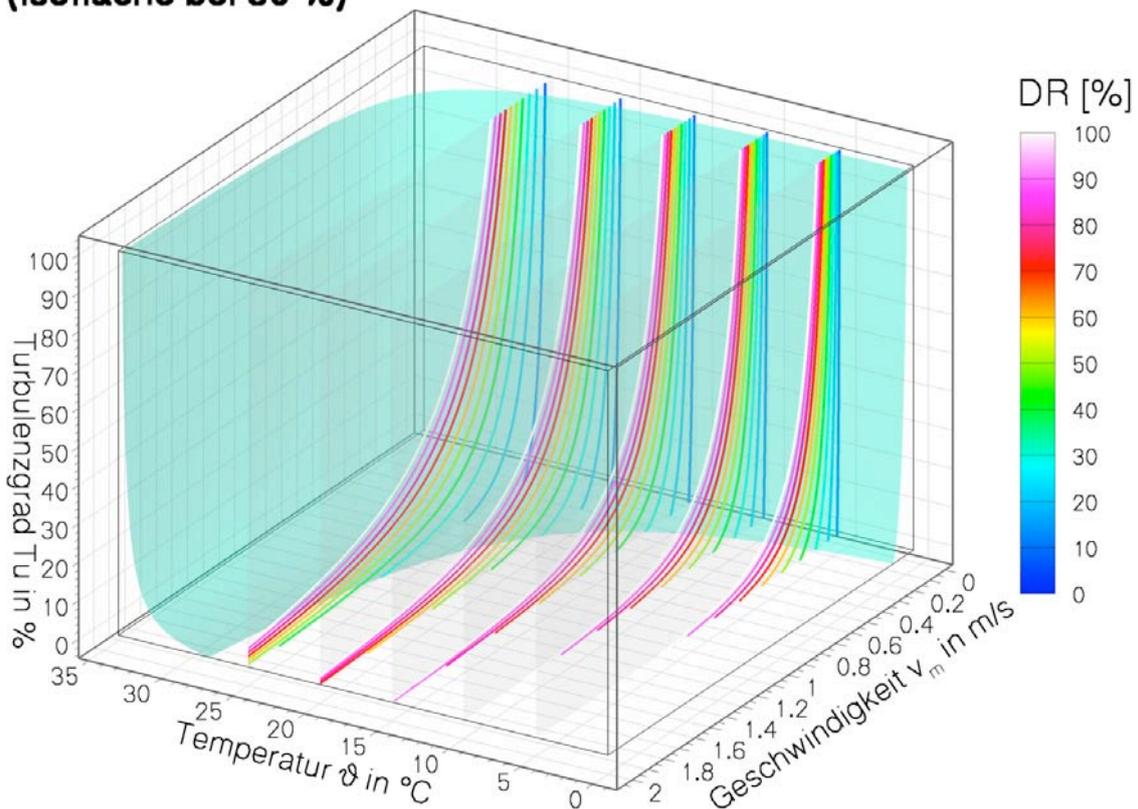


Abbildung 25: Prozentsatz Unzufriedener infolge Zugbelastungen

## 2.10. Methodik Thermische Simulationen

### 2.10.1. Einleitung

Die thermische Gebäudesimulation des gewählten Büroabschnittes hat folgende Aufgaben:

- Mit der Abbildung des dynamischen, thermisch-hygrischen Verhaltens des Büroraums liegen alle Kenngrößen wie Luft- und Strahlungstemperaturen, relative Feuchte und Wärme- und Kältebedarf zu jedem Zeitpunkt vor. Damit kann einerseits die thermische Behaglichkeit (ohne lokalen Diskomfort) zu jedem Zeitpunkt des Jahres ermittelt werden, andererseits können der Endenergiebedarf sowie ökologische Kennwerte wie Primärenergiebedarf oder Treibhauspotential berechnet werden.
- Die Ergebnisse der Strömungssimulation liegen für einen sehr warmen und einen sehr kalten Tag vor, durch Abgleich der Randbedingungen kann mittels thermischer Simulation auf das gesamte Jahr geschlossen werden. Im Unterschied zur CFD-Simulation wird jeder Raum in der dynamischen Simulation mit nur einem Luftknoten abgebildet.

- Aus den Tageslichtsimulationen liegen für typische Tage im Jahr und für 2 typische Tageslichtkonstellationen (nur diffuses Licht, sehr sonniger Tag) eine Bewertung der Tageslichtverteilung, der Blendung etc. für eine Reihe von Fenster- und Sonnenschutzkonstellationen vor. Die Wirkung der unterschiedlichen Tageslichtkonzepte auf den Energiebedarf und die thermische Behaglichkeit zu allen Zeitpunkten des Jahres kann ebenso durch die thermische Simulation gezeigt werden.

Ausgangspunkt des baulichen sowie gebäudetechnischen Konzeptes ist der Passivhausstandard [IBO 2008].

Der Passivhausstandard vereint hohen Komfort, gute Raumluftqualität mit niedrigstem Aufwand an Energie- und Umweltressourcen. Vorhandene natürliche Ressourcen wie die Abwärme von Personen, die solare Einstrahlung, Erdwärme oder -kälte etc. sollen ein Gebäude bereits „passiv“ derart konditionieren, dass zur Erreichung von behaglichen Innenraumkonditionen nur mehr ein geringer Aufwand an Gebäudetechnik und Energie notwendig ist.

Die folgenden Grenzwerte müssen Gebäude einhalten, die prinzipiell als Passivhaus zertifizierbar sein sollen:

- Heizwärmebedarf  $\leq 15 \text{ kWh/m}^2$  und Jahr
- Kühlbedarf  $\leq 15 \text{ kWh/m}^2$  und Jahr
- Luftdichtigkeit  $n_{50} \leq 0,6 \text{ 1/h}$
- Primärenergiebedarf für alle Energiedienstleistungen  $\leq 120 \text{ kWh/m}^2$  und Jahr

Diese Kenngrößen beziehen sich auf die thermische Hülle, die Energiebezugsfläche entspricht in etwa der Nutzfläche, wobei Nebenräume nur mit 60 % einbezogen werden. Der Nachweis erfolgt mittels Passivhausprojektierungspaket (PHPP), derzeit in Version 2007.

Die Qualität des Innenraumklimas wird gemäß Nachweisverfahren mit den folgenden Mindestkennwerten festgelegt:

- Mindestsolltemperatur Winter  $\geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Maximale Temperatur Sommer  $\leq 26 \text{ }^\circ\text{C}$ , wenn gekühlt
- oder alternativ maximal 10 % der Stunden während Betriebszeit über  $25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Raumluftfeuchten sind nicht direkt festgelegt, doch wird in [Schnieders 2009] ein Bereich von 30 bis 70 % rLF angegeben, wobei bei höheren Raumlufttemperaturen geringere Kennwerte für die rel. LF vorgegeben werden (Schwüle).
- Grenzwerte für die Raumluftqualität werden nicht explizit angeben, eine gute Qualität wird angestrebt. Üblicherweise wird ein Frischluftvolumenstrom von  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  und Person im Nachweis angesetzt, der bei günstiger Einbringung und Durchströmung maximal  $1000 \text{ ppm CO}_2$ -Konzentration sicherstellen sollte.
- Die Beleuchtungsqualität orientiert sich an der deutschen, bzw. europäischen Normung (EN 12464-1, DIN 5034)

Insgesamt werden hohe Behaglichkeitsstandards gemäß ÖNORM EN ISO 7730 angestrebt. Die folgende Tabelle stellt den geforderten hohen Qualitäten einen (passivhaus-) typischen energie-effizienten Nutzenergiebedarf und Maßnahmen zu dessen Deckung gegenüber. Angaben pro  $\text{m}^2$  Energiebezugsfläche oder Person.

Parameter	Bestimmung funktionale Einheit (Qualität)	Prozesse	Kennwert	Einheit	Typische Maßnahmen
Temperatur min	20 °C	Heizung		15 kWh/m <sup>2</sup> Jahr	Passivhaushülle (hochwärme-gedämmt, wärmebrückenfrei, Passivhausfenster, hoch-effiziente Lüftung)
Temperatur max	26 °C	Kühlung		15 kWh/m <sup>2</sup> Jahr	Optimale außenliegende Verschattung, Nachtlüftung natürlich
Raumluftqualität	1000 ppm CO <sub>2</sub>	Lüftung		12 W/Person	30 m <sup>3</sup> /hPerson, wenig Einbauten, geringe Luftgeschwindigkeiten, 0,45 Wh/m <sup>3</sup> Strombedarf
Warmwasser	12,5 l 38 °C Wasser / 20 m <sup>2</sup> /Person	Warmwasser	7l Warmwasser à 60 °C/Person		Wassersparende Armaturen, kurze Leitungsnetze, hocheffiziente Pumpen, lastgesteuert
Mindestfeuchte	30 %	Befeuchtung		-	Feuchterückgewinnung, bedarfsgerechte Lüftung, Pflanzen
Maximalfeuchte	65 %	Entfeuchtung		-	Feuchterückgewinnung, bedarfsgerechte Lüftung, Feuchtepufferung
Helligkeit	300 lx Arbeitsfläche <sup>1</sup> Tageslicht, 100 lx Gangbereich	Beleuchtung	7,5 Arbeitsfläche, 3,5 für Restflächen	W/m <sup>2</sup>	Hoher Tageslichtanteil, spez. Anschlussleistung 2,5 W/m <sup>2</sup> /100 lx, Stehlampe lokal, <sup>2</sup> tageslichtgesteuert, Annahme 500 Volllaststunden, Gang fast durchgehend beleuchtet
Sonstige (Aufzug, Notbeleuchtung)				2 kWh/m <sup>2</sup> Jahr	Hocheffiziente Technologie

1 nur bei Tageslicht, sonst 500 lx; 2 nur sinnvoll bei geringerer Belegungsdichte

Zu beachten ist, dass sich die Innenraum-Qualitäten auf einzelne Räume beziehen, während sich die Grenzwerte des Passivhausstandards auf ein ganzes Gebäude beziehen. Da in der gegenständlichen Arbeit der Fokus auf der Behaglichkeit liegt, wird auch für die energetische Betrachtung von einzelnen Räumen ausgegangen, von denen aus auf das Gesamtgebäude geschlossen wird.

Der Passivhausstandard kann durch sehr unterschiedlich zusammengesetzte Maßnahmenbündel realisiert werden, erst auf Gebäudeebene kann eine definitive Prüfung auf prinzipielle Passivhaus-Zertifizierbarkeit erfolgen. Trotzdem haben sich in den Jahren seit Bestehen des Passivhausstandards eine Reihe typischer Maßnahmen herausgebildet, die sich für die Unterschreitung der Grenzwerte gut eignen.

- Dämmung U-Werte kleiner 0.15 W/m<sup>2</sup>K
- Wärmebrückenfreie Ausführung
- Luftdichtheit n<sub>50</sub> kleiner 0.6/h
- Verglasung U-Wert < 0.8 W/m<sup>2</sup>K, g-Wert > 50 %
- Fenster U-Wert < 0.8 W/m<sup>2</sup>K
- Hocheffiziente Lüftungswärmerückgewinnung (> 75 %) bei niedrigem Strombedarf (Q<sub>el</sub> < 0.4 W/m<sup>3</sup>)
- Niedrigste Wärmeverluste bei Brauchwasserbereitung und -verteilung
- Hocheffiziente Nutzung von elektrischem Haushaltsstrom

Die Übertragung der Detailergebnisse der Tageslichtverteilung und des globalen und lokalen Diskomforts an bestimmten typischen Tagen aus der Strömungs- und der Tageslichtsimulation mittels dynamischer Simulation auf ein gesamtes Jahr sowie die Formulierung von Fragestellungen aus dem thermisch/hygrischen Jahresverhalten bau- und gebäudetechnischer Varianten wird unter Zugriff auf eine umfassende Parameteranalyse durchgeführt. Diese prüft bauliche und gebäudetechnische Maßnahmen auf den Passivhausstandard hin und gibt statistische Angaben zur Behaglichkeit über ein Jahr.

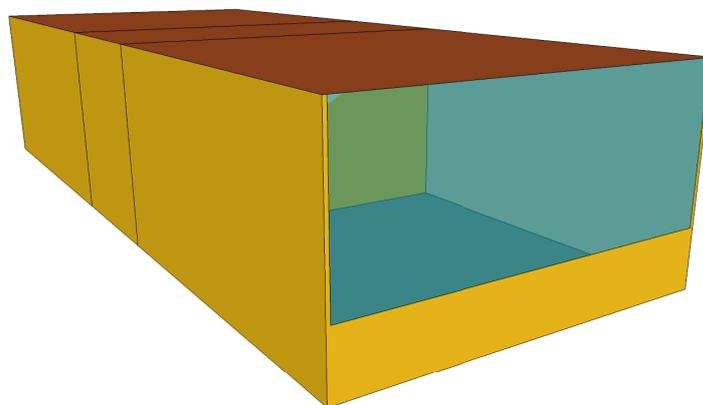
Die Vielfalt architektonischer und bautechnischer Lösungen für den Passivhausstandard im Bürobau kann nur im Ansatz über die hier durchgeführte Parameteranalyse abgebildet werden. Dennoch sind alle wesentlichen Lösungsstrukturen enthalten.

Die Darstellung erfolgt anhand der wesentlichen Maßnahmenbündel:

- Nutzung und Architektur
- Gebäudehülle
- Belichtung
- Haustechnik

### **2.10.2. Nutzung und Architektur**

Für Büro, bzw. Verwaltungsgebäude sind architektonisch eine Vielzahl an Lösungen vorstellbar (siehe auch Kapitel Einleitung). Aus diesen vielfältigen Gebäude-Varianten wurde ein ca. 5 m breiter Raum-Ausschnitt gewählt, wo an einen mittig gelegenen Gang mit ca. 2 m Tiefe zwei 26 m<sup>2</sup> große Büroräume beidseitig anschließen. Die Modellierung in Trnsys stellt sich wie folgt dar:



*Abbildung 26: Modellierung der Büroräume*

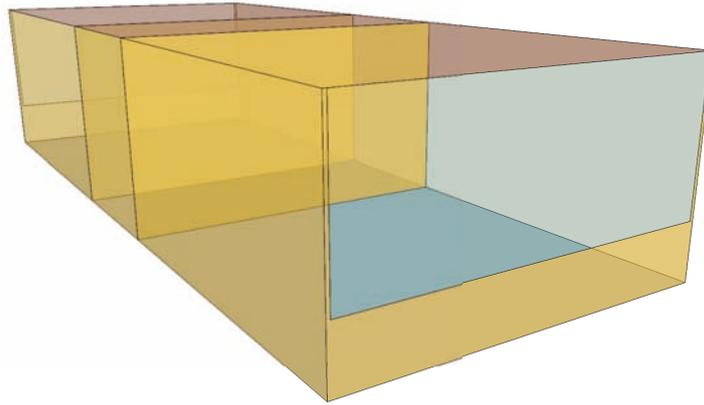


Abbildung 27: Modellierung der Büroräume im x-ray mode

Die Büroräume besitzen nur je 1 vertikale Fläche als Außenwand, die in der Ausgangsvariante nach Süden und Norden orientiert sind. Alle anderen Bauteile mit Ausnahme der Trennwand zum Gang sind Innenbauteile und führen zu gleich temperierten Nachbarräumen, sind somit über eine isotherme Randbedingung angeschlossen. Die Büroräume werden über ein Fensterband belichtet. Die Fassade wird auch mit 2 Varianten, einer ganz verglasten Fassade und einer Lochfassade ausgeführt:

Parameter	Value	Unit	Value	Unit
...	...	-	-	-
...	33	W/m <sup>2</sup>	...	...
...	3	kW/m	) 2 m	...
...	) 8	u/m <sup>2</sup>	8	...

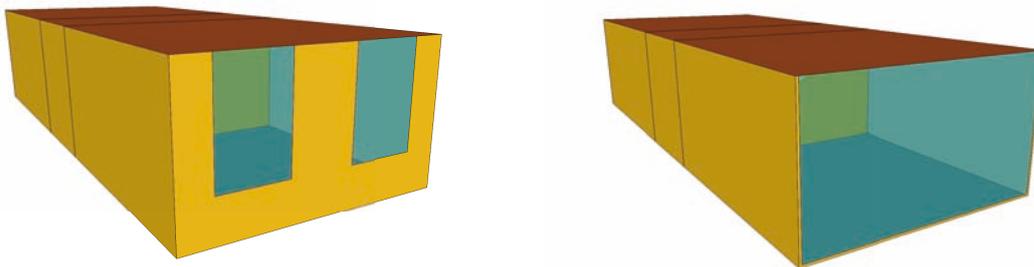
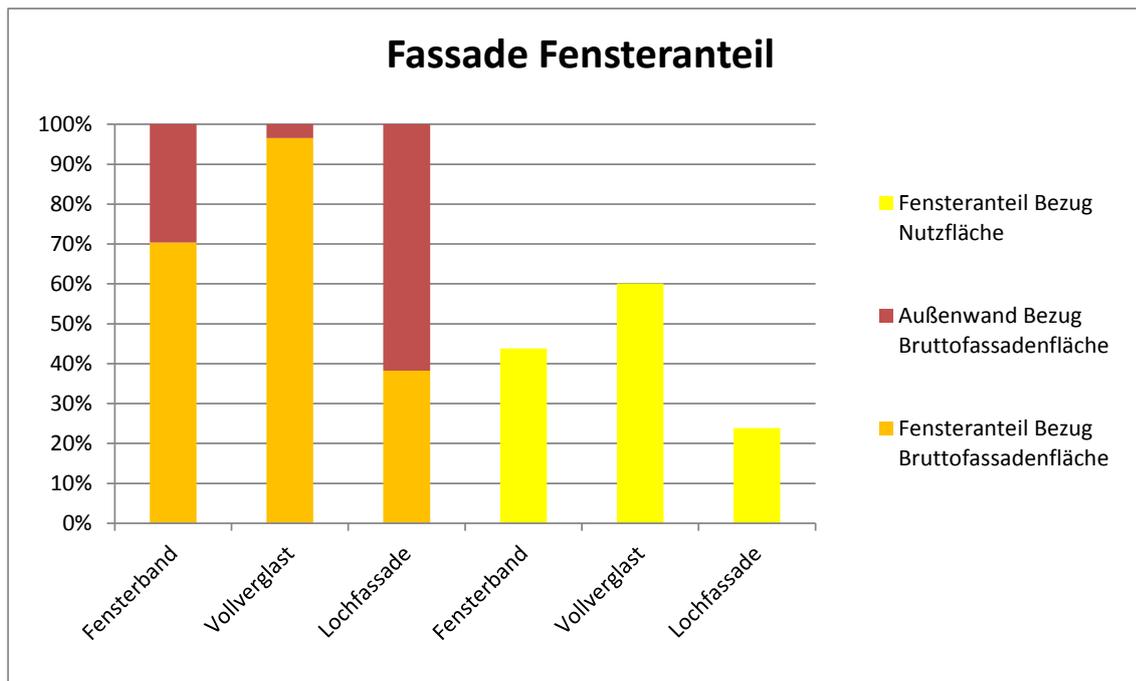


Abbildung 28: Modellierung der Räume Vollverglasst und mit Lochfassade



Anmerkung: Dieses Modell wird auch für die Berechnung des Endenergie- und Primärenergiebedarfs verwendet. Gesamtgebäude unterscheiden sich natürlich in ihrem thermischen Verhalten je nach Größe und Form von dieser vereinfachten Abbildung. Da allerdings die meisten der angegebenen Größen wie Strombedarf für Beleuchtung, Lüftung oder Be- und Entfeuchtung sehr gut aus einzelnen, typischen Räumen abgebildet werden können, ist eine energetisch/ökologische Betrachtung auch auf dieser Ebene fruchtbar. Zu beachten ist, dass vor allem der Heizwärmebedarf für Gesamtgebäude deutlich höher liegt (Büroflächen gegen Tiefgarage/Erdreich und Dach).

Die Berechnung der Tageslichtquotienten wurde mittels 3D Lighting mit Rayfront durchgeführt. Für die Tageslichtsimulation wurden folgende Annahmen verwendet:

Reflexionsgrade	%
Fußboden (innen)	20
Wand (innen)	50
Decke (innen)	80
Möbel (braun)	27
Fensterrahmen	35

Für den Lichttransmissionsgrad der Verglasung des Fensters wurde ein Faktor von 60 % angenommen. Dieser Faktor ergibt sich aus der Lichttransmission des Fenster und einem Verschmutzungsgrad von 85 %. Als Ergebnisse der Tageslichtsimulation können die spektralen Strahlungswerte in einer Karte als farbige Punkte dargestellt werden.

In folgender Abbildung wird das Ergebnis für die Ausgangsvariante dargestellt.

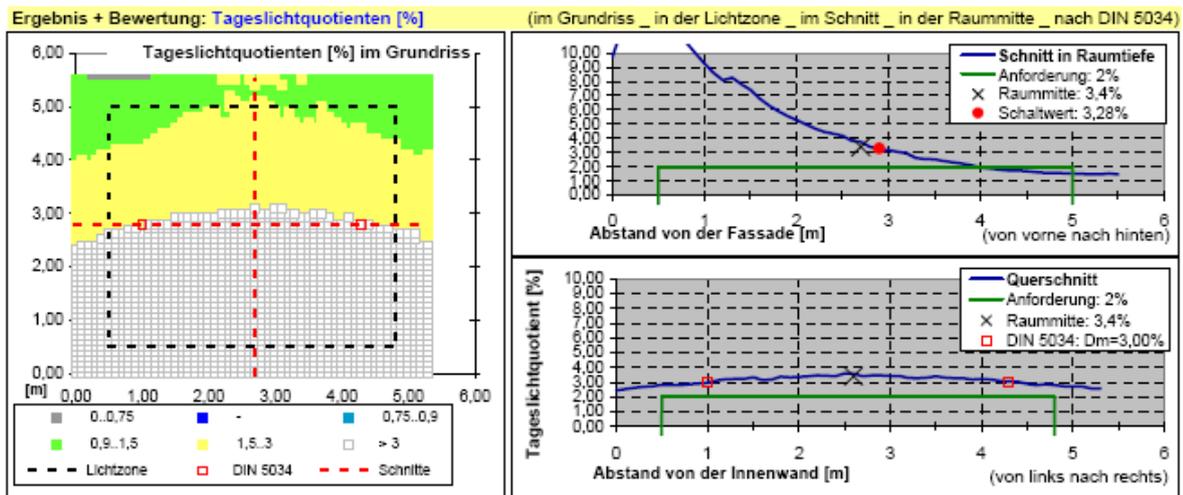


Abbildung 29: Verteilung der Tageslichtquotienten auf dem Grundriss des Modellraumes (links), im Längsschnitt (oben) und Querschnitt in Raummitte (unten)

In den Trnsys Simulationen wurde der Tageslichtquotient  $D_{\text{schalt}}$  verwendet, welcher der Medianwert der Lichtzone ist, den der Lichtsensor zum Einschalten verwendet. Er dient zur Ermittlung der Tageslichtnutzung und Stromeinsparung für die künstliche Beleuchtung. [Lahme 2011].

In folgender Tabelle werden die Tageslichtquotienten der unterschiedlichen Fassadenvariationen dargestellt.

Fassade	Schaltwert des Tageslichtquotienten %
Fensterband	3,28
Vollverglast	3,48
Lochfassade	1,99

Die Raumgröße ermöglicht eine Belegung mit 1 bis 4 Personen (siehe auch Kapitel 1). In der Ausgangsvariante wird jeder Büroraum mit 2 Personen besetzt. Dies ergibt für den Büroraum eine Belegungsdichte von 13 m<sup>2</sup>/Person. Aus einer umfangreichen Recherche wurden Arbeitsplatzdichten von 10 bis 30 m<sup>2</sup>/Person ermittelt, wobei als Bezugsfläche meist die vermietbare Bürofläche herangezogen wird [Lechner et al 2010]. Bezieht man auch die Nebenflächen ein (Gangflächen, Teeküche, Sanitärräume, Lobby), ergeben sich reale Kennwerte zwischen 15 und 25 m<sup>2</sup>/Person.

Arbeitsplatzdichte	Anzahl Personen	Arbeitsplatzdichte m <sup>2</sup> /Person	Wärmeabgabe sensibel W/m <sup>2</sup>	Feuchteabgabe g/m <sup>2</sup>	
2 Personen	2.0	13.0	6.2	3.8	Passivhausbüro_00
1 Person	1.0	26.0	3.1	1.9	
3 Personen	3.0	8.7	9.2	5.8	
4 Personen	4.0	6.5	12.3	7.7	

Die Personen passen sich mit ihrer Kleidung verhältnismäßig gut an die Umgebung an, wobei in der Ausgangsvariante noch eine klassische, aber thermisch gut angepasste Businesskleidung möglich ist.

<b>clo</b>	<b>Bezeichnung Variante</b>	<b>Beschreibung*</b>
0,26	„Kleidung, sehr gut angepasst“	Slip, leichtes Hemd, kurze Ärmel, Shorts, Sandalen – oder – Slip und BH, Sommerkleid, kurze Ärmel, dünn besohlte Schuhe.
0,51	„Businesskleidung angepasst“	Slip, ärmelloses Unterhemd, kurze Socken, leichtes Hemd, lange Ärmel, leichte Hose, Schuhe, dünn besohlt – oder – Slip und BH, Ärmelloses Unterhemd, Socken, leichte Bluse, lange Ärmel, leichte Hose, Schuhe, dünn besohlt.
0,76	„Businesskleidung, konventionell“	Slip, ärmelloses Unterhemd, kurze Socken, leichtes Hemd, lange Ärmel, leichte Hose, Schuhe, dünn besohlt, leichte Sommerjacke – oder – Slip und BH, ärmelloses Unterhemd, Socken, leichte Bluse, lange Ärmel, normale Hose, dünner Pullover, Schuhe, dünn besohlt.

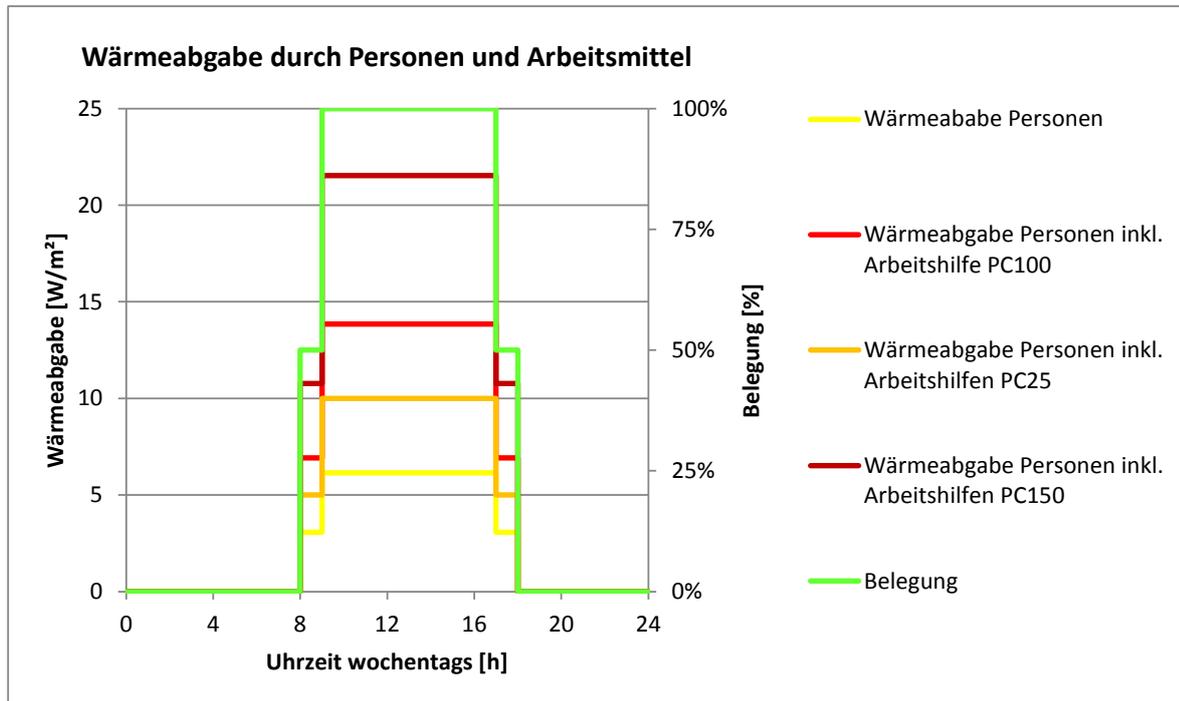
\* Berechnung mit COMFORT 1.3, Software der NESA Softwarelabor der Univ.-GH Siegen

Die Ausrüstung mit elektronischen Arbeitshilfen (Computer, Drucker, Telefon, Mobiltelefone etc.) ist stark vom Nutzer abhängig, obwohl bezogen auf deren Leistung als auch auf deren Energieeffizienz. Der Passivhausstandard zielt auf einen sehr effizienten Energieeinsatz, allerdings sind den absoluten Stromverbrauchswerten je nach Arbeitsbereich Grenzen gesetzt. So liegen mehrere Größenordnungen zwischen dem Strombedarf eines Büroraum eines Designers und dem Büroraum einer/eines Kundenberaters/in, in dem vielleicht nur ein Notebook und ein Telefon vorhanden sind.

<b>Wärmeabgabe Arbeitshilfen</b>	<b>Wärmeleistung W/Arbeitspl.</b>	<b>Leistung spez.</b>	<b>Leistung spez.</b>	<b>Leistung spez.</b>	
		<b>W/m<sup>2</sup></b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>	
		2 Personen	1 Person	4 Personen	
PC100	100.0	7.7	3.8	15.4	Ausgangsvariante
PC25	25.0	1.9	1.0	3.8	
PC150	150.0	11.5	5.8	23.1	

Die Belegung wird wochentags von 8 bis 18 Uhr angenommen, wobei in der ersten und letzten Stunde nur mit der halben Belegung gerechnet wird. Es wird in der Ausgangsvariante angenommen, dass außerhalb der Belegungszeit der Standby der Arbeitshilfen auf 0 W abgesenkt wird (Steckerleisten oder zentral).

Es ergibt sich das folgende Betriebssystem:



In Summe ergeben sich große Unterschiede in der Wärmeabgabe je nach Ausstattung. Ergänzt man die Varianten zur Personenanzahl in den Büros, ergeben sich Wärmeabgaben von Personen und Arbeitshilfen zwischen 5 und 44 W/m<sup>2</sup>. Berücksichtigt man, dass Passivhausbüros eine Heizleistung zwischen 10 und 15 W/m<sup>2</sup> aufweisen, wird der große Einfluss der inneren Wärmeabgaben ersichtlich. Zur Luftbefeuchtung werden in der Standardvariante 3 Pflanzen mit einer Feuchteabgabe tagsüber (Beleuchtung stärker 500 lx) von 50 g/h angenommen, in der Nacht sinkt dieser Wert auf 5 g/h. Im Sommerhalbjahr (Juni bis September) wäre es sinnvoller, die Pflanzen zu schneiden oder im Außenraum zu lagern, dies ist in der Praxis oft nicht praktikabel.

Der Gangbereich wird vereinfachend ohne Wärmeabgabe von Personen und Arbeitshilfen betrachtet. Insgesamt ergeben sich die folgenden durchschnittlichen Wärmeabgaben über das gesamte Jahr:

Abwärme sensibel u. latent	Max.sensibel W/m <sup>2</sup>	Durchschnittlich sensibel		Durchschnittlich latent	
		Winter W/m <sup>2</sup>	Sommer W/m <sup>2</sup>	Winter W/m <sup>2</sup>	Sommer W/m <sup>2</sup>
Bürraum Süd	18.8	4.2	3.8	3.7	3.0
Gang	5.0	1.5	1.5	1.5	1.5
Bürraum Nord	18.8	4.2	3.8	3.7	3.0
Gesamt	16.7	3.8	3.4	3.4	2.8

Die durchschnittlichen Kennwerte liegen im Winter ziemlich bei dem im Passivhausprojektierungspaket angenommenen Standardkennwert für Bürogebäude ( $q_i = 3.5 \text{ W/m}^2$ ), im Sommer leicht darunter, bei allerdings höheren Leistungsspitzen.

Mit der Nutzung sind noch Anforderungen an Mindest- und Höchstwerte der Raumtemperaturen, der Raumlufffeuchten und der Raumluffqualität verbunden. Zu den Schwellwerten siehe Kapitel Haustechnik.

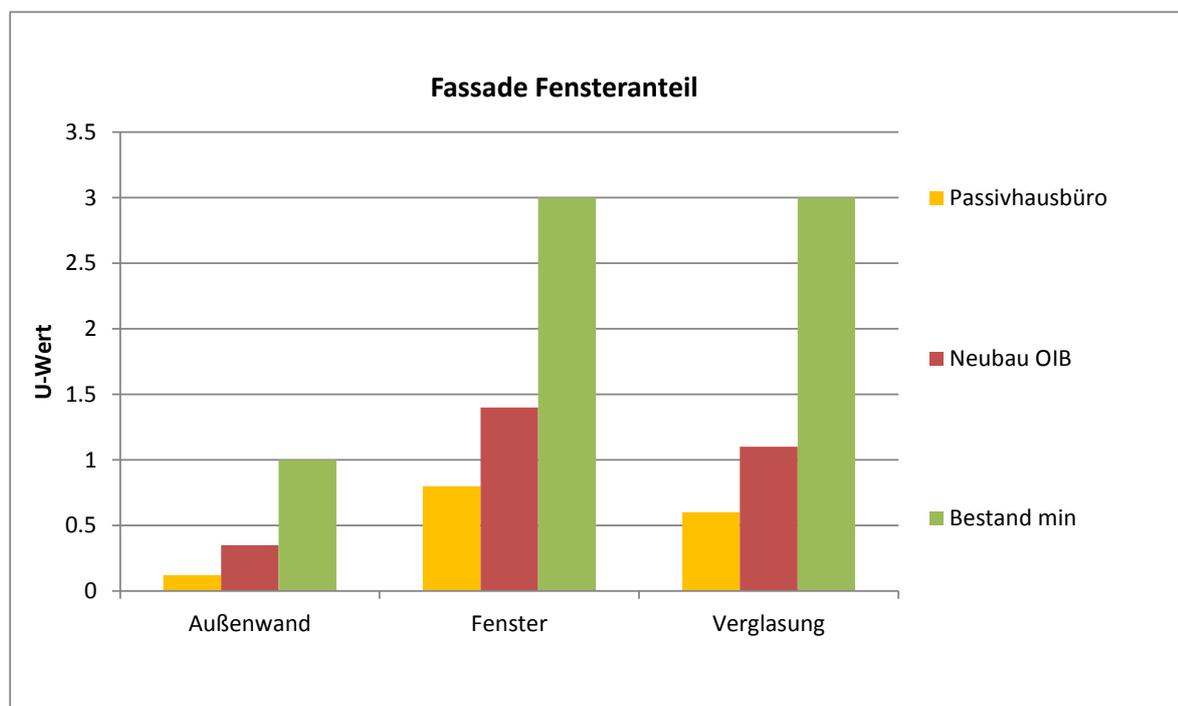
### 2.10.3. Thermische Hülle und Gebäudekonstruktion

Die Anforderungen an die thermische Hülle von Gebäuden in Passivhausqualität für mitteleuropäische Klimata beziehen sich vor allem auf die folgenden Parameter:

- Wärmeschutz
- Luftdichtigkeit
- passivsolare Gewinne
- Sonnenschutz
- Tageslichtversorgung

Für den Wärmeschutz wurden typische Kennwerte gemäß [IBO 2008] gewählt.

Wärmeschutz	Außenwand W/m <sup>2</sup> K	Fenster W/m <sup>2</sup> K	Verglasung W/m <sup>2</sup> K	
Passivhausbüro	0.12	0.8	0.6	Passivbüro_00
Neubau OIB	0.35	1.4	1.1	
Bestand min	1	3	3	



Diese U-Werte wurden für unterschiedliche Bauweisen beibehalten. Die konstruktive Ausbildung ist in der Basisvariante eine Stahlbeton-Skelettbauweise mit massiver Außenwand und Leichtbauwänden innen. Die Basisvariante wurde wie folgt variiert.

Bauweise	Ausgangsvariante Passivhausbüro_00	Variante DE2b (Akustikdecke)	Variante AW2, DE3 (Leichtbau)
Außenwand	AW1: Stahlbeton 18 cm mit WD 32 cm hinterlüftet	Wie Ausgangsvariante	AW2: Holzrahmenbauweise mit Vorsatzschale, hinterlüftet
Geschoßdecke	DE2: Stahlbetondecke 28 cm, Doppelboden mit Teppichauflage, 3 cm Hohlraumdämmung	DE2b: Wie Ausgangsvariante, allerdings mit abgehängter Akustikdecke	DE3: Tramdecke mit schwerer Splittschüttung, Doppelboden, Teppichauflage
Trennwände	Leichtbauwände, Gipskartonplatte einlagig, WD 7,5 cm	Wie Ausgangsvariante	Wie Ausgangsvariante

Detaillierte Aufbauten werden im Anhang angegeben.

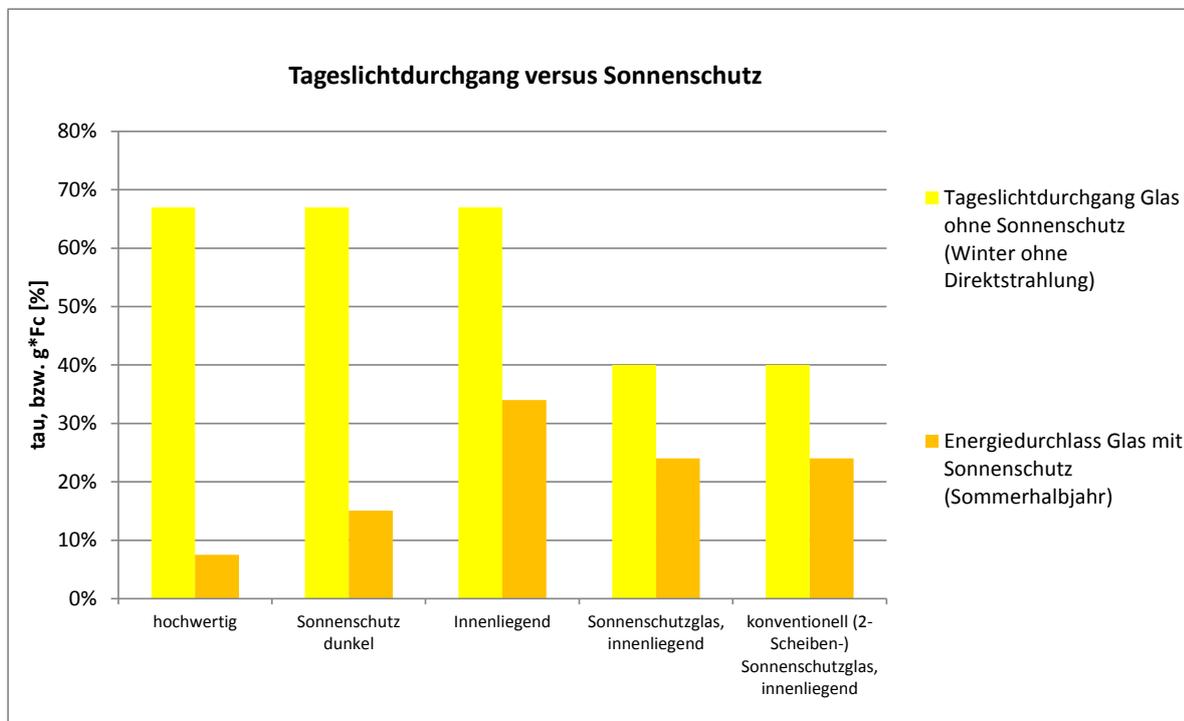
Die Luftdichtigkeit eines Passivhauses ist mit 0.6 Luftwechsel pro Stunde bei 50 Pa Druckdifferenz begrenzt. Realisierte Gebäude weisen  $n_{50}$ -Werte bis 0.1/h auf. In den Simulationen wurden die folgenden mittleren Infiltrationsraten für die Büroräume berücksichtigt.

Luftdichtigkeit	$n_{50}$ -Wert 1/h	Infiltration 1/h	
Standard	0.6	0.042	Passivhausbüro_00
sehr luftdicht	0.2	0.014	
Neubau konventionell mit Lüftungsanlage	1.5	0.105	
Neubau ohne Lüftungsanlage	3	0.210	

Passivsolare Gewinne in der Heizsaison, ein guter sommerlicher Wärmeschutz und eine optimale Tageslichtversorgung werden maßgeblich durch das System Verglasung/Fenster und Sonnenschutz beeinflusst.

Die folgende Tabelle stellt die betrachteten Systeme nebeneinander:

Fenster	Transmission		Lage	Transm. Licht %	Transm. Solar %	Reflexion Solar %	Energiedurchlass Fc %	
	Sonnenschutz	Licht %						g-Wert %
hochwertige Jalousie (Passivbüro_00)		67	50	außenliegend	10	10	60	15
Sonnenschutz dunkel		67	50	außenliegend	10	10	20	30
Sonnenschutz dunkel		67	50	innenliegend	10	10	60	68
Sonnenschutzglas		40	30	innenliegend	10	10	60	80
2-Scheiben-Sonnenschutzglas		40	30	innenliegend	10	10	60	78



Die Regelung des Sonnenschutzes erfolgt tageslicht- und im Winter auch temperaturabhängig:

- Im Winter wird der Sonnenschutz geschlossen, wenn eine Grenztemperatur von 24 °C überschritten wird. Der Sonnenschutz wird nur soweit geschlossen, dass jedenfalls 100 W/m<sup>2</sup> auf das Fenster auftreffen (d.h. ca. 10 000 lx)
- Im Sommer wird der Sonnenschutz abhängig von der Strahlung auf die Fassade geschlossen: Wenn 150 W/m<sup>2</sup> überschritten werden, wird der Sonnenschutz soweit geschlossen, dass 100 W/m<sup>2</sup> auf die dahinterliegende Fassade auftreffen. Er wird wieder geöffnet, wenn die Sonnenstrahlung auf die Fassade unter 100 W/m<sup>2</sup> fällt.

Eine Sturmsicherung ist nicht vorhanden, d.h. es wird angenommen, dass der Sonnenschutz auch hohen Windstärken widersteht.

Jeder Büroraum besitzt 2 öffnbare Fenster, die für Fensterlüftung in der Übergangszeit und für die sommerliche Nachtlüftung verwendet werden können. Die außenliegenden Jalousien dienen hierbei als Schlagregen- und (provisorischer) Einbruchschutz.

Die Innentüren bleiben geschlossen, d.h. es wird nur eine einseitige Fensterlüftung betrachtet.

#### **2.10.4. Tageslicht und Beleuchtung**

Eine wesentliche Qualität von Passivhausbüros besteht in einer ausreichenden Tageslichtversorgung der Arbeitsplätze:

- Sonnenlicht ist bezüglich Lichtausbeute sehr energieeffizient, d.h. ein wesentlicher Anteil des Sonnenlichts besteht aus sichtbarem Licht, der „nur“ Wärme erzeugende Anteil ist im Vergleich zu den meisten Arten von Kunstlicht deutlich geringer.
- Das menschliche Auge ist an das Sonnenspektrum qua Evolution gut angepasst, Kunstlicht kommt mehr schlecht als recht an das Sonnenspektrum heran. In diesem Zusammenhang scheinen auch die aktuellen Ergebnisse der Forschung interessant über den Einfluss des über Tag sich ändernden Sonnenspektrums (Tagesränder Richtung rot verschoben, mittags und bei bedecktem Himmel Richtung blau).
- Da nicht nur bei Tageslicht gearbeitet wird, zudem auch meist Bereiche ohne oder nur mit schwachem Tageslicht versorgt werden können, ist jedenfalls Kunstlicht erforderlich: dieses sollte möglichst bedarfsgerecht, energieeffizient und mit hoher Lichtqualität zur Verfügung gestellt werden.

Der Hauptfokus liegt auf den Büroräumen selbst, diese wurden für eine Vielzahl an baulichen Varianten an typischen Tagen mit und ohne Direktsonnenlicht bezüglich Tageslichtverteilung berechnet und bewertet (siehe Kapitel Tageslichtsimulation). Die berechneten Tageslichtquotienten wurden in die thermische Simulation eingepflegt, für die Kunst-Beleuchtung wurden 4 Varianten berechnet.

Die Ausgangsvariante stellt sich wie folgt dar:

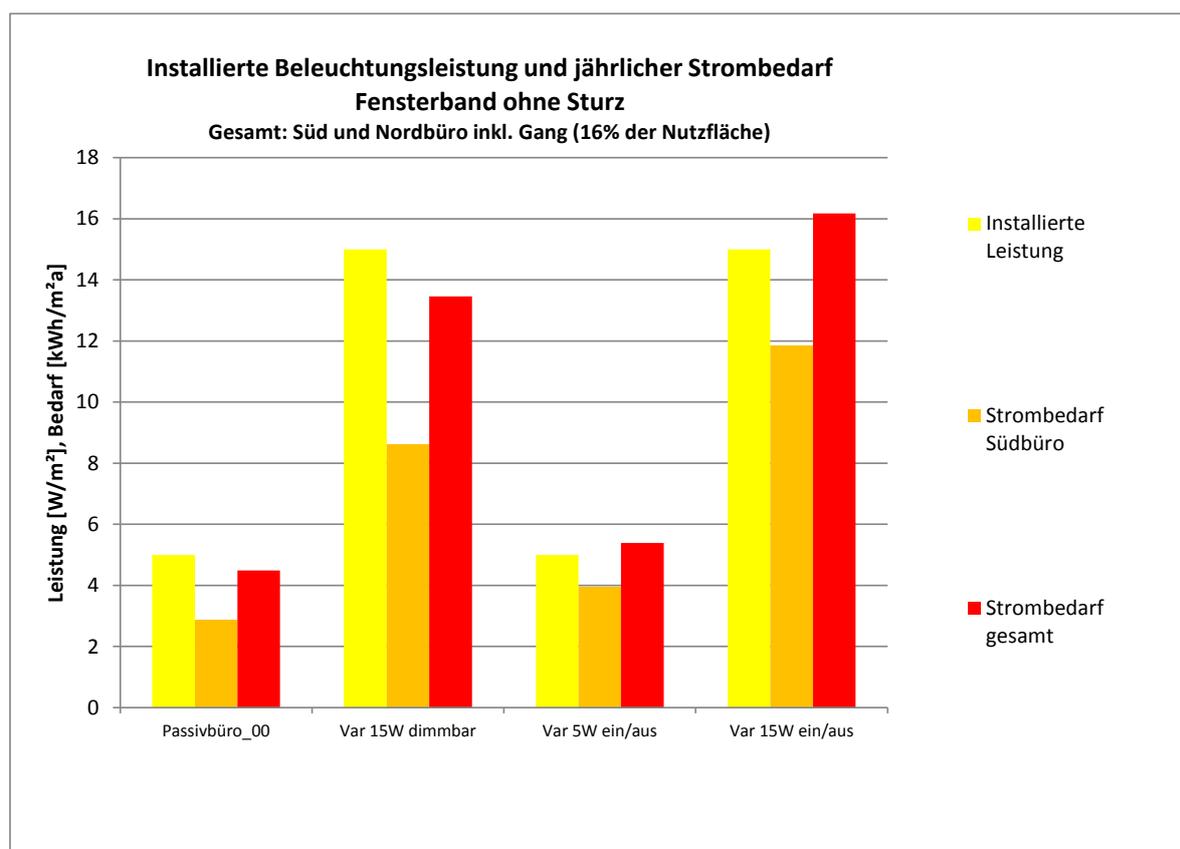
- Büroraum: Stehlampen mit insgesamt  $5 \text{ W/m}^2$  installierter Leistung, diese garantieren 500 lux am Arbeitstisch und 100–300 lux im Restbereich. Der aus der Tageslichtsimulation entnommene Tageslichtquotient wird herangezogen, um die Lichtleistung von 0 bis 100 % Stärke bestimmen zu können. Die hier simulierte Ausgangsvariante entspricht der Variante mit außenliegenden Jalousien ohne Sturz (Achtung: Betriebszeiten und Belegung unterscheiden sich zwischen Tageslicht- und thermischer Simulation. Eine Validierung mit denselben Annahmen ergab eine sehr gute Übereinstimmung des angegebenen Strombedarfs). Die Jalousien werden bei Direktbesonnung automatisiert nur soweit geschlossen, dass 500 lux an den Arbeitsplätzen jedenfalls gesichert sind.
- Gangbereich: Es ist eine Leistung von  $5 \text{ W/m}^2$  installiert, die Beleuchtung ist durchgehend eingeschaltet, da keine Tageslichtversorgung vorhanden ist (Keine Glaswände zu den Büros, keine Oberlichten etc.).

Die erforderliche Lichtleistung hängt auch stark von der tatsächlichen Einrichtung (Arbeitsplätze beblockt oder geklappt) und der Belegungsdichte ab. Vor allem nicht oder nur schwach tageslichtversorgte Bereiche wie Gänge etc. sind trotz der untergeordneten Flächenanteile durch die hohen Betriebszeiten bekannt für relevanten Strom- und Primärenergiebedarf. Diese Bereiche sind

allerdings bezüglich Behaglichkeitsoptimierung nicht prioritär und werden daher hier nicht in ihren energetischen Optimierungspotentialen dargestellt.

Die Varianten stellen sich wie folgt dar:

Beleuchtung		Installierte Leistung	Regelung	Bedarf Südbüro	Bedarf gesamt
Kurzbezeichnung		W/m <sup>2</sup>	-	Fensterband kWh/m <sup>2</sup> a	Fensterband kWh/m <sup>2</sup> a
Passivbüro_00	Bürraum	5	dimmend	2.87	4.48
	Gang	5	durchgehend ein	13.05	
Var 15W dimmbar	Bürraum	15	dimmend	8.62	13.45
	Gang	15	durchgehend ein	39.15	
Var 5W ein/aus	Bürraum	5	ein/aus	3.95	5.39
	Gang	5	durchgehend ein	13.05	
Var 15W ein/aus	Bürraum	15	ein/aus	11.85	16.18
	Gang	15	durchgehend ein	39.15	



## 2.10.5. Haustechnik

### Lüftungsanlage

Passivbüros benötigen eine kontrollierte Be- und Entlüftung, die den hygienischen Luftwechsel sicherstellt und damit eine gute Raumqualität sichert. Folgende Mindestqualitäten werden gemäß Passivhausplanung für Bürogebäude gefordert:

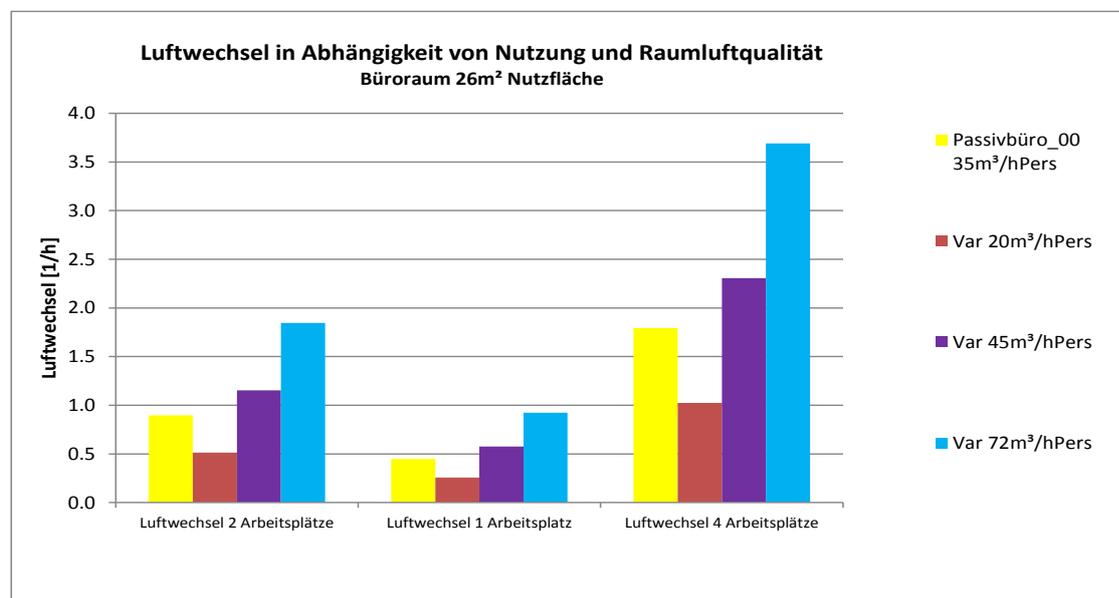
- Wärmebereitstellungsgrad  $\geq 75\%$
- Spezifischer Strombedarf Zu- und Abluftstrom  $\leq 0.45 \text{ Wh/m}^3$
- Luftvolumenstrom für Erwachsene im Mittel  $30 \text{ m}^3/\text{h Person}$

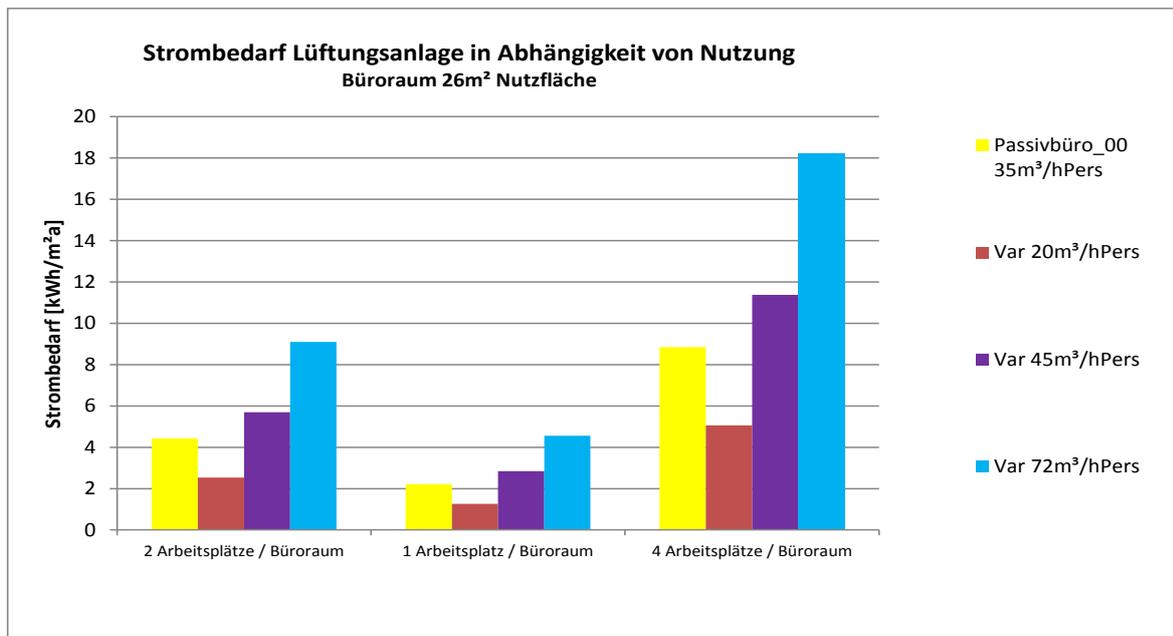
Je nach gewünschter Raumluftqualität und je nach Belastung der Raumluft durch Emissionen aus Baustoffen und Möbel werden in der einschlägigen Normung Qualitätsklassen definiert. Auf der Grundlage dieser wurden die folgenden Varianten definiert:

Luftmenge	Luftvolumenstrom spez. $\text{m}^3/\text{h Person}$	Wärmerück- gewinnung %	Feuchterück- gewinnung %	Strombedarf spezifisch* $\text{Wh/m}^3$
Var 20 $\text{m}^3/\text{h Person}$	20	85	60	0.45
Passivbüro_00	35	85	60	0.45
Var 45 $\text{m}^3/\text{h Person}$	45	85	60	0.45
Var 72 $\text{m}^3/\text{h Person}$	72	85	60	0.45
<b>Feuchterückgewinnung</b>				
FRG = 0 %	35	85	0	0.45

\* Der spezifische Strombedarf ist über alle Varianten gleich, dies setzt natürlich sehr unterschiedliche Ausführungen von Lüftungsgerät und Netzwerk voraus.

Die Lüftungsanlage ist wochentags von 6 bis 20 Uhr im Betrieb. Die Frischluft wird in den beiden Büroräumen eingeblasen, strömt über Überströmöffnungen in den Gang und wird dort abgesaugt. Die folgenden Abbildungen zeigen Luftwechsel und Strombedarf der Lüftungsanlage in den unterschiedlichen Varianten.





### Heizung, Kühlung, Be- und Entfeuchtung

Die in der Ausgangsvariante verwendete Konditionierung des Gebäudes hält die Büroräume durch eine ideale Heiz- und Kühlanlage auf Soll-Raumtemperatur. Sie wird konstant ohne Absenkung über das gesamte Jahr betrieben.

Es werden die folgenden Sollwerte in Variationen untersucht:

Sollwerte	Mindestwert	Maximalwert
<b>Raumlufttemperaturen*</b>	°C	°C
<b>Passivhausbüro_00</b>	<b>21</b>	<b>25</b>
Variante 20/26	20	26
Variante ohne Raumluftkühlung	20	frei schwingend
<b>Raumluftfeuchten</b>	%	g/kg
Passivhausbüro_00	frei schwingend	frei schwingend
Variante be- und entfeuchtet	40	12

\*Hinweis: Im Unterschied zu den Strömungssimulationen werden Sollwerte der Raumlufttemperatur vorgegeben.

Für die Einbringung der benötigten Heiz- und Kühlleistungen werden Systeme im Detail im Kapitel Strömungssimulation untersucht. Für die thermische Simulation wurden einige typische ausgewählt, wobei der Fokus auf bauteilaktivierten Systemen lag.

<b>Wärme/Kälteabgabe</b>	<b>Raum</b>	<b>Zuluft</b>
	<b>ideale Heizung und Kühlung</b>	<b>nur passiv konditioniert</b>
<b>Passivhausbüro_00</b>	<b>Raumlufttemperatur 21 bis 25 °C</b>	<b>nur passiv konditioniert</b>
Variante Betonkernaktivierung	Vorlauftemperaturen von 18 bis 34 °C, Regelung auf Oberflächentemperatur	Winter min 18 °C, Sommer max 22 °C, Max. Feuchte 9 g/kg
Variante Kapillarrohrrmatte Decke	Vorlauftemperaturen von 18 bis 34 °C, Regelung auf Raumtemperatur	Winter min 18 °C, Sommer max 22 °C, Max. Feuchte 9 g/kg
Variante Fußbodenheizung/kühlung	Vorlauftemperaturen von 18 bis 34 °C, Regelung auf Raumtemperatur	Winter min 18 °C, Sommer max 22 °C, Max. Feuchte 9 g/kg

### 2.10.6. Energetische und ökologische Bewertung

Setzt man den ermittelten Nutzenergiebedarf mit typischen Verlustfaktoren und Technologien (Hilfsstrom) um, so können End- und Primärenergiebedarf näherungsweise berechnet werden. Die folgenden Verlustfaktoren wurden verwendet:

	<b>Wirkungsgrade</b>	<b>Anteil Hilfsstrom</b>
Kühlbedarf sensibel	3	5 %
Kühlbedarf Zuluft	3	5 %
Entfeuchtungsbedarf	3	5 %
Heizwärmebedarf	0.8	5 %
Heizwärmebedarf Zuluft	0.8	5 %
Befeuchtungsbedarf	0.8	5 %

Die folgenden der Primärenergiefaktoren finden Verwendung, die konventionelle Systeme abbilden:

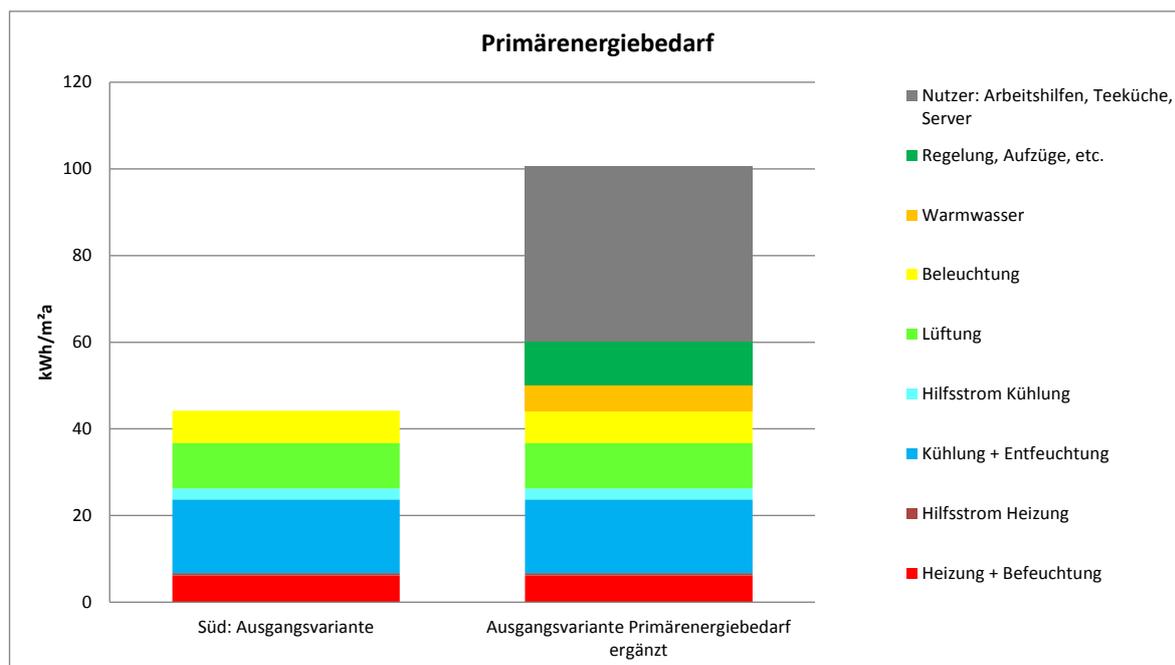
<b>Energieträger</b>	<b>Quelle Gemis/PHPP</b>	<b>Primärenergiefaktor</b>
Elektrische Energie	Europ. Strommix	<b>2.6 kWh/kWh</b>
Thermische Energie	Erdgas	<b>1.1 kWh/kWh</b>

Es wurde ein Szenario mit erneuerbaren Energieträgern gerechnet

<b>Energieträger</b>		<b>Primärenergiefaktor</b>
Elektrische Energie	PV 80%	<b>0.4 kWh/kWh</b> Quelle Ecoinvent
Thermische Energie	Pellets	<b>0.2 kWh/kWh</b> Quelle Gemis/PHPP

Da nicht alle Energiedienstleistungen durch die Raum- und Gebäudeeigenschaften direkt beeinflusst sind, werden nur die folgenden dargestellt:

- Heizung + Befeuchtung
- Hilfsstrom Heizung
- Kühlung + Entfeuchtung
- Hilfsstrom Kühlung
- Lüftung
- Beleuchtung

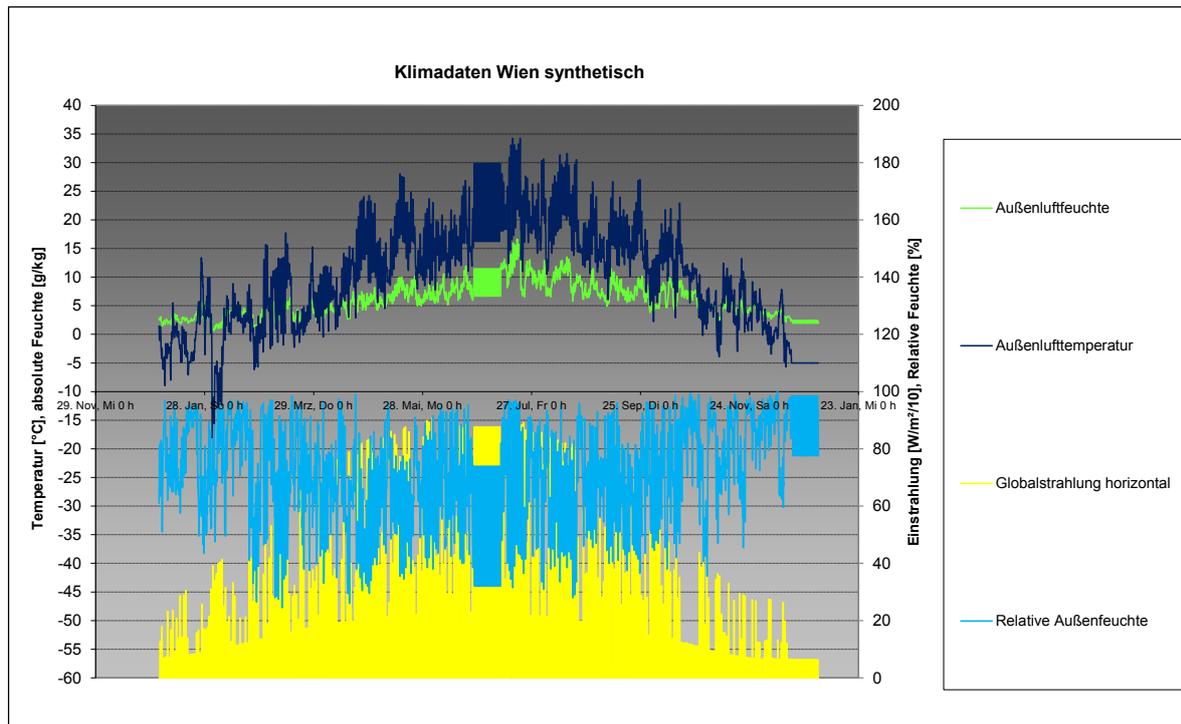


Um den Primärenergiebedarf von 120 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr einzuhalten, müssen für die dargestellten Energiedienstleistungen maximal 60 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr angepeilt werden.

### 2.10.7. Anmerkungen zum Klima

Außenlufttemperatur, relative Feuchte und Sonneneinstrahlung direkt und diffus wurden dem IEWC-Wetterdatensatz Wien/Schwechat entnommen. Der Wetterdatensatz bildet im Mittel die Monatsmittelwerte ab, enthält allerdings auch heiße und kalte Perioden. Sehr heiße Sommer werden dadurch allerdings nicht abgebildet. Daher wurde eine heiße Woche aus dem Jahr 2007 mit berücksichtigt. Für die Feinabstimmung mit der Strömungssimulation wurde der dort verwendete heiße und kalte Tag für jeweils 2 Wochen wiederholt eingeschungen.

Es ergibt sich das folgende Profil:



Damit ergeben sich gegenüber dem Standard-IEWC Datensatz im Mittel in den entsprechenden Monaten (Dezember, Juni und Juli) deutliche Abweichungen vom Standard-Durchschnitt.

<b>Klima Wien synthetisch</b>	Außenlufttemperatur °C	Relative Feuchte %	Absolute Feuchte g/kg	Strahlung global kWh/m <sup>2</sup>	Strahlung direkt kWh/m <sup>2</sup>
Jänner	-0.1	75.3	2.8	26	5
Februar	-0.4	81.1	3.2	47	20
März	5.4	69.6	3.8	86	38
April	10.9	61.1	4.9	120	53
Mai	15.1	64.6	6.8	156	70
Juni	17.8	64.5	8.0	169	85
Juli	22.4	63.8	10.5	197	120
August	19.7	65.9	9.2	150	79
September	15.4	67.9	7.3	98	40
Oktober	10.7	75.8	6.2	58	22
November	4.6	83.0	4.4	27	7
Dezember	-2.2	86.9	2.7	14	2
Durchschnitt/Summe	10.0	71.6	5.8	1147	540
Maximum	34.3	100.0	18.0	910	746
Minimum	-18.1	24.5	0.6	0	0

In der Interpretation des berechneten Heizwärme- und Kühlbedarfs ist dies zu berücksichtigen.

### 3. Ergebnisse der Lichtsimulationen

#### 3.1. Faktoren für natürliche Belichtung und Tageslichtnutzung

##### 3.1.1. Von Oslo bis Athen. Der Einfluss des Breitengrades auf die Tageslichtnutzung in Büros

Das Modellbüro wird in das Lichtklima verschiedener Breitengrade versetzt.

In Wien reicht die Zone mit  $TQ > 3$  bis zur Mitte der Raumtiefe. An keinem Ort im Raum wird der von der DIN 5034 geforderte Mindestwert des  $TQ > 0,9$  unterschritten. Das gilt auch für die anderen ausgewählten Orte Oslo, Hamburg und Athen.

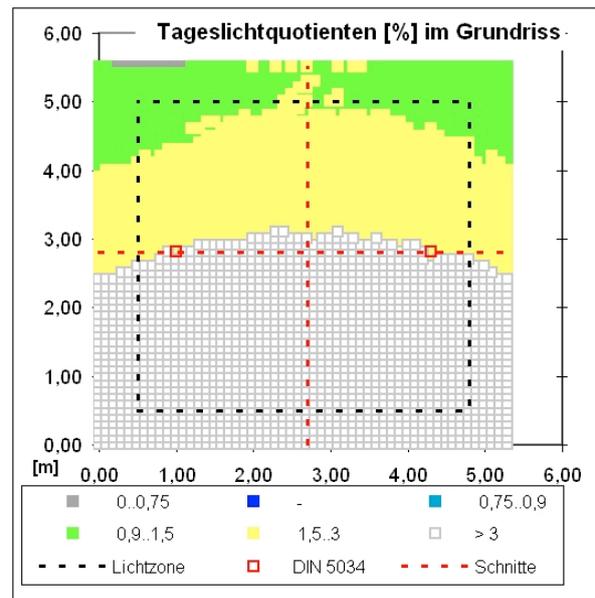
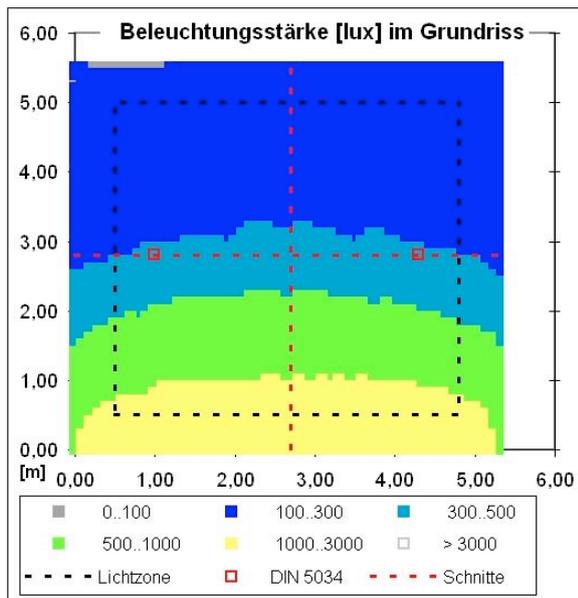


Abbildung 30: 3 Athen

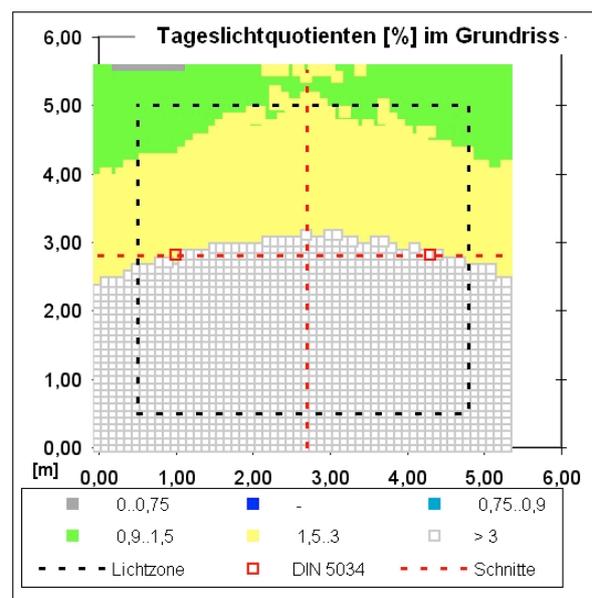
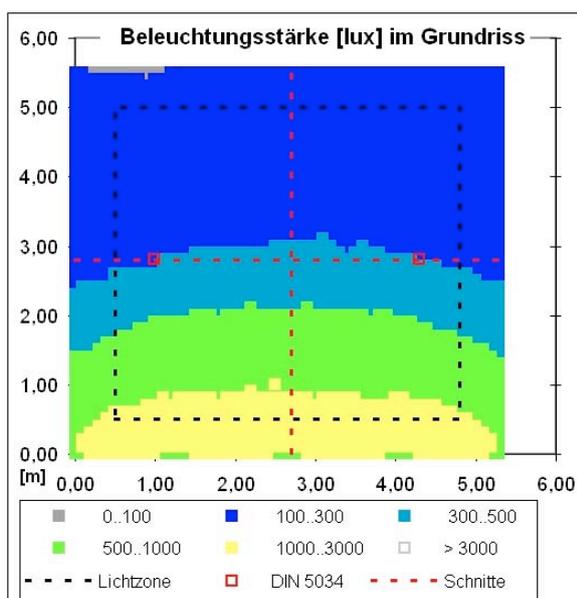


Abbildung 31: 01 Wien

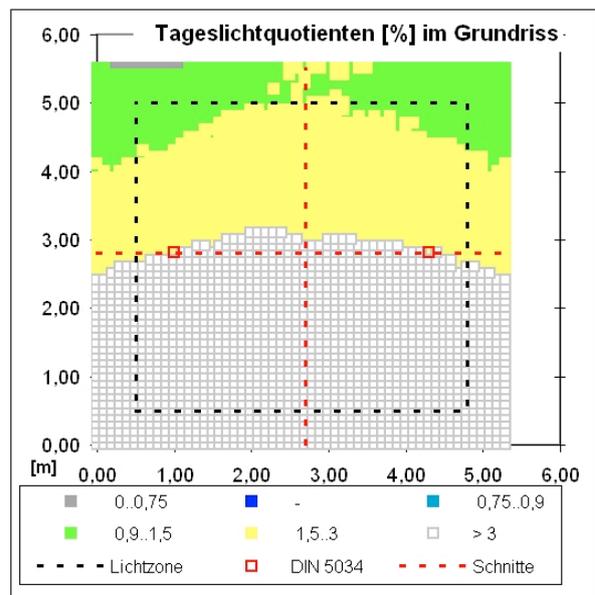
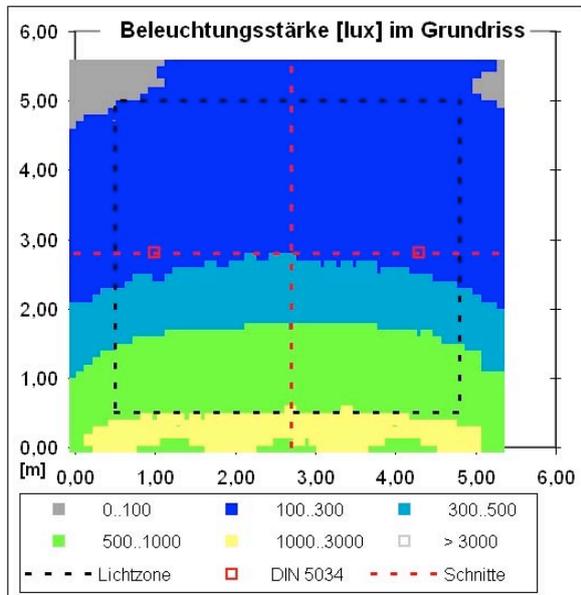


Abbildung 32: 04 Hamburg

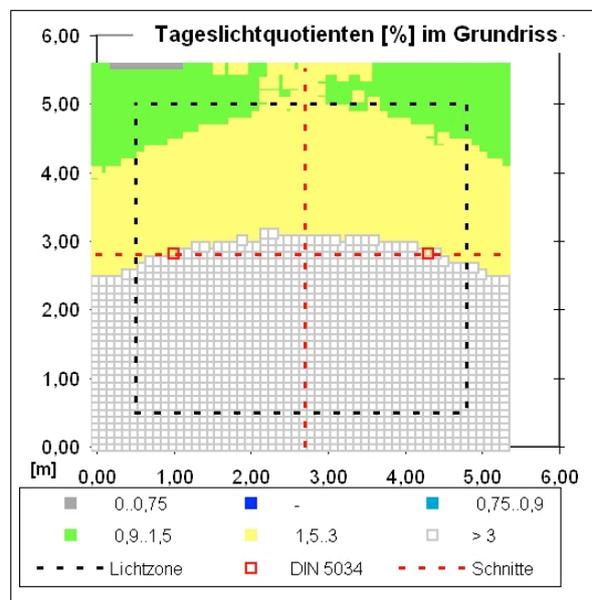
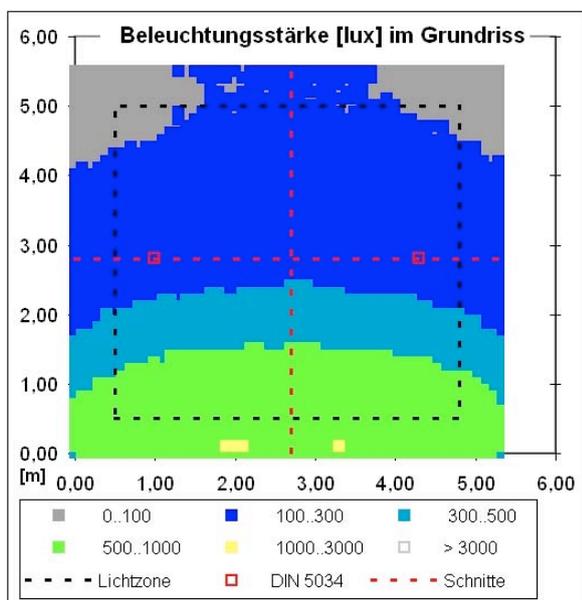


Abbildung 33: 02 Oslo

Für die Tageslichtnutzung beim angenommenen Nutzungsmuster (= Nutzungswahrscheinlichkeiten für jede Stunde des Tages) ergeben sich abhängig vom geographischen Breitengrad maximal mögliche Tageslichtnutzungen (= gebäudeunabhängig, „im Freien“) und gebäudeabhängige Potentiale, die wie folgt genutzt werden:

Variante Nr.	Ort (geographische Breite)	Ausschließliche Tageslichtnutzung (%)	Differenz zu Standardvariante	erweiterte Tageslichtnutzung bei gedimmter Beleuchtung (%)	Differenz zu Standardvariante	maximale Tageslichtnutzung „im Freien“ (%)
03	Athen	78,5	+11,9	88,5	+8	96,8
01	<b>Wien (Standard)</b>	66,6		80,5		93,4
04	Hamburg	54,7	-11,9	72,6	-7,9	88,6
02	Oslo	54,1	-12,5	69,5	-11	88,4

Tabelle 4: Tageslichtnutzung in % der jährlichen Büronutzungsdauer in Abhängigkeit vom Lichtangebot in verschiedenen geographischen Breiten

Der Nachteil bei der Tageslichtnutzung an nördlichen (bzw. polnahen) Orte liegt in den langen Sommertagen, die durch die üblichen Bürozeiten nicht ausgenutzt werden können und den kurzen Wintertagen, die nur eine geringe Tageslichtnutzung erlauben.

### 3.1.2. Äußere Verschattung durch Bebauung

Ausgehend von dem Wiener Büro (ohne Verschattung) wird der Effekt äußerer Verschattung durch Bebauung simuliert. Der Höhenwinkel, unter dem der Himmel durch Bebauung verdeckt wird, nimmt zu mit

- zunehmender Höhe der gegenüberliegenden Bauten oder Geländeformationen
- mit abnehmendem Abstand dieser Hindernisse zur betrachteten Fassade
- mit abnehmender Höhenlage des Fensters, vom obersten Stockwerk bis zum Erdgeschoß.

Die Wirkung ist drastisch!

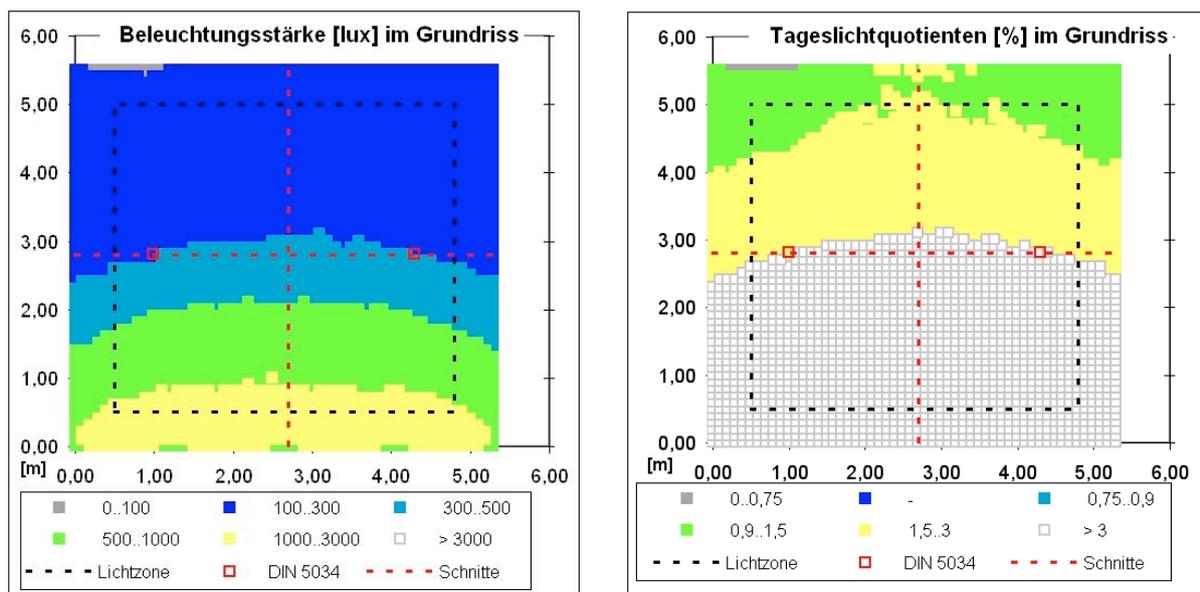


Abbildung 34: 01 keine Bebauung

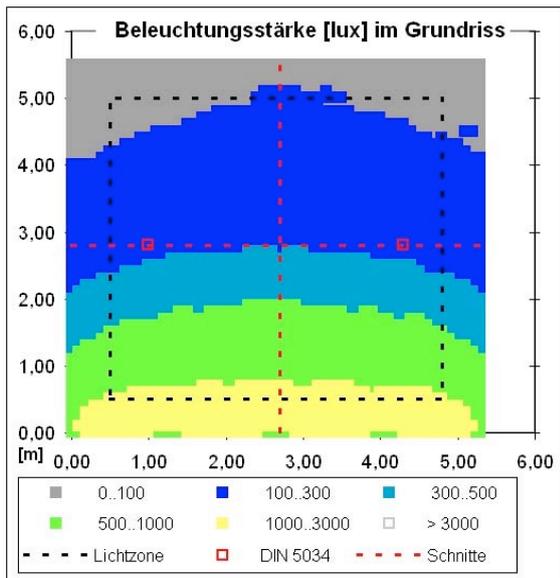


Abbildung 35: 12 Bebauung 15 °

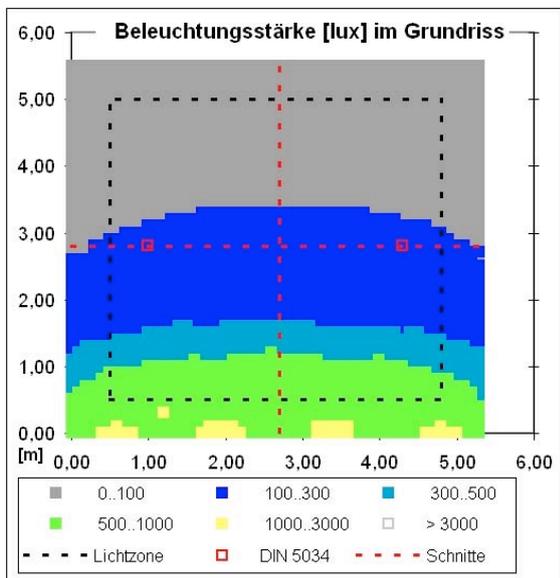
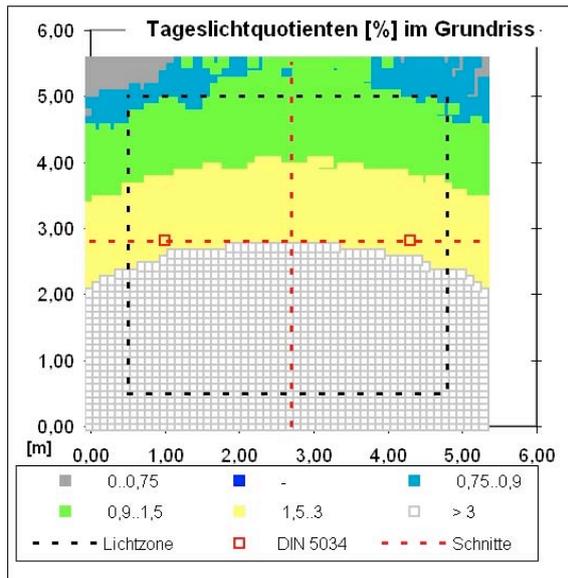


Abbildung 36: 13 Bebauung 30 °

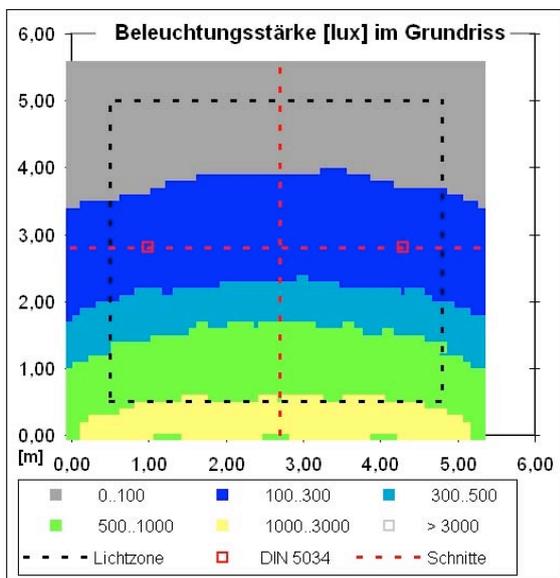
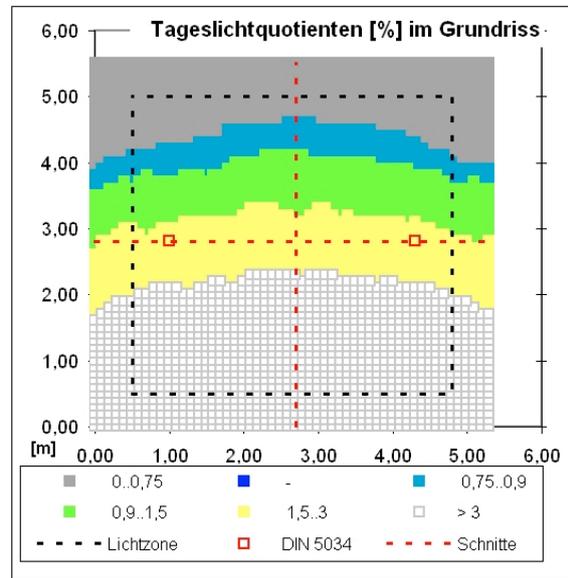
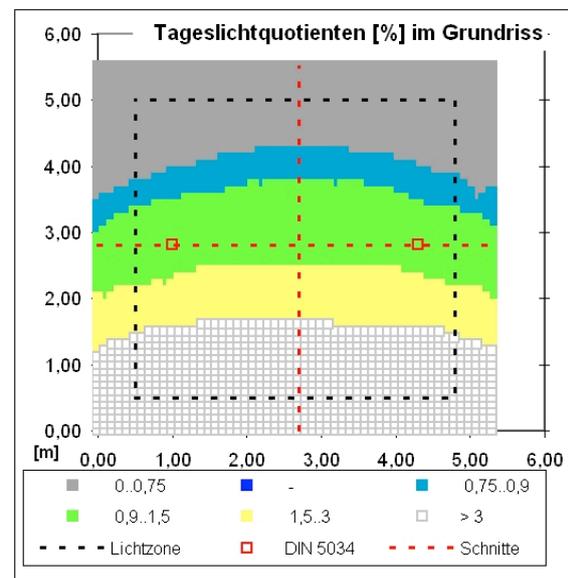


Abbildung 37: 06 Bebauung 45 °



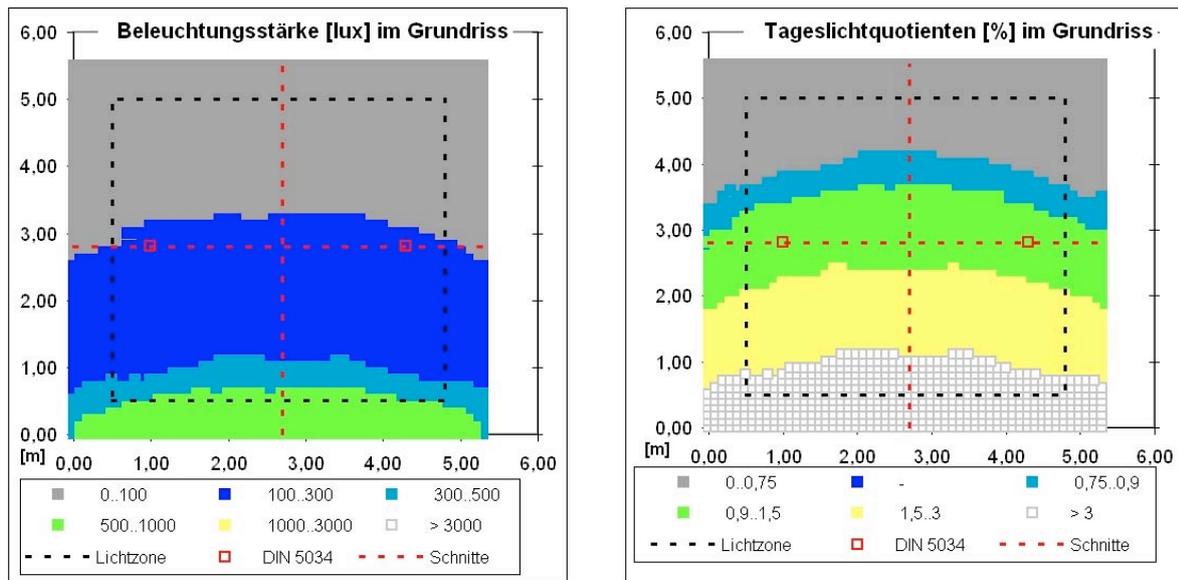


Abbildung 38: 05 Bebauung 60 °

Variante Nr.	Varianten- kennzeichen	TQ > 3 bis in eine Raumtiefe von [m]	TQ > 2 bis in eine Raumtiefe von [m]	TQ < 0,9 ab einer Raumtiefe von [m]
01	keine Bebauung	3	4	-
12	Bebauung 15 °	2,8	3,4	5
13	Bebauung 30 °	2,3	2,8	4
06	Bebauung 45 °	1,5	2	3,6
05	Bebauung 60 °	1,2	1,8	3,5

Tabelle 5: Reichweite horizontaler Tageslichtquotienten in die Tiefe des Raums in Abhängigkeit von äußerer Verschattung

Für die Tageslichtnutzung bedeutet dies

Varian- te Nr.	Varianten- kennzeichen	Ausschließ- liche Tages- lichtnutzung (%)	Differenz zu Standard- variante	erweiterte Tageslichtnut- zung bei ge- dimmter Be- leuchtung (%)	Differenz zu Standard- variante	No-Sky-Line schneidet Referenzebene 85 cm in der Raumtiefe (m)
01	keine Bebauung	66,6	-	80,5	-	-
12	Bebauung 15 °	61,1	-5,5	78,0	-2,5	(8,02) = außerhalb des Raumes
	Bebauung 21 °					5,6
13	Bebauung 30 °	45,1	-21,5	71,2	-9,3	3,72
	Bebauung 37,52 °					2,8
06	Bebauung 45 °	20,9	-45,7	56,6	-24	2,15
05	Bebauung 60 °	18,5	-48,1	54,2	-26,3	1,24

Tabelle 6: Tageslichtnutzung in % der jährlichen Büronutzungsdauer in Abhängigkeit von äußerer Verschattung

Ein Bebauungswinkel von weniger als 15 ° beeinträchtigt die Tageslichtnutzung noch wenig. Darüber nimmt die Tageslichtnutzung schnell ab, besonders schnell im Intervall 30–45 °. Bei Winkeln größer 45 ° passiert nicht mehr viel (es ist fast alles schon passiert). Dennoch ist in unserem Modellraum Tagesbelichtung lt DIN 5034 auch bei 60 ° Verbauungswinkel noch gegeben.

Die Abhängigkeit der Stromersparnis durch Tageslichtnutzung scheint eine S-förmige Abhängigkeit vom Winkel der Bebauung zu haben. Die beiden Punkte der größten Änderung der Stromersparnis pro Grad Bebauungswinkel könnten bei 21 ° und bei 37,52 ° liegen, das sind die Punkte, wo die No-Sky-Line die Referenzebene (85 cm) an der Rückwand des Raumes (21 °) bzw. in der halben Raumtiefe schneidet (37,52 °).

Die No-Sky-Line ist die gedachte Linie (eigentlich: Ebene!) von der Oberkante der gegenüberliegenden Bebauung zur Oberkante des betrachteten Fensters, deren Verlängerung ins Rauminnere das Raumvolumen diagonal in zwei Teile teilt: Vorne-unten, von wo aus der freie Himmel zu sehen ist und oben-hinten, von wo aus der freie Himmel nicht zu sehen ist.

Ein wesentlicher Faktor für die Tageslichtversorgung ist also durch die äußere Verschattung gegeben, die aber im urbanen Bereich in Abwägung mit Lagevorteilen häufig in Kauf genommen wird.

### 3.1.3. Bandfenster, Vollverglasung – ist weniger mehr?

Vollverglasung ist Architekturmode. Wie effizient ist das Tageslicht für die Raumbelichtung, das unterhalb der Höhe des Parapets (85 cm) einfällt?

Die Verteilung der Tageslichtquotienten am Grundriss ist sehr ähnlich. Die Variante mit Vollverglasung bietet in der Tiefe des Raum etwas bessere Belichtung.

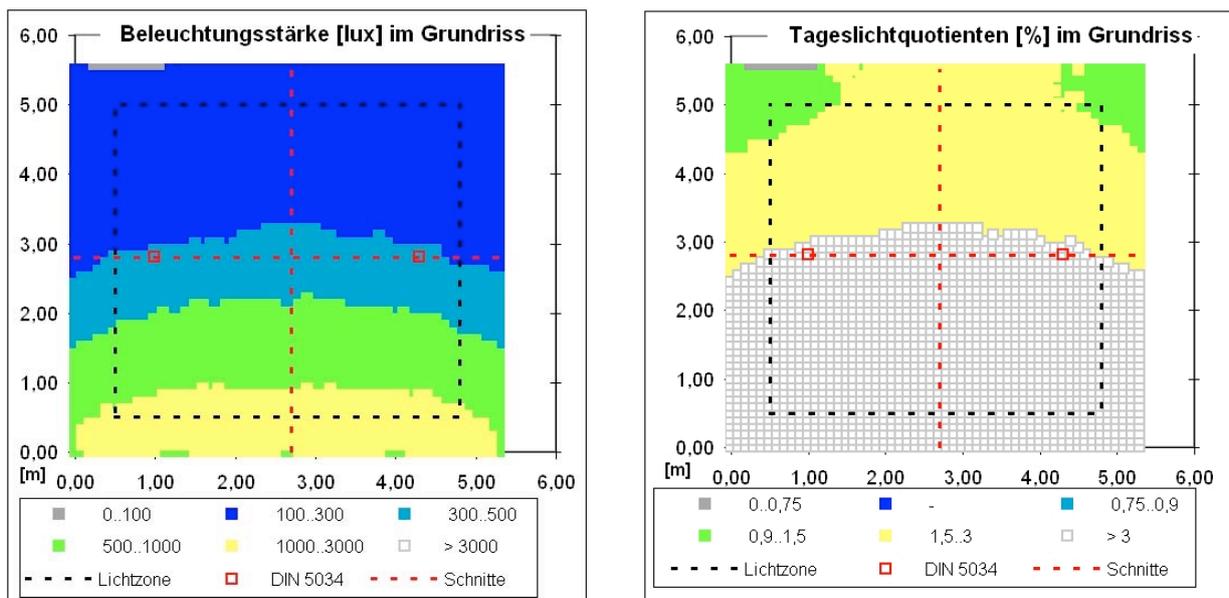


Abbildung 39: 07 Vollverglasung

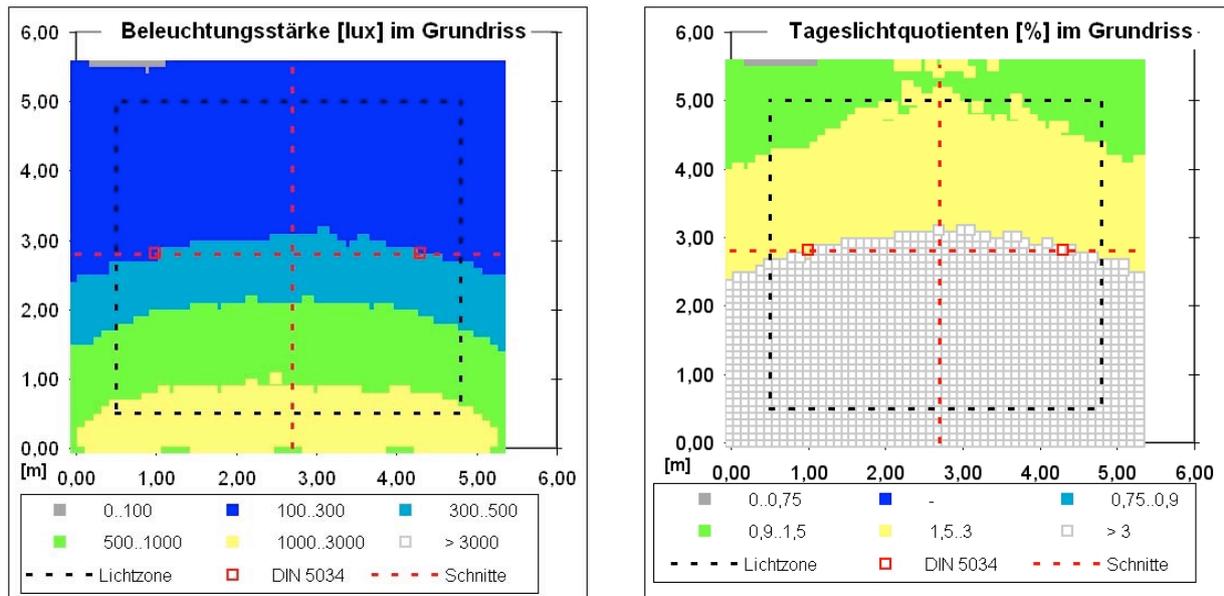


Abbildung 40: 01 Bandfenster

Bei der Tageslichtnutzung ist der Unterschied sehr klein. Die Vergrößerung der Verglasungsfläche eines Bandfensters um 40 % auf eine Vollverglasung verbessert die Stromersparnis für Beleuchtung nur um 1,2 %. Umgekehrt: bei Verminderung der Verglasungsfläche von einer Vollverglasung um 25 % auf ein Bandfenster geht nur 1,2 % der Tageslichtnutzung verloren. (Vergleiche damit die Wirkung der Veränderung der Fensterposition durch einen Sturz in den folgenden Simulationen).

Variante Nr.	Variante-kennzeichen	Ausschließliche Tageslichtnutzung (%)	Differenz zu Standardvariante	erweiterte Tageslichtnutzung bei gedimmter Beleuchtung (%)	Differenz zu Standardvariante
07	Vollverglasung	67,8	+1,2	81,4	+0,9
01	Fensterband	66,6	-	80,5	-

Tabelle 7: Tageslichtnutzung in % der jährlichen Büronutzungsdauer bei Vollverglasung oder Bandfenstern

Mit einer besseren Tageslichtversorgung und den resultierenden Beleuchtungsstromersparnissen ist eine Vollverglasung nicht zu rechtfertigen. Sie hat aber Vorteile bei Situationen wie Wohnzimmer oder Versammlungsräume, wenn die Tagesbelichtung des Fußbodens (nicht nur der Arbeitsebene in Höhe 85 cm) direkt ab Fenster gewünscht ist.

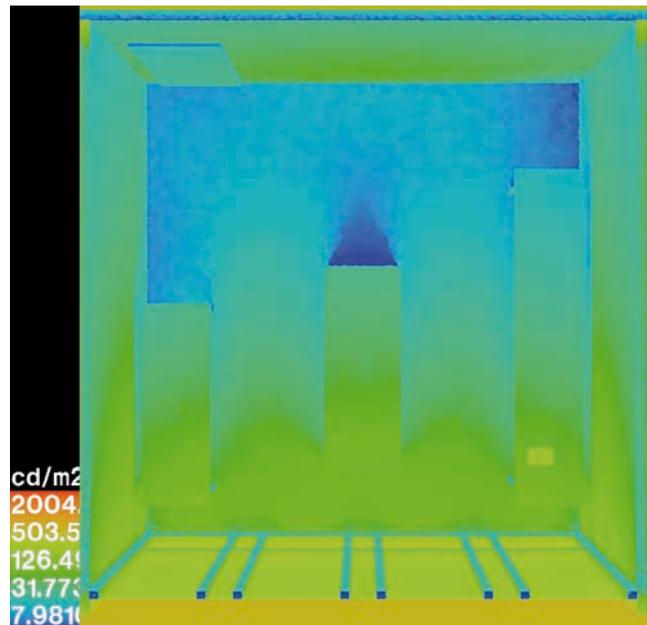


Abbildung 41: 07 Vollverglasung

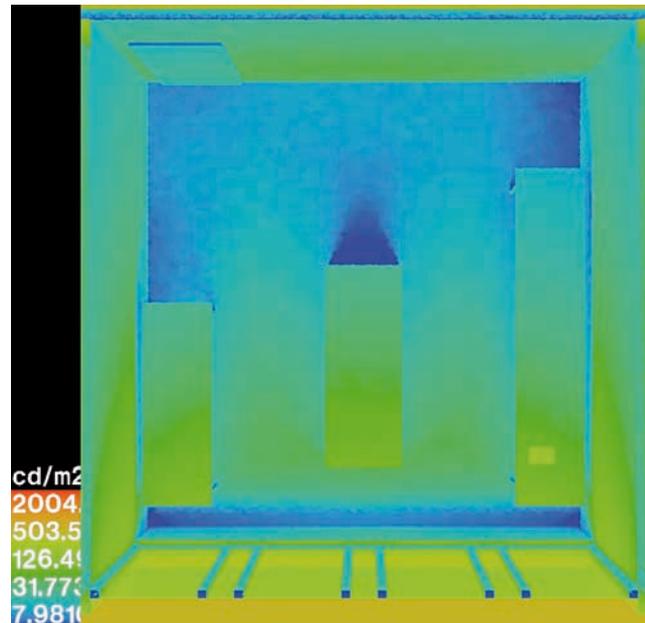


Abbildung 42: Abbildung: 01 Bandverglasung

### 3.1.4. Fenster ohne und mit Sturz

Wird die Verglasung jedoch nicht von unten eingeschränkt, durch ein Parapet von 85 cm Höhe, sondern von oben durch einen Fenstersturz von 40 cm Dicke, ist der Verlust an Tageslicht viel deutlicher.

Gegenüber der Basisvariante ohne Sturz weicht die Zone mit  $TQ > 3$  um etwa 50 cm zurück,  $TQ = 2$  wird schon nach 3 m statt nach 4 m erreicht und in den rückwärtigen Raumecken bilden sich Zonen, die mit  $TQ < 0,9$  nicht mehr tagesbelichtet nach DIN 5034 gelten können.

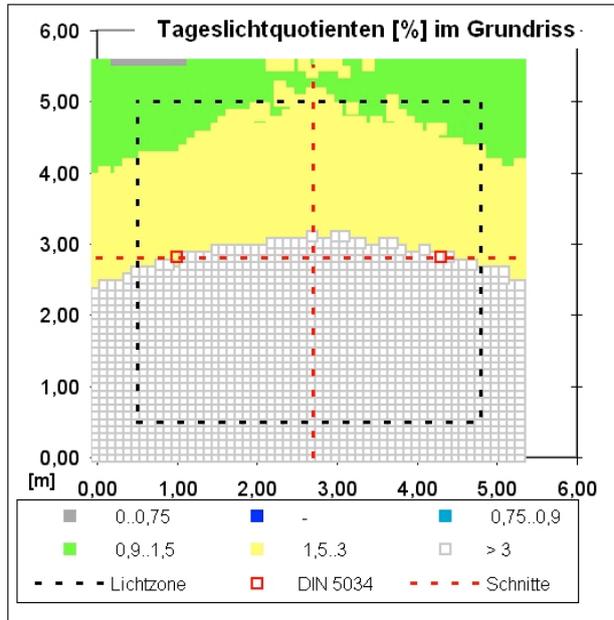
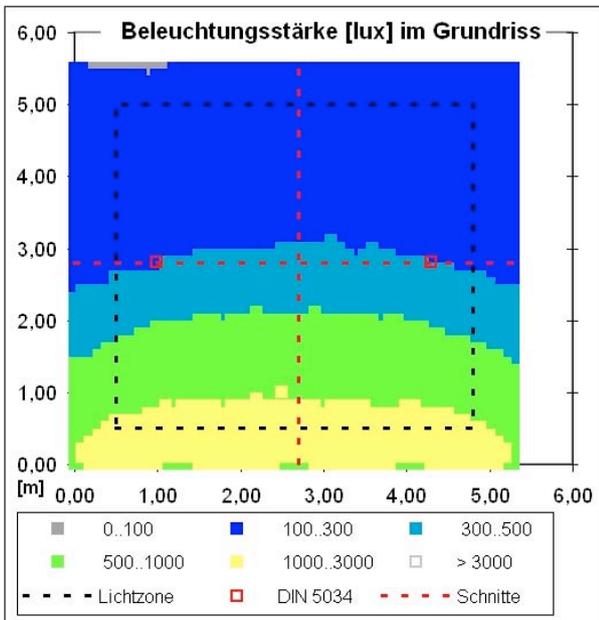


Abbildung 43: 01 Bandfenster, kein Sturz (Standard)

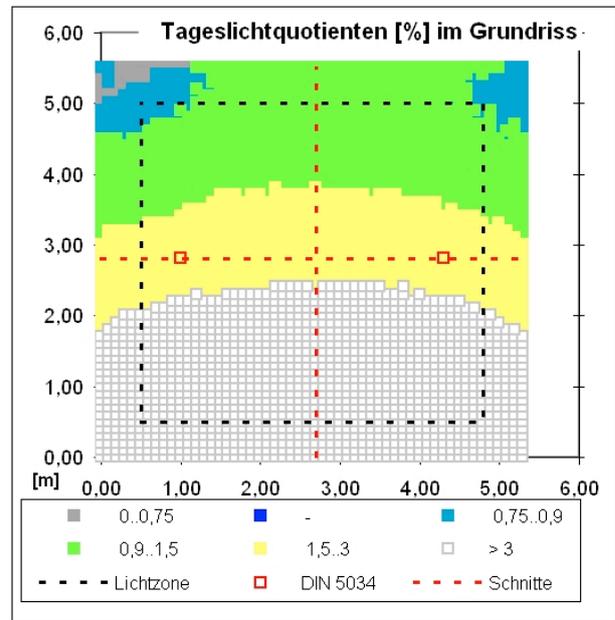
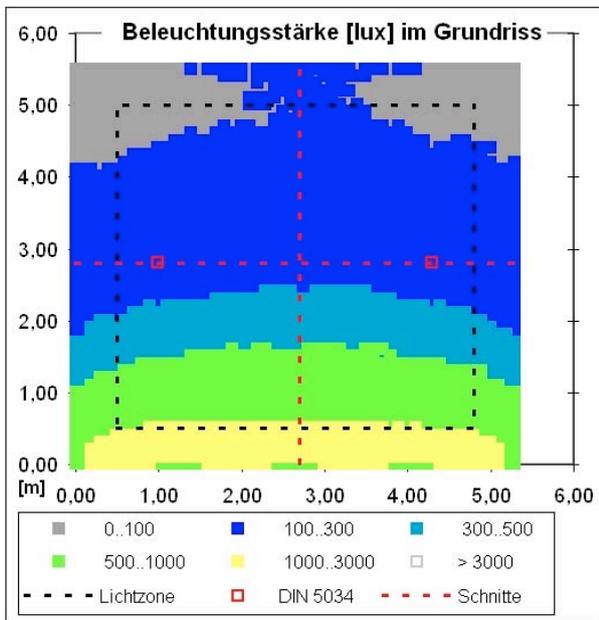


Abbildung 44: Abbildung: 08 Bandfenster, 31,3 %, Sturz 40 cm

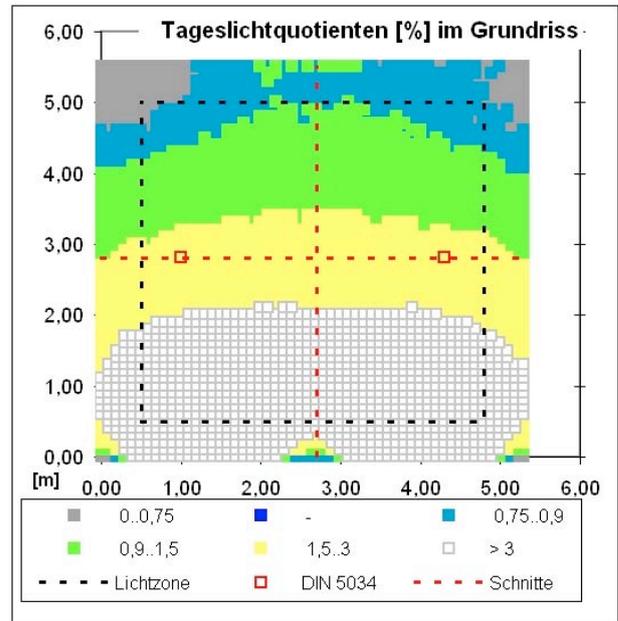
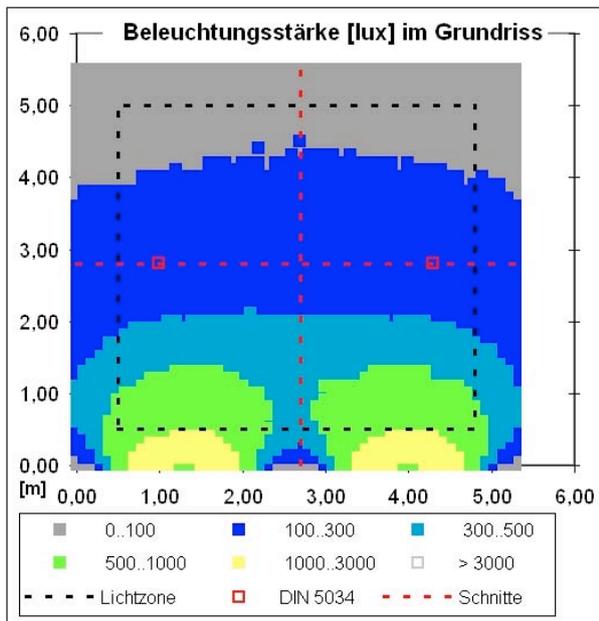


Abbildung 45: 17 Lochfassade 20 %. kein Sturz

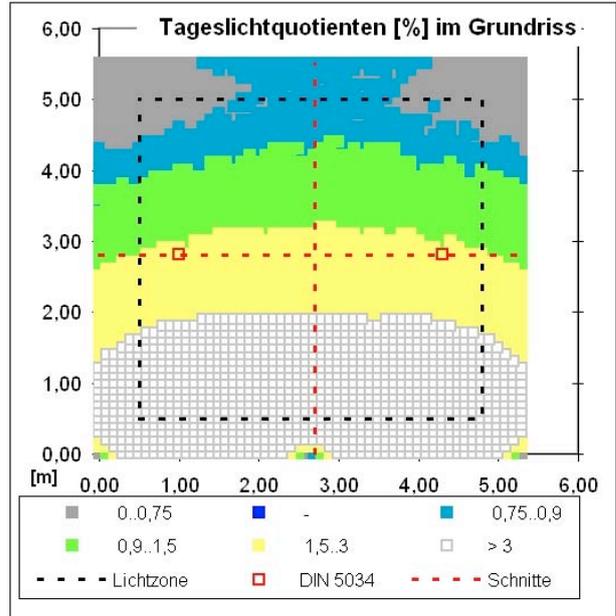
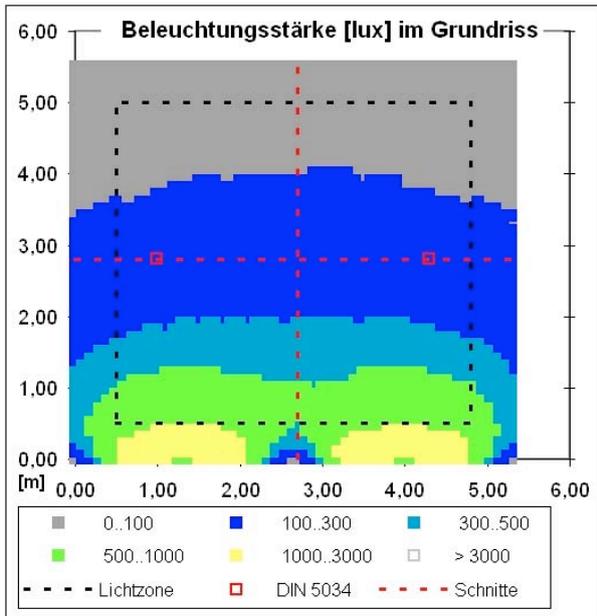


Abbildung 46: 16 Lochfassade 20 %, 40 cm Sturz

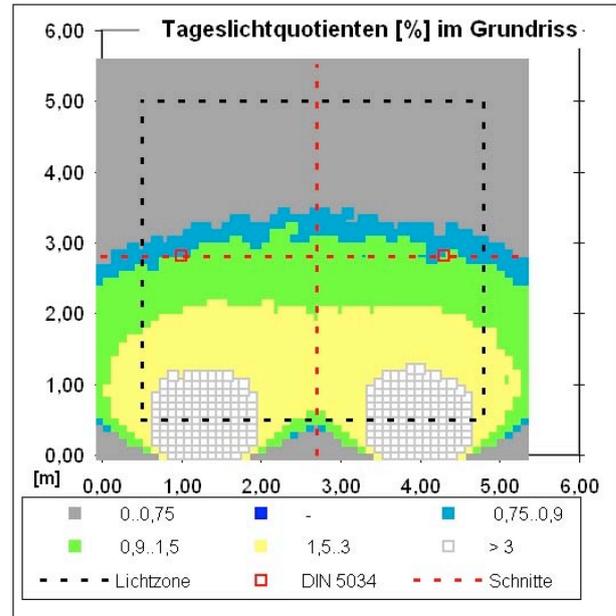
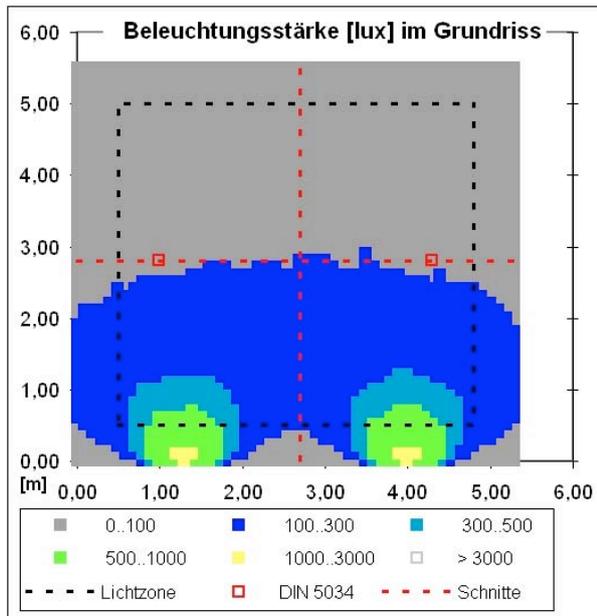


Abbildung 47: 15 Lochfassade 10 %, kein Sturz

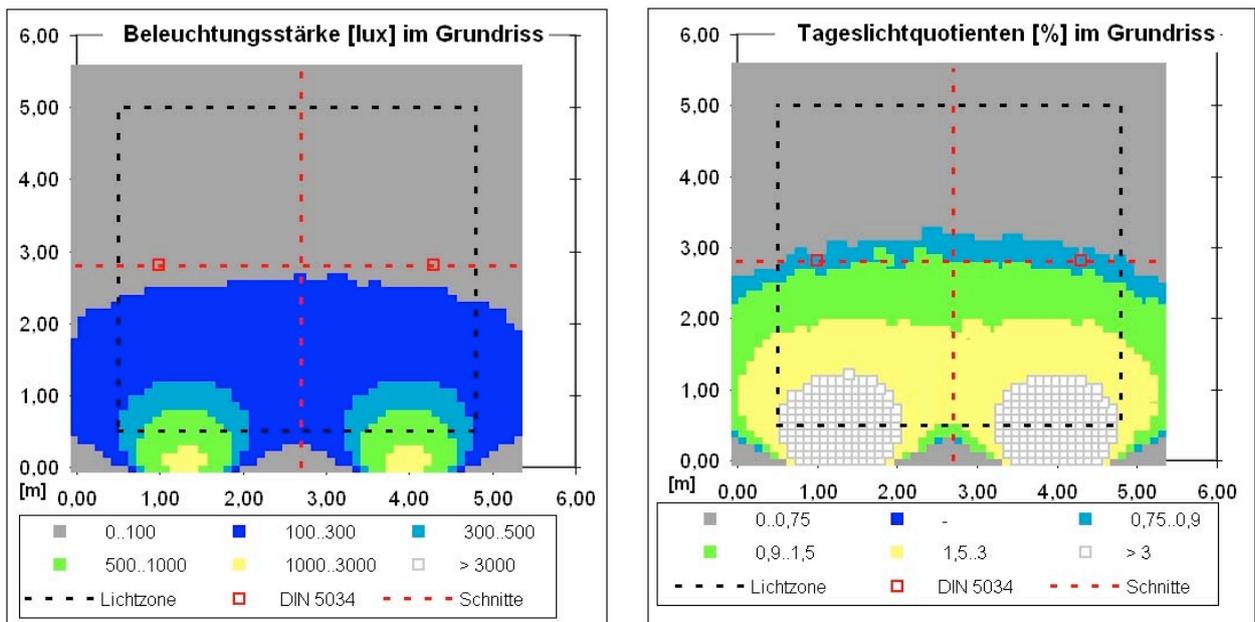


Abbildung 48: Abbildung: 14 Lochfassade 10 %, 40 cm Sturz

Die Tageslichtnutzung zeigt einen Effekt des 40 cm dicken Fenstersturzes oben, der rund 10mal so groß ist wie der Effekt eines 85 cm Parapets.

Allerdings ist die Fensterfläche der Variante mit Sturz um die Fläche des Sturzes geringer (31,3 % der Grundfläche, gegenüber 38,4 %)

Variante Nr.	Varianten- kennzeichen	Ausschließliche Tageslicht- nutzung (%)	Differenz zu Standard- variante	erweiterte Tageslichtnutzung bei gedimmter Beleuchtung (%)	Differenz zu Standard- variante
01	<b>Bandfenster 38,4 %, kein Sturz</b>	66,6	-	80,5	-
08	Bandfenster, 31,3 %, Sturz 40 cm	53,8	-12,8	74,8	-5,7
17	Lochfassade 20 %, Kein Sturz	44	-22,6	71	-9,5
16	Lochfassade 20 %, 40 cm Sturz	36,8	-29,8	67,7	-12,8
15	Lochfassade 10 %, kein Sturz	10,1	-56,5	46,2	-34,3
14	Lochfassade 10 %, 40 cm Sturz	6,6	-60,0	42,6	-37,9

*Tabelle 8: Tageslichtnutzung in % der jährlichen Büronutzungsdauer in Abhängigkeit von Fenstergröße (in % der Grundfläche) und Fensterposition (Sturz oder sturzfrei)*

Deswegen werden auch Varianten mit Lochfenstern verglichen, die sich durch einen Sturz unterscheiden, dabei aber dieselbe (20 % oder 10 % der Grundfläche) besitzen.

Dieselbe Fensterfläche, nur günstiger positioniert (ohne Sturz) generiert bei 20 % Fensterfläche eine Stromersparnis/Tageslichtnutzung von 44–36,8 % = 7,2 % und bei 10 % Fensterfläche eine Stromersparnis/Tageslichtnutzung von 10–6,6 % = 3,4 %.

### 3.1.5. Die Wirkung der Verglasungsfläche: Von der Vollverglasung bis zur Minimalverglasung

Ausgehend von Vollverglasung kann man die Wirkung einer Einschränkung der Verglasungsfläche durch Übergang zu einer Lochfassade untersuchen. Wird die Tageslichtnutzung linear mit der Verglasungsfläche abnehmen? Nein, sondern erst langsam, dann immer stärker.

Variante Nr.	Variantenkennzeichen	Fläche Verglasung pro Fläche Raum [%]	Ausschließliche Tageslicht- nutzung (%)	erweiterte Tageslichtnutzung bei gedimmter Beleuchtung (%)
7	Vollverglasung	53,6	67,8	81,4
1	<b>Bandfenster, kein Sturz</b>	38,4	66,6	80,5
	Lochfassade 30 %, kein Sturz	30		
17	Lochfassade 20 %, Kein Sturz	20	44	71
15	Lochfassade 10 %, kein Sturz	10	10,1	46,2

*Tabelle 9: Tageslichtnutzung in % der jährlichen Büronutzungsdauer in Abhängigkeit von der Fenstergröße, alle Varianten sturzfrei*

Erst bei 10 % Verglasungsfläche ist das Tageslicht-Kriterium nach DIN 5034 – Mittelwert TQ > 0,9 – nicht mehr erfüllt. Abbildungen siehe oben.

### 3.1.6. Dreifachverglasung und 2fach-Vakuumverglasung

Dreifachverglasung ist der Standard für Passivhausbauweisen. Zweifachverglasungen mit Vakuum statt Gasfüllung zwischen den Scheiben ist eine in Entwicklung befindliche Alternative mit Vorteilen beim Lichtdurchlass (73 statt 70 %).

Im TQ-Grundrissbild sind die Vorteile geringfügig aber sichtbar.

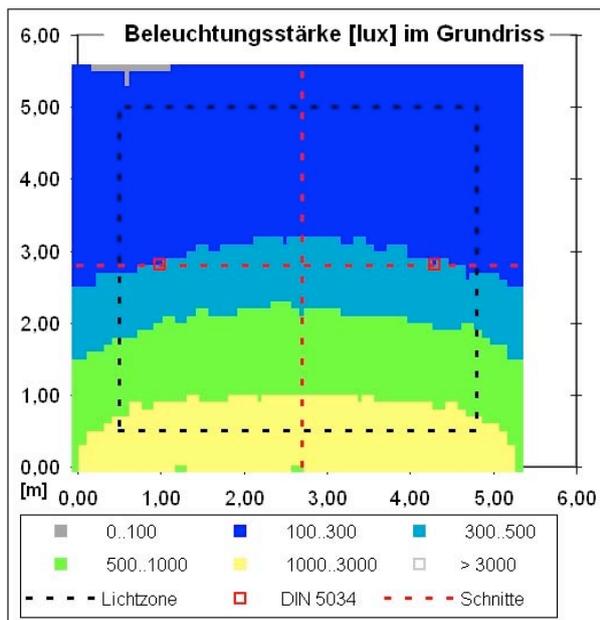


Abbildung 49: 09 2fach Vakuumverglasung

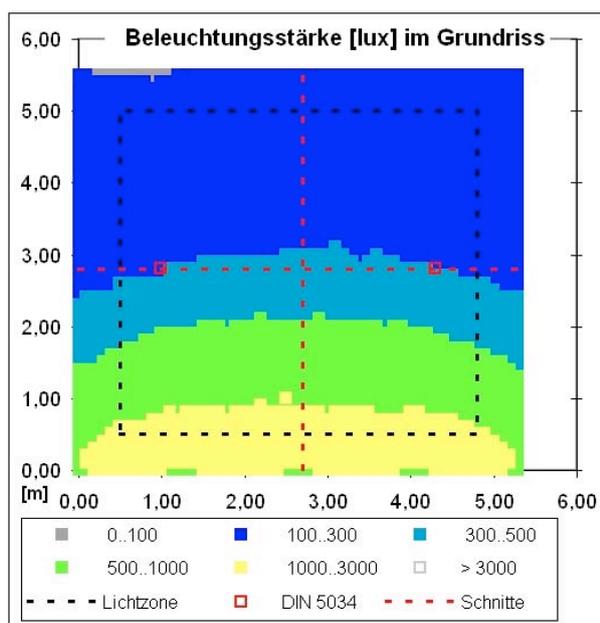
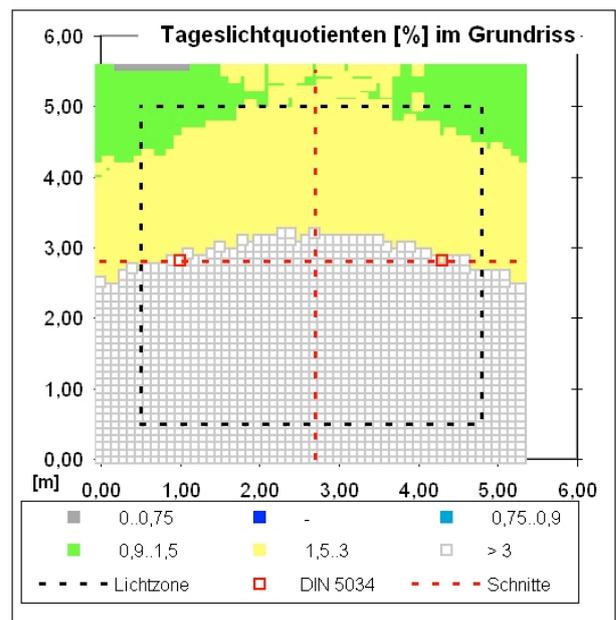
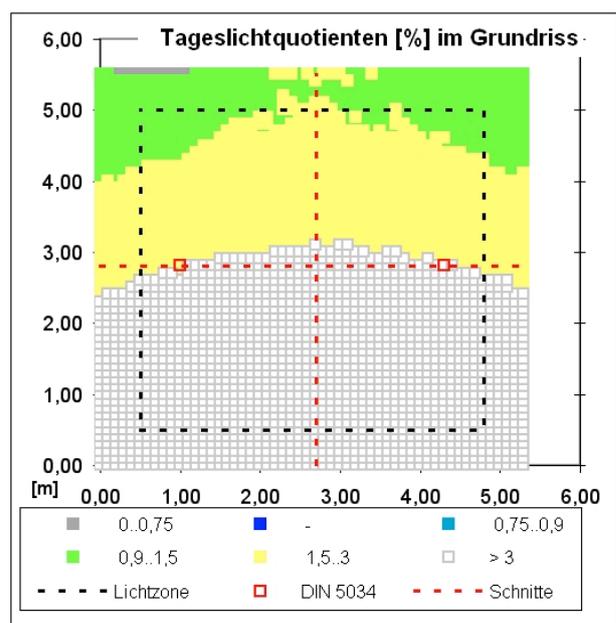


Abbildung 50: 01 3fach Verglasung (Standard)



Die Tageslichtnutzung zeigt minimal unterschiedliche Werte

Variante Nr.	Variantenkennzeichen	Ausschließliche Tageslichtnutzung (%)	Differenz zu Standardvariante	erweiterte Tageslichtnutzung bei gedimmter Beleuchtung (%)	Differenz zu Standardvariante
09	2fach-Vakuumverglasung	67,2	+0,6	81,1	+0,6
01	<b>3fach-Verglasung</b>	66,6	-	80,5	-

Tabelle 10: Tageslichtnutzung in % der jährlichen Büronutzungsdauer in Abhängigkeit von der Lichtdurchlässigkeit der Verglasung

### 3.1.7. Reflexionsgrade der Inneneinrichtung

Für die Basisvariante wurden durchschnittliche Reflexionsgrade von 20 % für den Boden, 50 % für die Wand und 80 % für die Decke angenommen. Wie ändern sich Tageslichtquotienten, wenn die Annahmen in Richtung heller oder dunkler abgewandelt werden?

heller: Reflexionsgrade Boden: 30 %; Wand: 65 %; Decke 85 %

dunkler: Reflexionsgrade Boden 10 %; Wand 40 %; Decke: 70 %

Die Wirkung der helleren Ausstattung ist sichtbar. Die Zone mit TQ < 1,5 zieht sich auf eine Ecke zurück, die TQ = 2-Linie wird erst in 4,5 m Raumtiefe (statt 4 m) geschnitten.

Ebenso sichtbar die Wirkung der dunkleren Ausstattung: Die TQ = 2-Linie wird schon ca. ab 3,75 m Raumtiefe (statt 4 m) geschnitten.

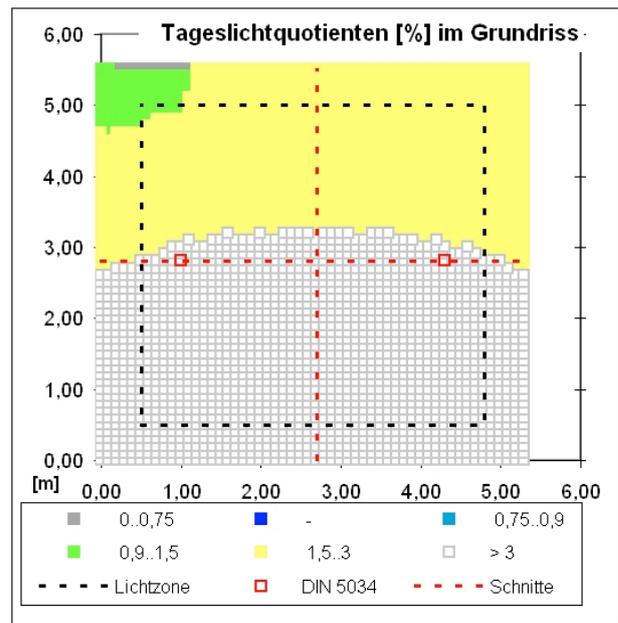
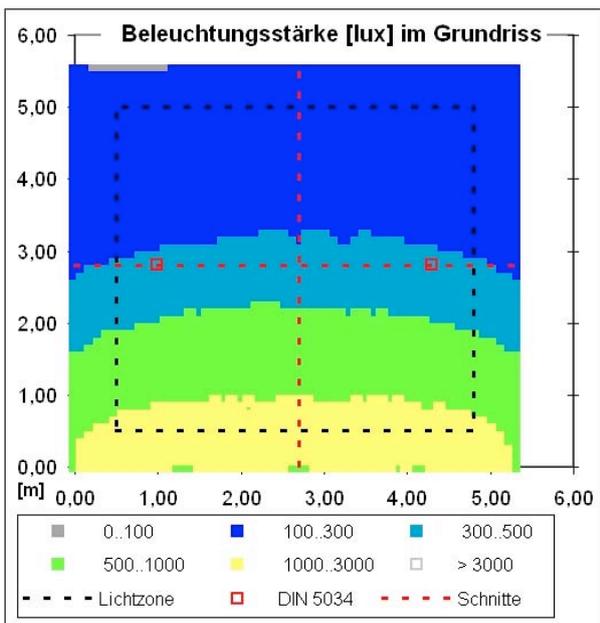
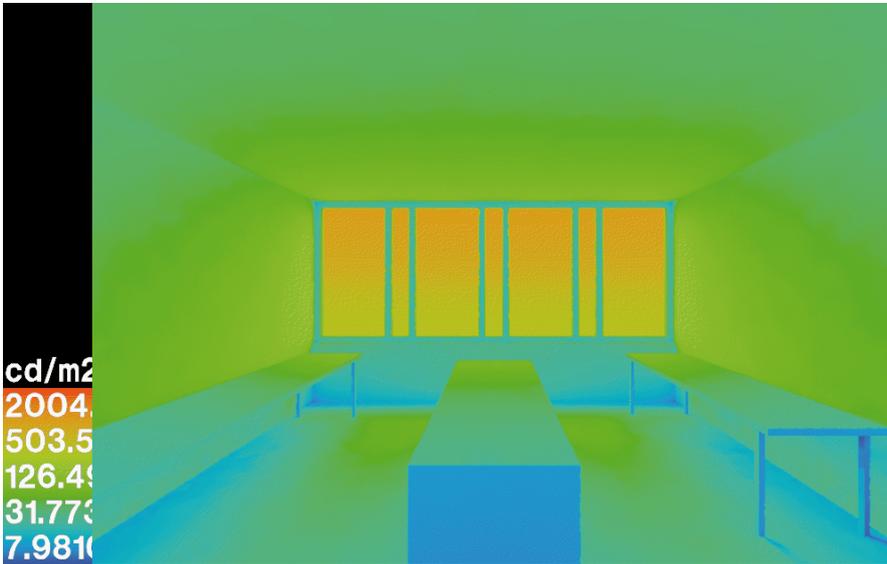


Abbildung 51: 10 Reflexion größer (B30, W65, D85)

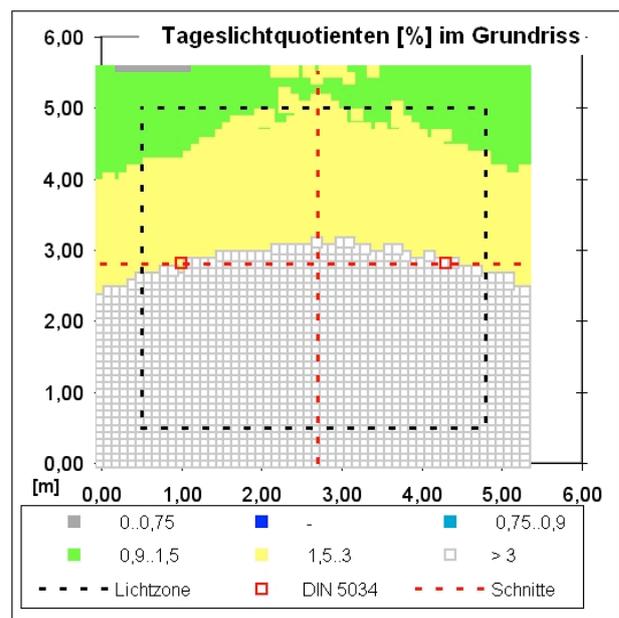
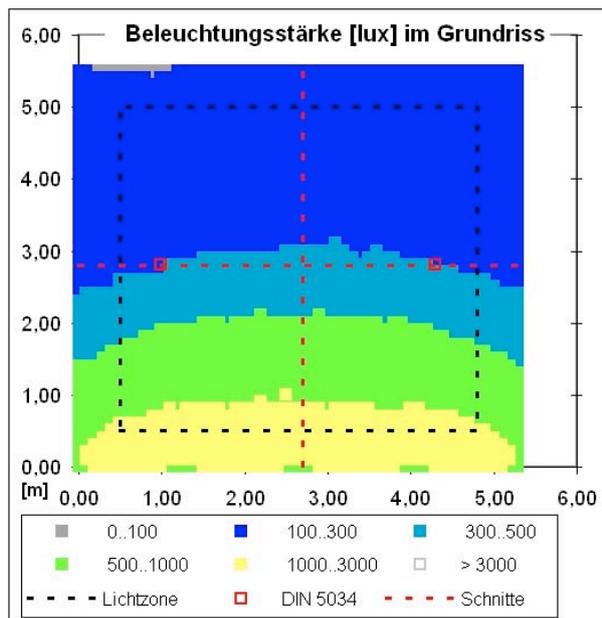
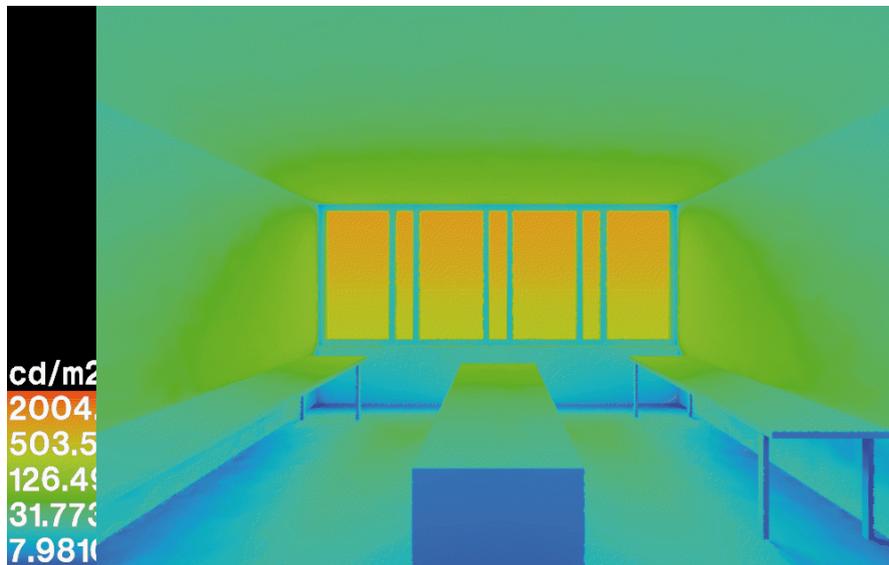


Abbildung 52: 1 Reflexion Standard (B20, W50, D80)

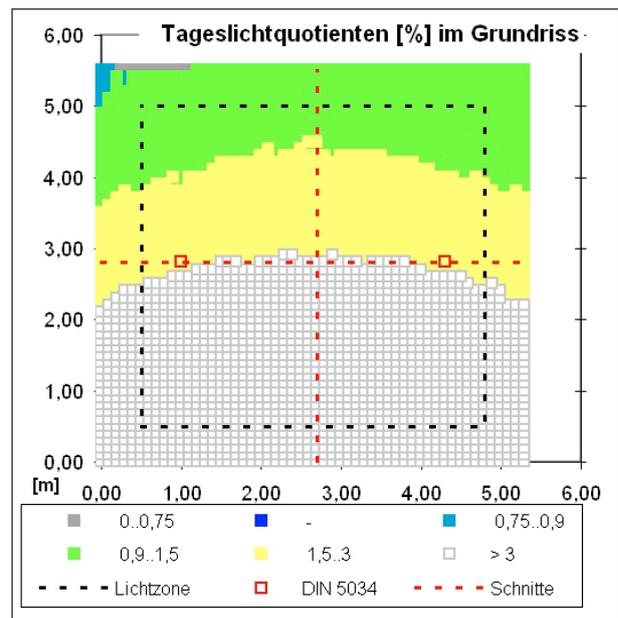
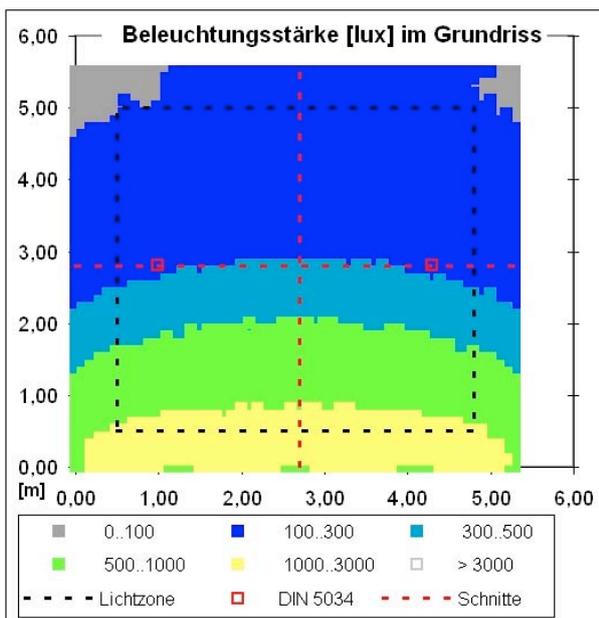
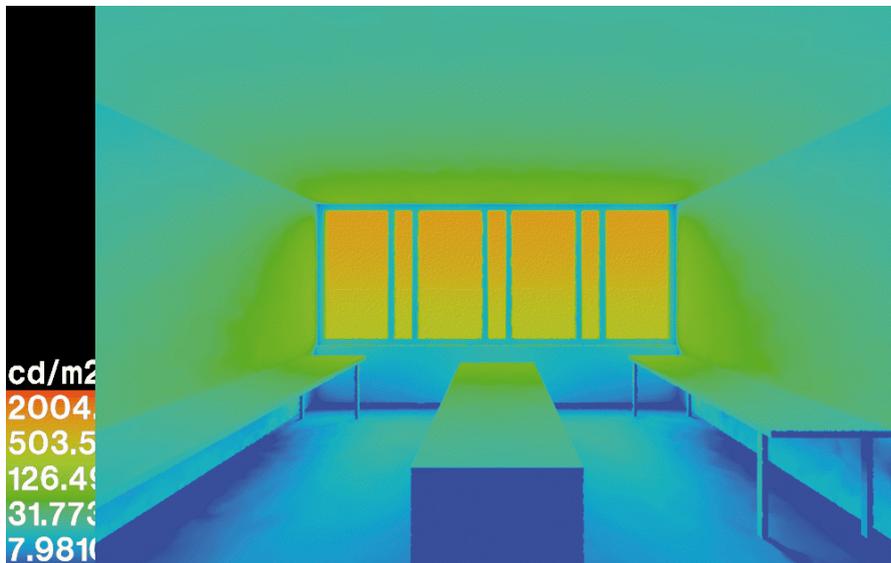
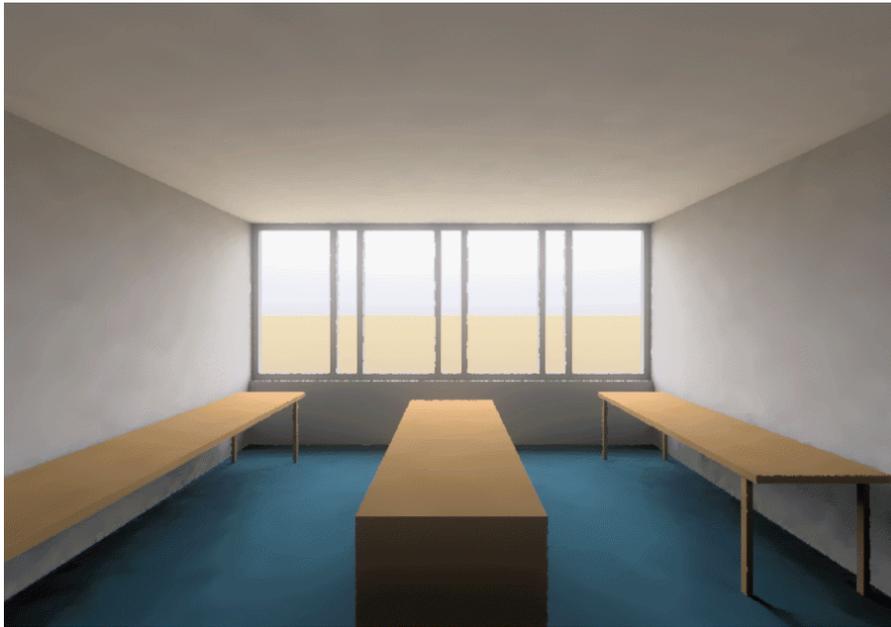


Abbildung 53: 11 Reflexion geringer (B10, W40, D70)

Variante Nr.	Variantenkennzeichen	Ausschließliche Tageslichtnutzung (%)	Differenz zu Standardvariante	erweiterte Tageslichtnutzung bei gedimmter Beleuchtung (%)	Differenz zu Standardvariante
10	Reflexion heller (B30, W65, D85)	69,3	+2,7	81,7	+1,2
1	<b>Reflexion Standard (B20, W50, D80)</b>	66,6	-	80,5	-
11	Reflexion dunkler (B10, W40, D70)	64,2	-2,4	79,2	-1,3

*Tabelle 11: Tageslichtnutzung in % der jährlichen Büronutzungsdauer in Abhängigkeit von den Reflexionsgraden der Innenoberflächen (B = Boden, W = Wand, D = Decke)*

Wie unten in der Zusammenschau (siehe Ergebnisse und Schlussfolgerungen) gezeigt, ist die hellere Inneneinrichtung eine wirksamere Maßnahme zur Verbesserung der Tageslichtversorgung als ein Ersatz der Bandfenster durch eine Vollverglasung.

## 3.2. Ergebnisse Besonnung und Sonnenschutz

### 3.2.1. Osten

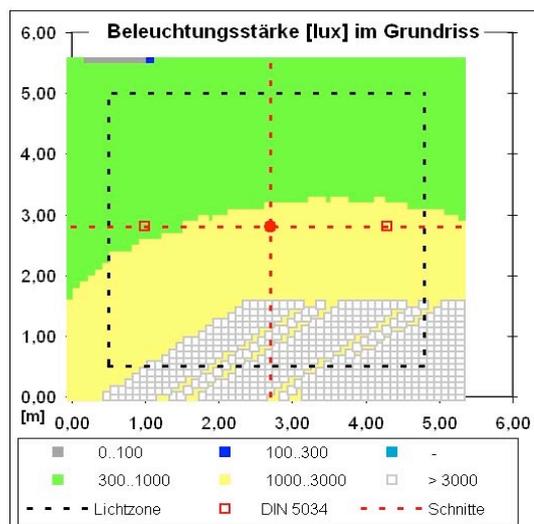
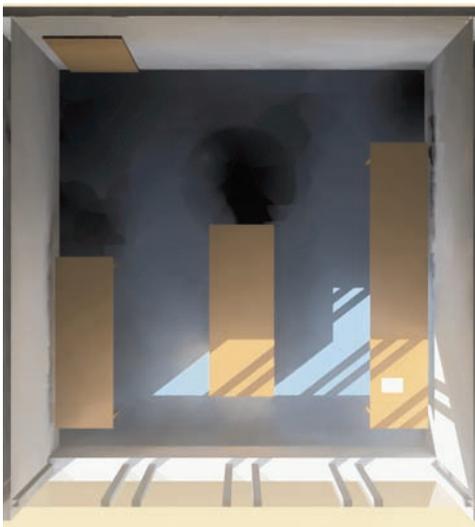
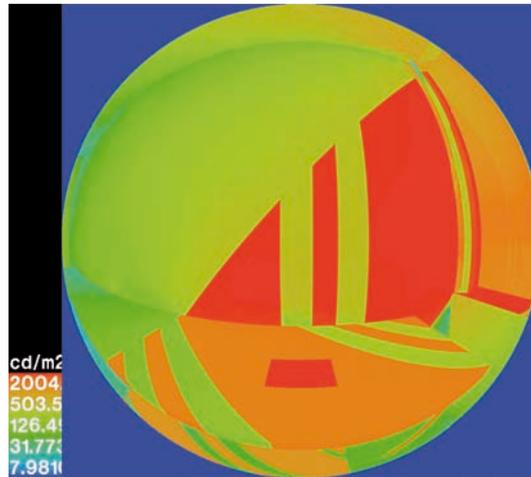


Abbildung 54: 20 Ost\_Sonne (21. März, 10 Uhr)

Bei Besonnung aus Osten am 21. März kommt es im Bereich bis 1,5 m ab Fenster zu Beleuchtungsstärken > 3000 lux, die sich um 10 Uhr schon asymmetrisch zeigen: Lichteinfall südöstlich.

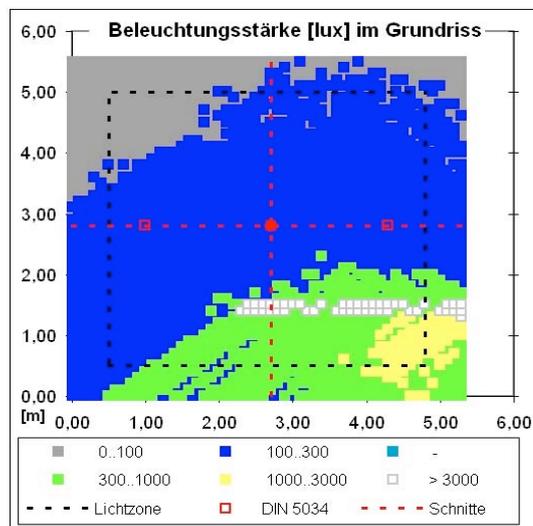
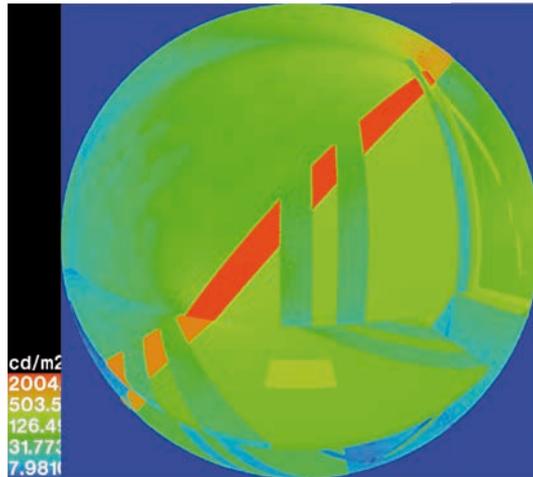
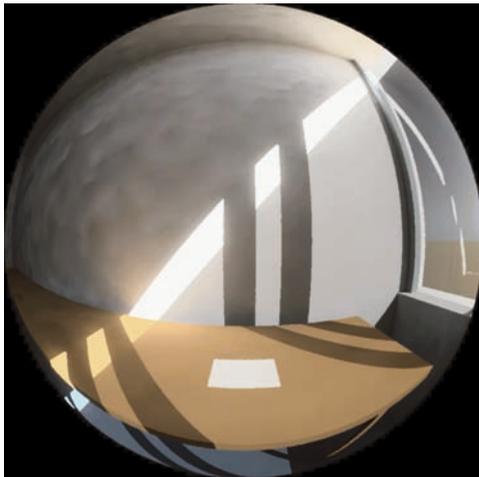


Abbildung 55: 36 Ost\_Rollo\_Sonne\_ 80 % geschlossen (21. März, 10 Uhr)

Diese Variante enthält eine Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit von 3 % auf 6 %. Die Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit ermöglicht noch immer keine gute Tagesbelichtung: Der tagesbelichtete Raumanteil reicht von Null Meter, in der südlichen Raumecke, bis 2 m in der nördlichen Raumhälfte mit einer Zone von blendenden Lichtflecken in 1,50 m Tiefe sowie schräg an der Wand im Blickfeld des dargestellten Arbeitsplatzes an der Nordwand. Dies wird durch das von unten nach oben zu 80 % geschlossene – und daher zu 20 % offene – Rollo verursacht, das den Raum in überbelichtete, gut belichtete und unterbelichtete Zonen aufteilt.

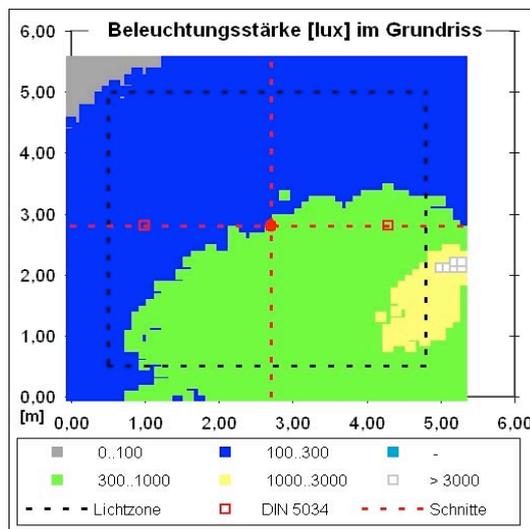
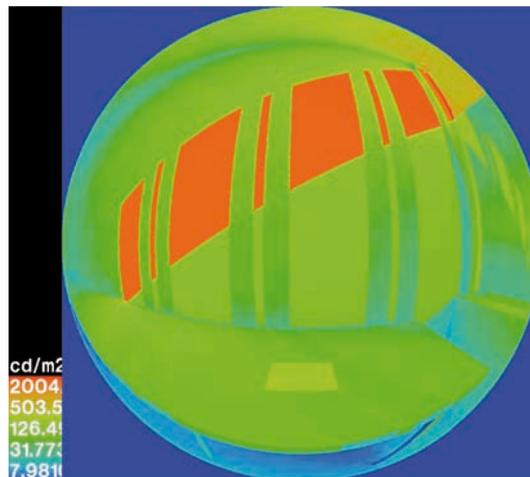


Abbildung 56: 37 Ost\_Rollo\_Sonne (21. Dez. 10 Uhr)

Bei Besonnung am 21. Dezember und einem zu 60 % geschlossenen Rollo entfällt die Starklichtzone in der Mitte des Raumes ganz, die ungenügende Belichtung im hinteren aber vor allem in der südlichen Hälfte des Raumes zeigt sich aber weiterhin.

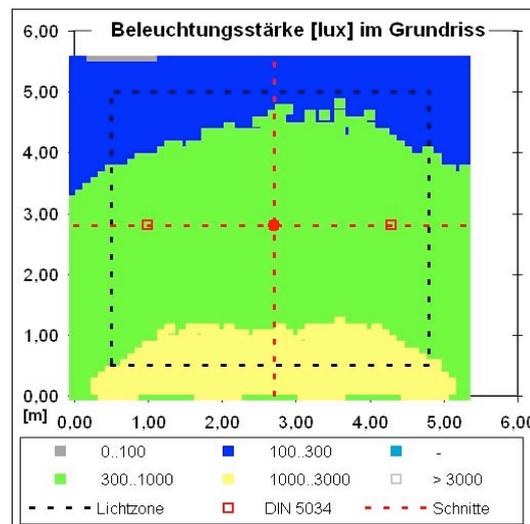
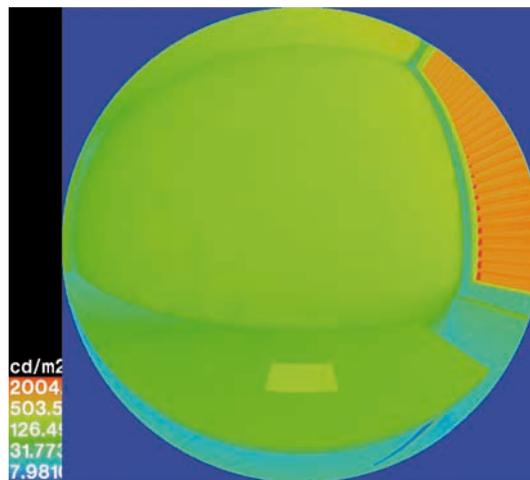
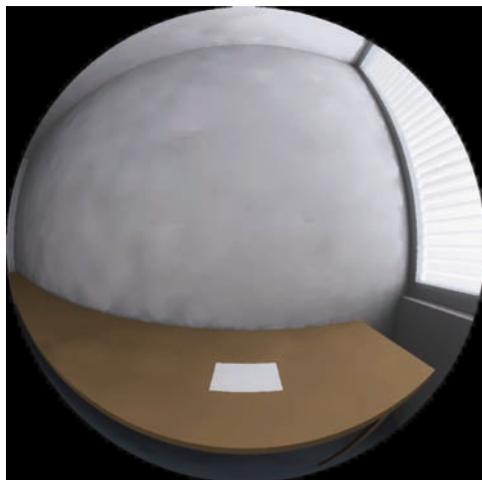


Abbildung 57: 38 Ost\_Lamellen\_Sonne (21. März, 10 Uhr

Jalousien zeigen ein wesentlich besseres Ergebnis. Ausreichende Belichtung bis in 4–5 m Raumtiefe, keine Blendung.

Jalousien scheinen auch an Ostfenstern die Sonnenschutzeinrichtung der Wahl zu sein. Nach Vorschreibung der Bauphysik, innen oder außen.

### 3.2.2. Süden

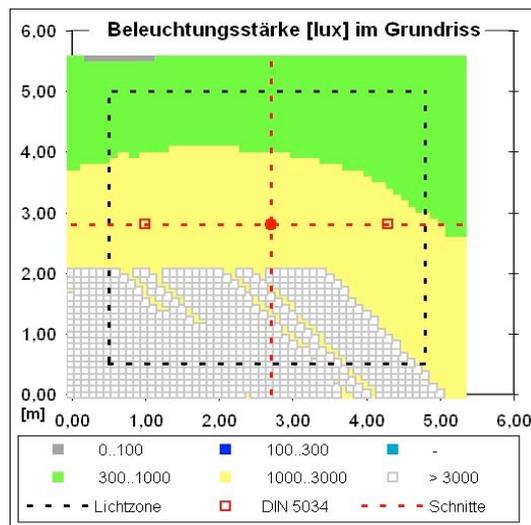
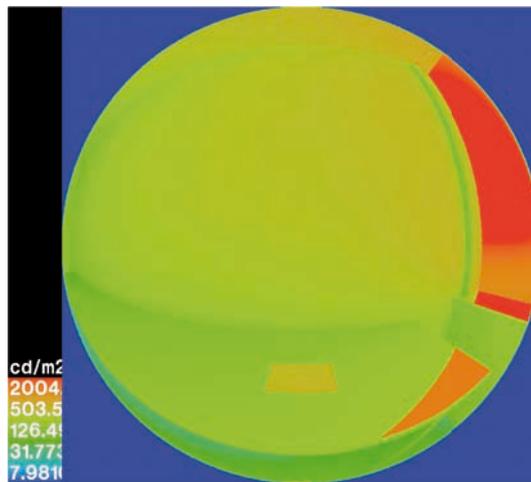
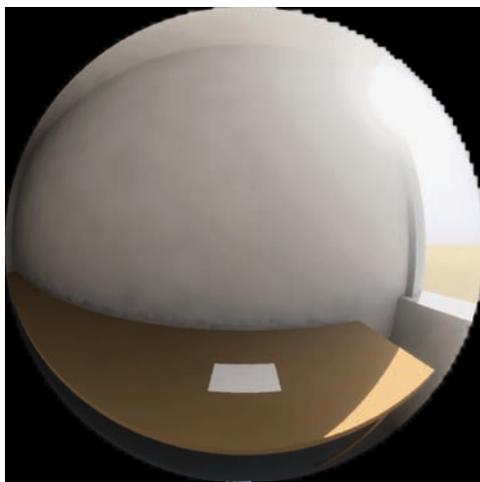
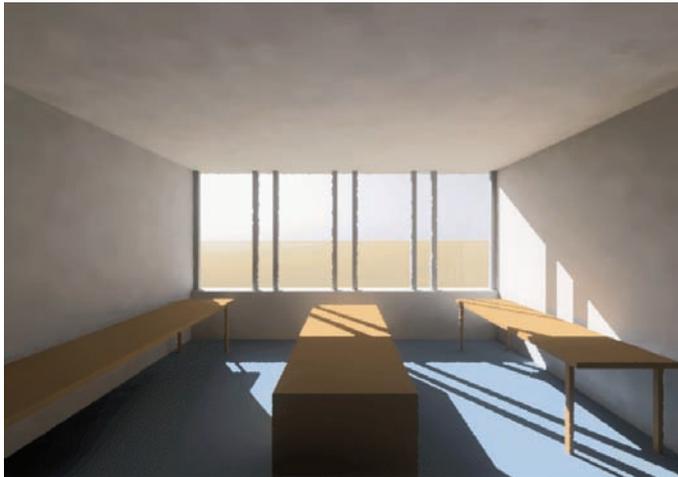


Abbildung 58: 18 Süd\_Sonne (21. März 10 Uhr)

Bei Besonnung aus Süden kommt es im fensternahen Bereich bis 2 m zu Beleuchtungsstärken > 3000 lux.

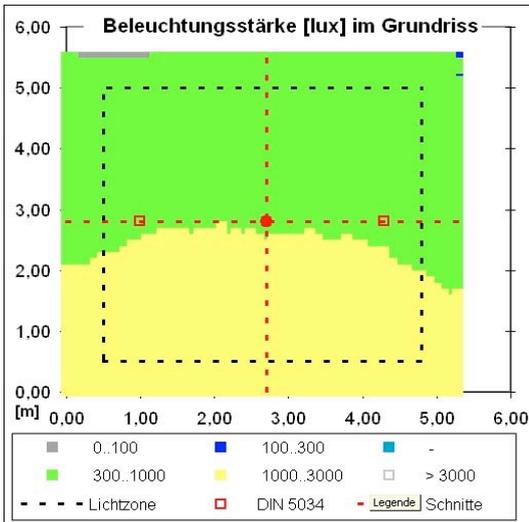
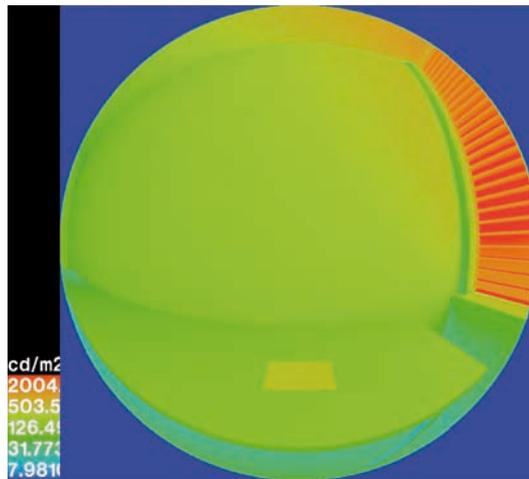


Abbildung 59: 27 Süd\_Lamellen\_Sonne (21. März, 10 Uhr)

Mit Lamellen wird die Beleuchtungsstärke in der fensternahen Raumhälfte auf < 3000 lux gesenkt, in der Raumtiefe sind 300–1000 lux gewährleistet: perfekt!

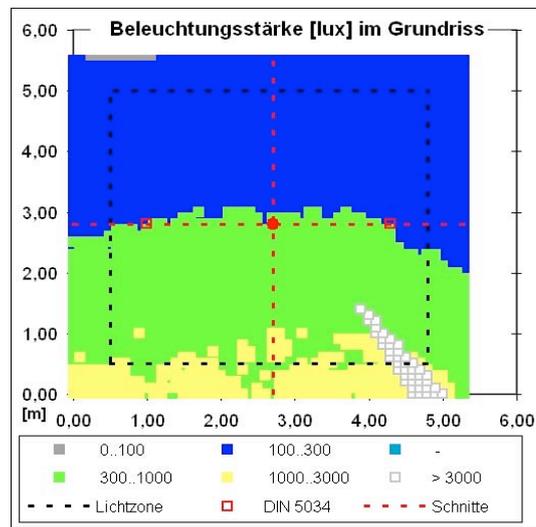
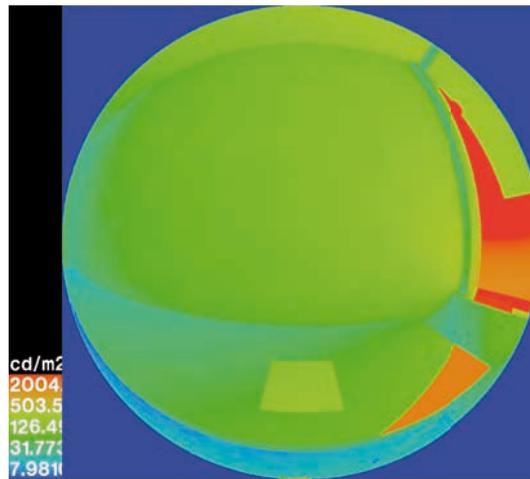


Abbildung 60: 28 Süd\_Markise\_Sonne (21. März 10 Uhr)

Mit Markise (9.5.2) werden ungefähr die – zu dunklen – Bedingungen des bedeckten Himmels wiederhergestellt: nicht optimal, Beschattung über das Ziel hinauschießend!

Verbesserung könnte eine Markisenart bringen, die im oberen Drittel scheibenparallel verläuft und unterhalb erst ausgestellt wird: Markisolette. So könnte auch der Lichtkeil verschwinden, den man in den ersten Simulation sieht. Ebenso sollte die Lichtdurchlässigkeit der Markisolette auf 15 % erhöht werden.

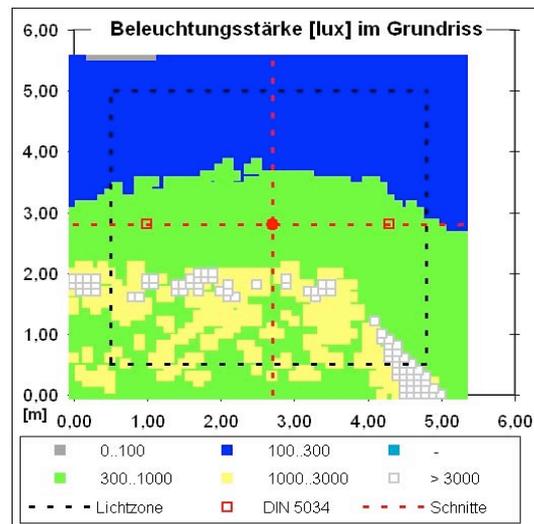
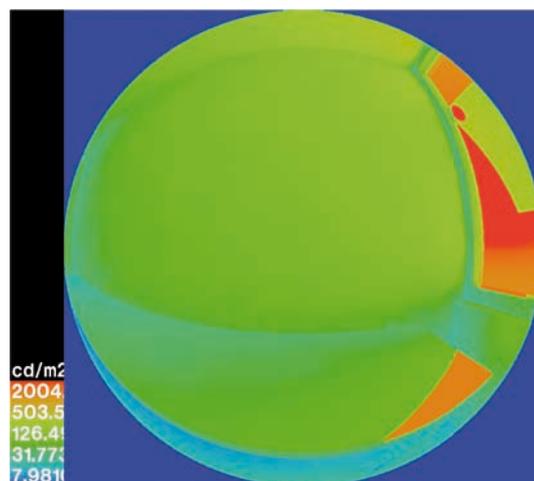
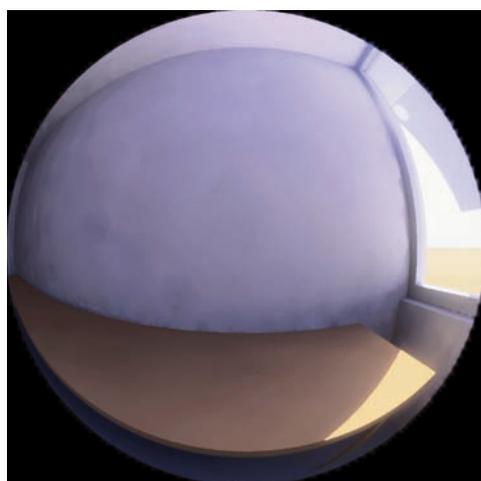


Abbildung 61: 29 Süd\_Markisolette\_Sonne (21. März., 10 Uhr, Anstellwinkel 60 °).

Wird das Südfenster alternativ durch eine Markisolette verschattet<sup>18</sup> (Lichtdurchlässigkeit 15 %) so ist der fensternahe Bereich bis 3,50 m Raumtiefe ausreichend beleuchtet. Gleichzeitig entstehen aber in

<sup>18</sup> eine Markisenart, die im oberen Drittel scheinbar parallel verläuft und unterhalb erst ausgestellt wird.

der Oostecke des Raumes und über die ganze Breite des Raumes in einer Tiefe von ca. 2 m Lichtflecke, die evt. Blendwirkung haben könnten.

Vorteile einer Markisolette (oder Markise) sind:

- ganz unbeschränkter Ausblick nach draußen im unteren Teil
- Fassade wird weniger aufgeheizt als auch bei einer außenliegender Jalousie, da die Strahlung schon vor der Verglasung abgefangen wird<sup>19</sup>
- Markisen und Markisoletten machen eine vielseitigere, lebendigere Lichtverteilung als Jalousien.

Markisoletten scheinen für Besprechungs-, Versammlungsräume, Kantinen usw. geeignet zu sein, Jalousien sind dagegen die bessere Wahl für Räume mit Büroarbeitsplätzen.

---

<sup>19</sup> Nachweis durch thermische Simulation!

### 3.2.3. Westen

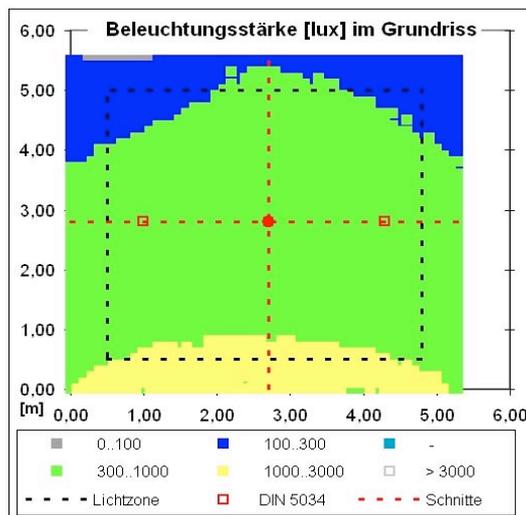
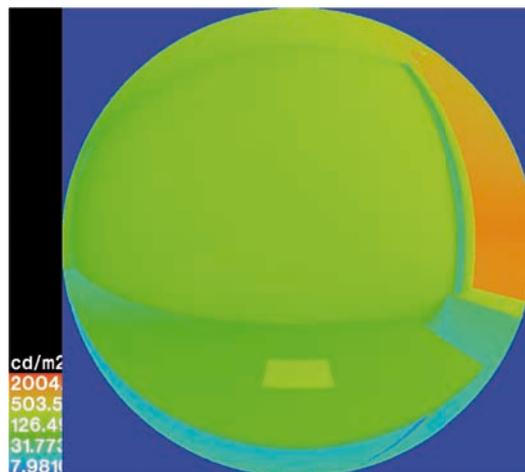
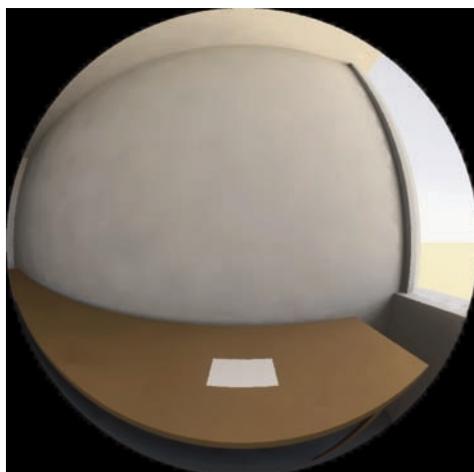


Abbildung 62: 21 West\_Sonne (21. März, 10 Uhr)

Bei Besonnung aus Westen am 21. März um 10 Uhr kommt es zu einer optimalen Tagesbelichtung 300–1000 lux, die nur fensternah über- und an der Rückwand unterschritten wird. Das ist nicht überraschend, da um 10 Uhr die Sonne im Osten steht und es zu keiner direkten Besonnung des Raumes kommen kann.

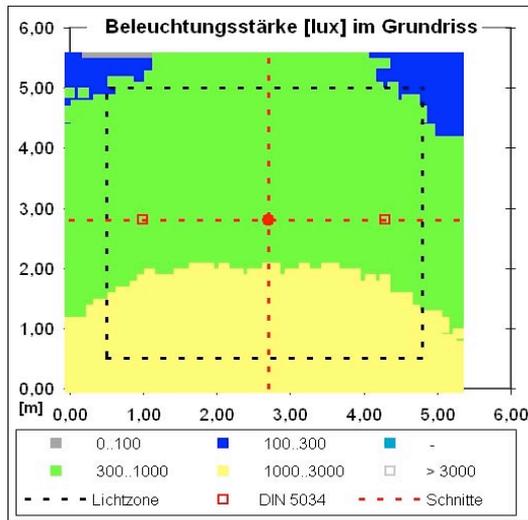
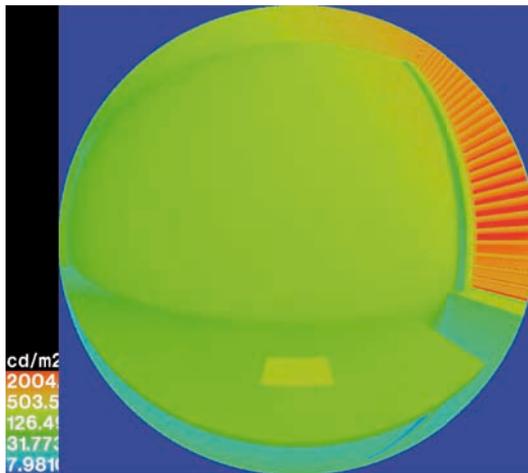


Abbildung 63: 24 West\_Lamellen\_Sonne (21. März, 15 Uhr)

Um 15 Uhr, bei Benutzung der Lamellen, ergibt sich eine Zone mit Beleuchtungsstärken 1000–3000 lux bis in 2 m Raumtiefe. Bis an die Rückwand ist der Raum mit Beleuchtungsstärken > 300 optimal tagesbelichtet.

Jalousien sind optimale Lösungen für Westfenster in Büros.

### 3.2.4. Norden

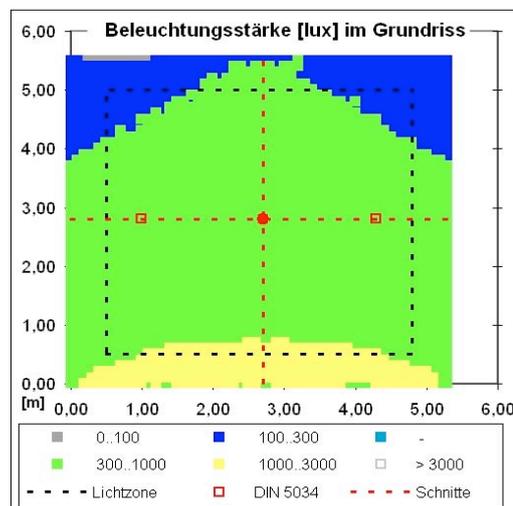
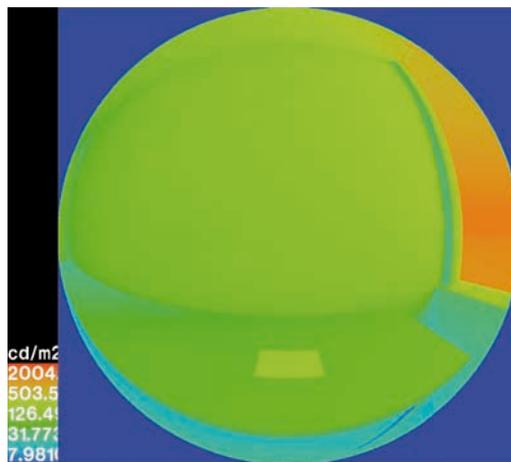
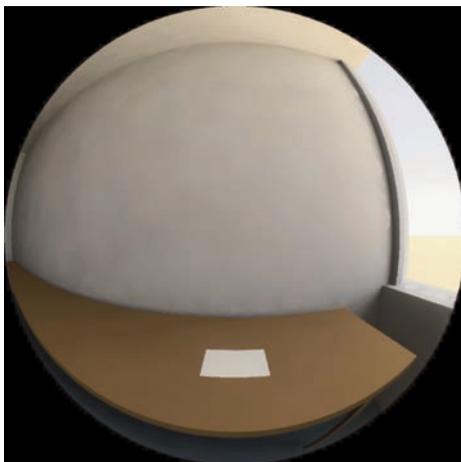


Abbildung 64: 19 Nord\_Sonne (21. März, 10 Uhr)

Bei Sonne am 21. März 10 Uhr (3.4) ist die Tageslichtversorgung perfekt: fast überall, außer in den hinteren Raumecken > 300 lx, fensternah < 50 cm: 1000–3000 lux.

Unter welchen Umständen ist an Nordfenstern ein Sonnenschutz vorzusehen?

- Wenn die Sonne im Sommer morgens und abends schräg hereinscheint
- Wenn eine gegenüberliegende Fassade blendet

Dies zeigen die folgenden Simulationen:

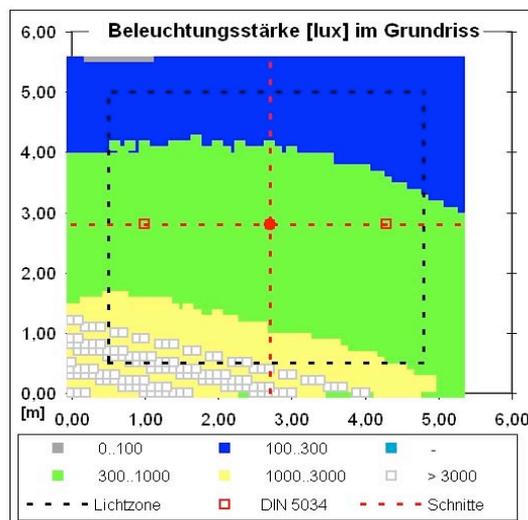
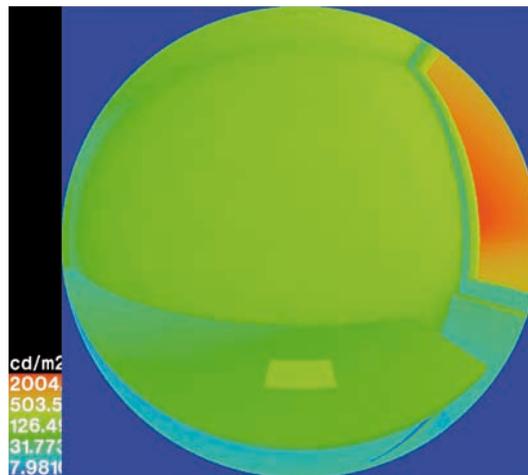
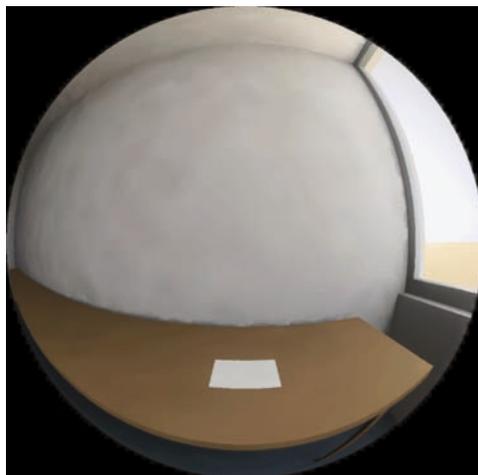


Abbildung 65: 32 Nord\_Sonne (21. Juni, 18 Uhr)

Die untersuchte Extremsituation zeigt direktes Sonnenlicht im Sommer morgens und abends im Norden. Dabei kommt es fensternah zu hohen Leuchtdichten ( $> 3000 \text{ cd/m}^2$ ) und damit zu Blendung. Deswegen wäre ein (innenliegender) Sonnenschutz sinnvoll. Im übrigen ist der Raum um diese Jahreszeit und Tageszeit auch noch bis in 3–4 m Raumtiefe ausreichend mit Tageslicht versorgt – abhängig von der Einfallrichtung des direkten Sonnenlichtes, das hier einen notwendigen Beitrag leistet, der sonst durch künstliches Licht ersetzt werden müsste.

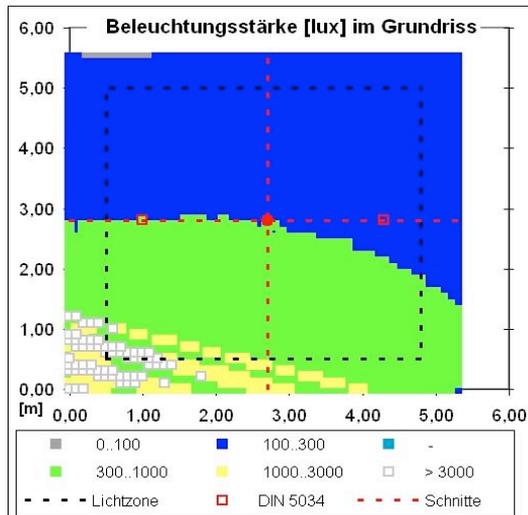
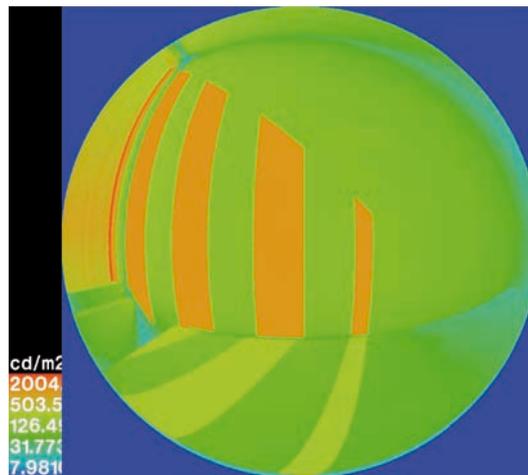
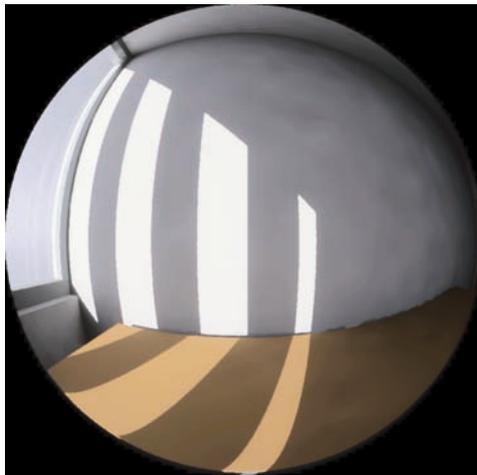


Abbildung 66: 33 Nord\_Rollo\_Sonne (21. Juni, 18 Uhr)

Ein Rollo mit 70 % Lichtdurchlässigkeit ist aufgezo- gen und die Blendwirkung wird auf dem direkten Sonnenlicht bestrichene- n Arbeitsplatz gezeigt. Mit dem Rollo gelingt es nicht, die Blendung durch das direkte Sonnenlicht zu vermeiden: Lichtstreifen mit Leuchtdichten > 2000 cd/m<sup>2</sup> befinden sich (nach wie vor) im Blickfeld des Arbeitsplatzes. Andererseits verschlechtert das Rollo die Belichtung der hinteren Raumhälfte. Bereits ab 2–3 m Raumtiefe werden 300 Lux unterschritten. Das innenliegende Rollo ist ungeeignet, die dargestellte Situation zu moderieren.

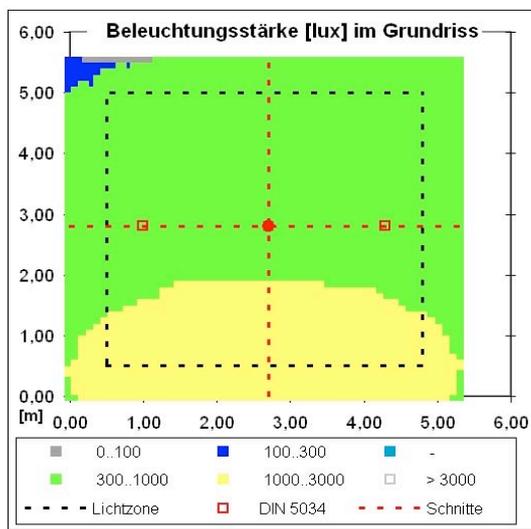
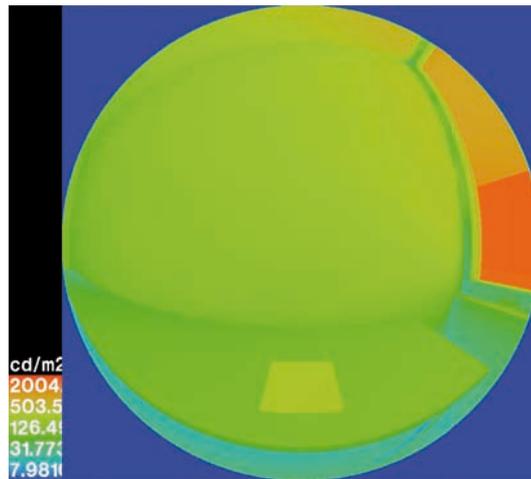
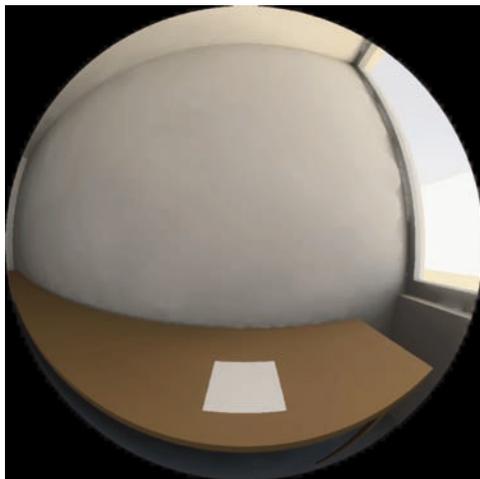


Abbildung 67: 35 Nord\_Bebauung\_Sonne (21. Juni., 12 Uhr)

Benachbarte Bebauung, die Teile der Himmelskuppel verdeckt, vermindert normalerweise, nämlich bei bedecktem Himmel, wie ausführlich gezeigt, das Tageslichtangebot. Wird ein gegenüberliegendes Gebäude aber von direkter Sonne angestrahlt, wird dessen Fassade zu einer sekundären Lichtquelle und kann die Tageslichtversorgung (vorübergehend) verbessern. Dies kann bei Ostfenstern abends und

bei Westfenstern morgens der Fall sein. Bei Nordfenstern, wie hier gezeigt, mittags. Ein Höhenwinkel der Bebauung von  $15^\circ$  wird angenommen.

Die Belichtung des Raumes ist gut, am dargestellten Arbeitsplatz blendet aber am Rande des Blickfeldes die sichtbare Fassade des gegenüberliegenden Gebäudes. Darauf reagiert die folgende Variante.

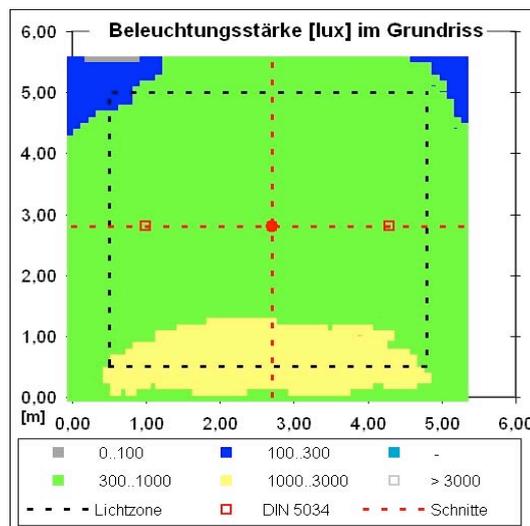
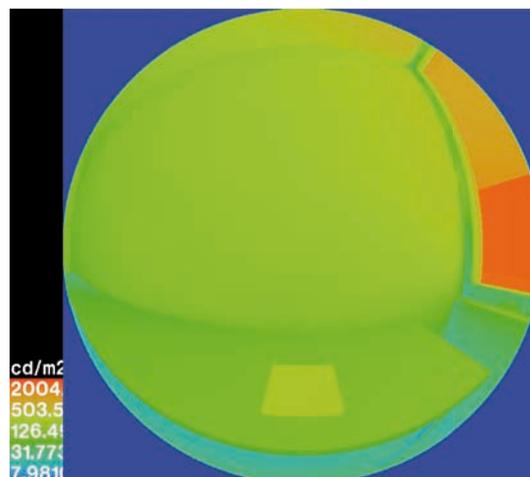
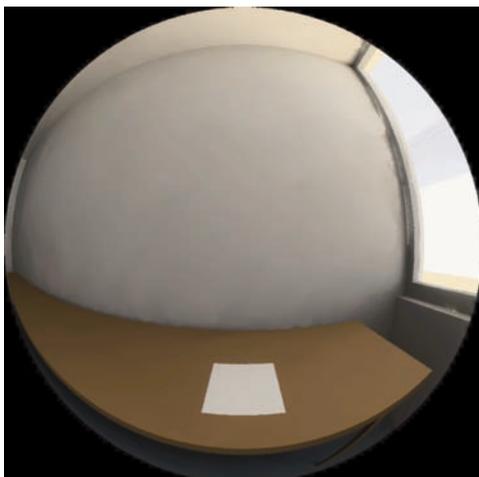


Abbildung 68: 34 Nord\_Bebauung\_Rollo\_Sonne (21. Juni., 12 Uhr)

Hier ist das Rollo mit 70 % Lichtdurchlässigkeit bis zur Hälfte der Fensterhöhe aufgezogen. Die Belichtung der Tiefe des Raumes wird dadurch vermindert, bleibt aber auf ausreichendem Niveau. Die Blendung des Arbeitsplatzes wird vermindert. Auch hier ist die Funktion des Rollos nicht überzeugend, zuwenig Leuchtdichteminderung bei Blendung, zuviel Minderung der Bestrahlungsstärke in der Raumtiefe, wo keine Minderung erwünscht wäre.

Das Rollo ist in allen gezeigten Varianten unbefriedigend. Voraussichtlich ist auch an Nordfenstern die Jalousie die bessere Lösung.

### 3.3. Bewertung der Ergebnisse der Lichtsimulationen

#### 3.3.1. Bewertung der Ergebnisse zur Tageslichtnutzung

##### Basis-Modell

Die Tageslichtversorgung des Büroraums unter den gewählten Standardbedingungen ist sehr gut.

- Der mittlere Tageslichtquotient  $D_m$  liegt bei etwa 4,8 % in einer Nutzebene 85 cm
- In halber Raumtiefe beträgt der Tageslichtquotient (in Raummitte) ca. 3,6 %.
- Die Anforderungen an den mittleren Tageslichtquotienten ( $D_m > 0,9$ ) nach DIN 5034 werden gut erfüllt.

##### Empfehlungen zur Nutzung des Raumes

Das Tageslicht sollte so lange wie möglich genutzt werden. Automatische Systemen sollten das Kunstlicht bei Beleuchtungsstärken  $> 300$  Lux (Tageslichtanteil) ausschalten. Die NutzerInnen sollten bei Bedarf das Kunstlicht manuell einschalten, was gewöhnlich erst bei Beleuchtungsstärken  $< 200$  Lux geschieht.

Vom Gesichtspunkt der Tageslichtnutzung aus sollten die Arbeitsplätze geblockt (zueinander blickend), nicht geklappt (zur Wand blickend) angeordnet sein, zumal der Tageslichtquotient zu den Raumwänden hin absinkt.

##### Tageslichtnutzung – Bewertung der Simulationsvarianten

Die Auswirkungen der Variationen des Modellraums zeigen folgende zusammenfassende Tabellen. Dabei unterscheiden wir Faktoren, die der Planung im Allgemeinen nicht zugänglich sind, wie die Abhängigkeit des Tageslichtangebots von der geographischen Breite und die Verschattung durch Bebauung auf benachbarten Grundstücken.

Varierte Größe	Ausschließliche Tageslichtnutzung (%)	Differenz zur Standardvariante	erweiterte Tageslichtnutzung bei gedimmter Beleuchtung (%)	Differenz zur Standardvariante
Ort: Athen statt Wien	78,5	11,9	88,5	8
Standardvariante	66,6	-	80,5	-
Bebauung 15 ° statt 0 °	61,1	-5,5	78	-2,5
Ort: Hamburg statt Wien	54,4	-11,9	72,6	-7,9
Ort: Oslo statt Wien	54,1	-12,5	69,5	-11
Bebauung 30 ° statt 0 °	45,1	-21,5	71,2	-9,3
Verbauung 45 ° statt 0 °	20,9	-45,7	56,5	-24
Verbauung 60 ° statt 0 °	18,5	-48,1	54,2	-26,3

Tabelle 12: Wirkung standortabhängiger Größen auf die Tageslichtnutzung

Geographische Breite: Der Nachteil bei der Tageslichtnutzung an nördlichen (bzw. polnahen) Orten liegt in den langen Sommertagen, die durch die üblichen Bürozeiten nicht ausgenutzt werden können und den kurzen Wintertagen, die nur eine geringe Tageslichtnutzung erlauben.

Beschattung durch benachbarte Bebauung: Ausgehend von dem Wiener Büro (ohne Verschattung) wurde der Effekt äußerer Verschattung durch Bebauung simuliert. Der Höhenwinkel, unter dem der Himmel durch Bebauung verdeckt wird, nimmt zu mit

- zunehmender Höhe der gegenüberliegenden Bauten oder Geländeformationen
- mit abnehmendem Abstand dieser Hindernisse zur betrachteten Fassade
- mit abnehmender Höhenlage des Fensters, vom obersten Stockwerk bis zum Erdgeschoß.

Die Wirkung ist drastisch!

Ein Bebauungswinkel von weniger als  $15^\circ$  beeinträchtigt die Tageslichtnutzung noch wenig. Darüber nimmt die Tageslichtnutzung schnell ab, besonders schnell im Intervall  $30\text{--}45^\circ$ . Bei Winkeln größer  $45^\circ$  passiert nicht mehr viel (es ist fast alles schon passiert). Zwar ist in unserem Modellraum Tagesbelichtung lt. DIN 5034 auch bei  $60^\circ$  Verbauungswinkel noch gegeben. Aber die alleinige Tageslichtnutzung ist, statt in 2/3 aller Nutzungszeiten des Büros im Jahreslauf nur noch in 18,5 % der Zeiten möglich. Auch für teilweise Tageslichtnutzung mit zusätzlicher gedimmter künstlicher Beleuchtung reicht das eintretende Licht nur in der Hälfte der Nutzungszeiten aus, statt in 80 % der Nutzungszeiten wie im Standardfall ohne Verschattung durch Nachbargebäude oder Geländeformationen.

Varierte Größe	Ausschließliche Tageslichtnutzung (%)	Differenz zu Standardvariante	erweiterte Tageslichtnutzung bei gedimmter Beleuchtung (%)	Differenz zur Standardvariante
Reflexionsgrade Inneneinrichtung größer (heller): Boden: 30 %; Wand: 65 %; Decke 85 %)	69,3	2,7	81,7	1,2
Vollverglasung statt Bandfenster	67,8	1,2	81,4	0,9
2fach Vakuumverglasung statt 3fach WSV	67,2	0,6	81,1	0,6
<b>Standardvariante (Reflexionsgrade Boden: 20 %, Wand: 50 %, Decke 80 % . Bandfenster, kein Sturz, 3fach WSV)</b>	66,6	-	80,5	-
Reflexionsgrade Inneneinrichtung kleiner (dunkler: Boden 10 %; Wand 40 %; Decke: 70 %)	64,2	-2,4	79,2	-1,3
Sturz: 40 cm statt kein Sturz	53,8	-12,8	74,8	-5,7
Lochfassade 20 % statt Bandfenster	44	-22,6	71	-9,5
Lochfassade 20 % mit 40 cm Sturz statt Bandfenster ohne Sturz	36,8	-29,8	67,7	-12,8
Lochfassade 10 % statt Bandfenster	10,1	-56,5	46,2	-34,3
Lochfassade 10 % mit 40 cm Sturz statt Bandfenster ohne Sturz	6,6	-60	42,6	-37,9

Tabelle 13: Wirkung von der Planung beeinflussbarer Größen auf die Tageslichtnutzung

Einschränkung der Fensterfläche: Die gewählte Standardkonfiguration, Bandfenster ohne Sturz, mit einer Fensterfläche, die im Modellraum 38,4 % der Grundfläche ausmacht, kann als Optimum (nicht Maximum) für die Tageslichtnutzung angesehen werden: verglaste Flächen sind überall dort und nur dort angeordnet, wo sie wirksam sind. Das ist bei Büronutzung die Fläche oberhalb der Arbeitsebene in 85 cm Höhe. In Versammlungsräumen, in denen auch der Fußboden Bezugsfläche für die Tageslichtnutzung ist, sind verglaste Flächen ab Fußbodenniveau sinnvoll.

Nicht berücksichtigt wurde die Möglichkeit von Dachfenstern oder mehreren Wänden mit Fenstern, da sie nur in obersten Stockwerken oder an Gebäudeecken möglich sind.

Aber auch die Bandfenster ermöglichen bereits eine reine Tageslichtnutzung in 66,6 % der Nutzungszeiten (beim gewählten Büronutzungsprofil), mit Unterstützung durch gedimmte künstliche Beleuchtung findet man in 80,5 % der Nutzungszeiten das Auslangen, womit das theoretische Potential von 93,4 % der Zeiten gut genutzt wird.

Die Einschränkung der verglasten Flächen von Bandfenstern zu Lochfenstern könnte unter Kostenvorteile oder thermische Vorteile haben, die gegen die Nachteile einer schlechteren natürlichen

Belichtung abzuwägen sind. Auch abhängig von der Orientierung in der Himmelsrichtung könnten verschiedene Fenstergrößen optimal sein. Siehe Thermische Simulationen. Erst bei 10 % Verglasungsfläche ist das Tageslicht-Kriterium nach DIN 5034 (Mittelwert TQ > 0,9) nicht mehr erfüllt. Weiter verbessert könnte die Versorgung des Modellraums mit Tageslicht durch eine Verminderung der Raumtiefe oder durch eine Vergrößerung der Raum- und damit der Fensterhöhe werden. Die Variation der Raumproportionen und -größen war aber kein Untersuchungsgegenstand. Diese waren vorab nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimiert worden.

Sturz: Wird die Verglasung von oben durch einen Fenstersturz von 40 cm Höhe eingeschränkt, ist der Verlust an Tageslicht sehr deutlich. Je höher die Position einer Öffnung an der Wand, desto zenitnäher und damit heller der Himmelsbereich, der zugänglich gemacht wird und desto geringer die Wahrscheinlichkeit einer Verdeckung des Himmelsausschnitts durch Bebauung. Ausnahme: Auskragung (Balkon) im Stockwerk über dem Fenster.

Zwei Varianten mit Lochfenstern, die sich durch einen Sturz unterscheiden, dabei aber dieselbe Größe (20 % der Grundfläche) haben, unterscheiden sich in der Tageslichtnutzung um  $44 - 36,8 = 7,2$  Prozentpunkte. Dies verdeutlicht, wie wichtig nicht nur die Größe der Fenster, sondern auch ihre Position in der Wand ist.

Reflexionsgrade der Raumbooberflächen: Eine hellere Inneneinrichtung ist eine wirksame Maßnahme zur Verbesserung der Tageslichtversorgung!

Vollverglasung ist Architekturmode. Mit einer besseren Tageslichtversorgung und den resultierenden Beleuchtungsstromersparnissen ist eine Vollverglasung aber nicht zu rechtfertigen. Sie hat jedoch Vorteile bei Situationen wie Wohnzimmern oder Versammlungsräumen, wenn die Tagesbelichtung des Fußbodens (nicht nur der Arbeitsebene in Höhe 85 cm) direkt ab Fenster gewünscht ist.

Lichtdurchlässigkeit der Verglasung: Dreifachverglasung ist der Standard für Passivhausbauweisen. Zweifachverglasungen mit Vakuum statt Gasfüllung zwischen den Scheiben ist eine in Entwicklung befindliche Alternative mit Vorteilen unter anderem beim Lichtdurchlass (73 statt 70 %). Die Tageslichtnutzung zeigt aber nur minimal unterschiedliche Werte.

### **3.3.2. Bewertung der Ergebnisse – Direktes Sonnenlicht und Sonnenschutz**

Bei der Untersuchung der Tageslichtnutzung genügt es, die Hindernisse für den Eintritt des Tageslichtes in den Innenraum zu untersuchen. Das Fenster ist dabei einfach als Öffnung, als Nichthindernis zu betrachten. Bei Betrachtung des direkten Sonnenlichtes gewinnen Fenster weitere Bedeutungen. Das direkte Sonnenlicht – gerichtet und um mehrere Größenordnungen intensiver als das Himmelslicht – macht alle (hellen) Oberflächen im Innenraum, die es berührt, zu sekundären Lichtquellen. Die übrigen Oberflächen bleiben im Schatten des gerichteten Lichtes. Die Schatten werden durch sekundäre Lichtquellen und auch durch künstliches Licht aufgehellt. Zwischen Licht und Schatten sind also härtere

oder mildere Kontraste, schärfere oder weniger scharfe Grenzen. Licht und Schatten modellieren die Gegenstände im Raum. Eine ausgewogene Stärke von Kontrasten, sind anzustreben.

Zunächst ist aber bei Büroarbeitsplätzen Blendung zu vermeiden. Das CIE Unified Glared Rating-Verfahren (UGR), mit dem Blendwirkungen durch künstliche Lichtquellen zu beurteilen sind, ist für Blendung durch natürliches Licht nicht anwendbar. In unseren Simulationen ziehen wir den Erfahrungswert von Alware Andreas Lahme heran, wonach absolute Leuchtdichten von über 4000 cd/m<sup>2</sup> als blendend empfunden werden können. Sie sind in den Falschfarben-Darstellungen in roter Farbe dargestellt.

In unseren Simulationen haben wir die Wirkung des direkten Sonnenlichtes zunächst ohne Verschattung simuliert und dann in einem oder mehreren Schritten gängige Verschattungseinrichtungen eingesetzt, mit dem Ziel blendfreie Arbeitsumgebungen im Modellraum wieder herzustellen dabei aber die Tageslichtnutzung nicht einzuschränken.

Als Verschattungseinrichtungen haben wir drei Typen mit unterschiedlicher Wirkungsweise herangezogen:

- Rollos
- Jalousien
- Markisen und Markisoleetten.

Die Fenster des Modellraumes wurden in der Standardkonfiguration Bandfenster ohne Sturz untersucht und nach Norden, Osten, Süden und Westen gerichtet.

Nach Norden gerichtete Räume erhalten nur im Sommer nach Sonnenaufgang im Nordosten und vor Sonnenuntergang im Nordwesten direktes Licht. Außerdem können gegenüberliegende Fassaden, die angestrahlt werden, Blendwirkungen hervorrufen.

Der thermische Eintrag durch dieses Licht ist erwartbar gering (siehe aber Thermische Simulationen). Innenliegende Verschattungseinrichtungen können bei dieser Himmelsrichtung verwendet werden. Rollos mit hohem Lichtdurchlass (TL = 70 %) haben sich als ausreichend, aber nicht ideal für den Fall der Blendung durch gegenüberliegende Fassaden herausgestellt. Auch bei morgendlichem und abendlichen, direkten Licht sind sie mit Blick auf die kurze Zeit im Jahr, in der dies vorkommt vielleicht ausreichend, wenngleich die Verschattungswirkung für das direkte Licht bei hoher Lichtdurchlässigkeit (TL = 70 %) zu schwach ist. Bei geringer Lichtdurchlässigkeit (TL = 10 %) wird aber das diffuse Himmelslicht zu sehr gedämpft, der Raum wird zu dunkel.

Nach Süden gerichtete Fenster erhalten den ganzen Tag über und besonders im Winterhalbjahr bei tiefer stehender Sonne direktes Licht mit Blendwirkung. Auch die thermische Wirkung des Lichtes ist erheblich (siehe Thermische Simulationen). Deshalb sollten Verschattungseinrichtungen in der Regel außenliegend angebracht sein.

Jalousien sind für die Belichtung eine perfekte Lösung, weil sie das direkte Licht ausblenden, aber große Teile des Himmelslichtes durchlassen.

Markisen, insbesondere Markisoletten, dämpfen das Himmelslicht, wie Rollos, gewähren aber einen ungestörten Ausblick im unteren Bereich des Fensters und schirmen die thermische Wirkung des Lichtes noch besser ab als Jalousien (siehe aber Thermische Simulationen). Markisoletten sind eine gute Alternative zu Jalousien in allen Räumen mit sozialen Funktionen, wie Besprechungsräumen, Kantinen u.ä., bei denen die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärken weniger wichtig als bei Bildschirmarbeitsplätzen, und wo ein lebendigeres Lichtmuster im Raum und ein ungestörter Ausblick willkommen sind.

Nach Osten gerichtete Fenster erhalten vormittags und besonders im Winterhalbjahr bei tiefer stehender Sonne direktes Licht mit Blendwirkung. Die thermische Wirkung des Lichtes ist zu beachten (siehe Thermische Simulationen). Verschattungseinrichtungen sollten in der Regel außenliegend angebracht sein.

Rollos können eine befriedigende Lösung für die beiden fensternahen Arbeitsplätze des Modellraums sein. Der hintere Teil des Raums wird aber dabei zu dunkel. Ein teilweise (oben) geöffnetes Rollo teilt den Raum in überbelichtete, gut belichtete und zu wenig belichtete Zonen auf.

Mit Jalousien werden diese Nachteile vermieden, weil das Licht gelenkt, aber nicht gedämpft wird. Markisen und Markisoletten wurden nicht erprobt, sollten aber an Ostfenstern ähnliche Vor- und Nachteile aufweisen, wie an Südfenstern.

Nach Westen gerichtete Fenster erhalten nachmittags und besonders im Winterhalbjahr bei tiefer stehender Sonne direktes Licht mit Blendwirkung. Die thermische Wirkung des Lichtes ist im allgemeinen groß (siehe Thermische Simulationen). Verschattungseinrichtungen sollten in der Regel außenliegend angebracht sein.

Jalousien sind auch im Westen eine perfekte Lösung, weil sie das direkte Licht ausblenden, aber große Teile des Himmelslichtes durchlassen.

Markisen und Markisoletten wurden nicht erprobt, sollten aber an Westfenstern ähnliche Vor- und Nachteile aufweisen, wie an Südfenstern.

## 4. Ergebnisse Strömungssimulationen – Varianten – Beschreibung der spezifischen Randbedingungen und Resultate

Mit Hilfe der Kopplung von thermischer Gebäudesimulation, Anlagensimulation und Raumluftströmungsberechnung wurden 24 Szenarien für einen ausgewählten und anhand vorgegebener Randbedingungen spezifizierten Komfort-Bürraum nachgebildet. Hauptaugenmerk der Berechnungen war dabei die sich einstellende thermische Behaglichkeit. Da alle Systeme mit vergleichbarer Detailstärke modelliert wurden, ist eine Gegenüberstellung der Systeme untereinander möglich. Hier sind Tendenzen hinsichtlich der zu erwartenden Strömungs- und Temperaturverhältnisse deutlich absehbar. Sehr gut sind auch die Wirkungen der konvektiv oder strahlungsbasiert arbeitenden Systemkomponenten erkennbar, die in der gekoppelten Simulation in der Wechselwirkung mit der Umfassungsstruktur abgebildet werden. Bei der Bewertung der untersuchten Varianten anhand der Abbildungen ist zu bedenken, dass es sich um „Schnappschüsse“ zu ausgewählten Zeitpunkten des instationären Verlaufes handelt. Sind zusätzlich noch Schaltvorgänge der implementierten Regelung zu berücksichtigen, bei denen Ein- oder Austrittsöffnungen aktiviert oder deaktiviert werden, kann es z. B. bei der Bildung des lokalen Luftaustauschindex zu Darstellungen kommen, die nur im Gesamt-Zusammenhang erschließbar sind, siehe z.B. Varianten 4.10 bis 4.12

Jede der im Modellraum simulierten Haustechnikvarianten besteht aus Einrichtungen zur Frischluftzufuhr und -verteilung und aus Einrichtungen zum Heizen oder Kühlen. Die Abluftabsaugung ist einheitlich oberhalb der Tür angeordnet und variiert nicht.

Details zu den Haustechnikvarianten: siehe 1.4 Methodik.

Übersicht über die Simulationsvarianten

- 1: PL4 F1D Sommer: Quelllüftung und Putzkühldecke mit Kapillarrohrrmatte
- 2: PL5 F1D Sommer: Drallauslässe im Boden und Putzkühldecke mit Kapillarrohrrmatte
- 3: PL5 F1D Winter: Drallauslässe im Boden und Putzheizdecke mit Kapillarrohrrmatte
- 4: PL2 F5A Sommer: Lüftungsgitter und Fußbodenkühlung
- 5: PL2 F5A Winter: Lüftungsgitter und Fußbodenheizung
- 6: PL4 F2A Sommer: Quelllüftung und Betonkernaktivierung
- 7: PL4 F2A Winter: Quelllüftung und Betonkernaktivierung
- 8: PL2 L1A Sommer: Lüftungsgitter und Ventilatorkonvektoren
- 9: PL2 L1A Winter: Lüftungsgitter und Ventilatorkonvektoren
- 10: L1A Sommer: Ventilatorkonvektoren mit Primärluftanteil
- 11: L1A Winter: Ventilatorkonvektoren mit Primärluftanteil
- 12: L1B Sommer: Ventilatorkonvektoren Komfortbrüstungsgeräte
- 13: PL5 F2A Sommer: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung
- 14: PL5 F2A Winter: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung
- 15: PL2 F2A Sommer: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung
- 16: PL2 F2A Winter: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung

- 17: PL4 F5A Sommer: Quelllüftung und Fußbodenkühlung
- 18: PL4 F5A Winter: Quelllüftung und Fußbodenheizung
- 19: PL2 L2 Sommer: Lüftungsgitter und Deckenfancoil
- 20: PL2 L2 Winter: Lüftungsgitter und Deckenfancoil
- 21: L3 Sommer: Deckeneinbaugerät mit Drallauslässen
- 22: FL1 Sommer: Induktionskühlgerät (Kühlbalken)
- 23: FL1 Winter: Induktionsheizgerät (Heizbalken)
- 24: PL4 F3 Sommer: Kühlsegel mit Quellluftauslass

#### **4.1. Basisvariante PL4 F1D Sommer – Quelllüftung und Putzkühldecke mit Kapillarrohrmatte**

##### **4.1.1. Randbedingungen der Simulation**

- Wandaufbau der abgehängten Decke entsprechend Vorgabe IBO
- Boden als Hohlraumboden
- Kühlleistung: maximal  $80 \text{ W/m}^2$
- Verlegedichte der Kapillarrohrmatte 85 %, Streifen oberhalb der Trennwand zum Flur ausgespart

Regelung/Kühldecke:

- Regelung der Kühldecke mittels PI-Regler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ °C}$

Lüftung:

- Quellluftauslass entsprechend Vorgabe IBO unterhalb der Fensterfassade
- konstanter Volumenstrom von  $105 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- Zulufttemperatur 4 K unterhalb der Sensortemperatur, gleitend.

Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

##### **4.1.2. Ergebnisse**

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

##### **Zeitverlauf**

Aufgrund der hohen Wärmedämmung des Gebäudes und aufgrund der permanenten Versorgung des Raumes mit Frischluft kommt es erst gegen 12 Uhr zur Überschreitung der Solltemperatur im Sensorpunkt

und somit zur Aktivierung der Kühldecke, siehe Abb. 4.1.01 und Abb. 4.1.02. Die Überschreitung der Solltemperatur fällt in dieser Variante trotz der in Abb. 4.1.03 sichtbaren hohen inneren Lasten mit 0,3 K zwischen 12 und 15 Uhr moderat aus. Die Putzkühldecke ist in der Lage, die eingebrachte Kühlleistung schnell und effektiv dem Raum zuzuführen, siehe Abb. 02.04. Hier wurden die an der Oberfläche von Decke und Boden raumwirksamen Wärmeströme dargestellt.

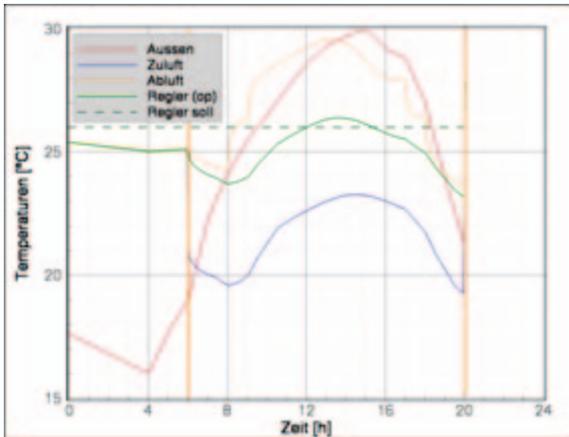


Abbildung 4.1.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

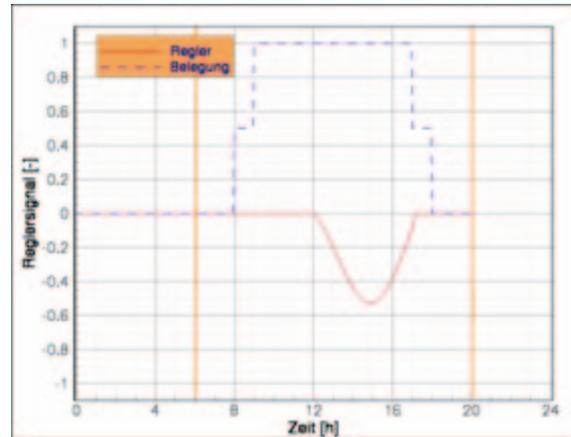


Abbildung 4.1.02: Reglersignal und Belegung

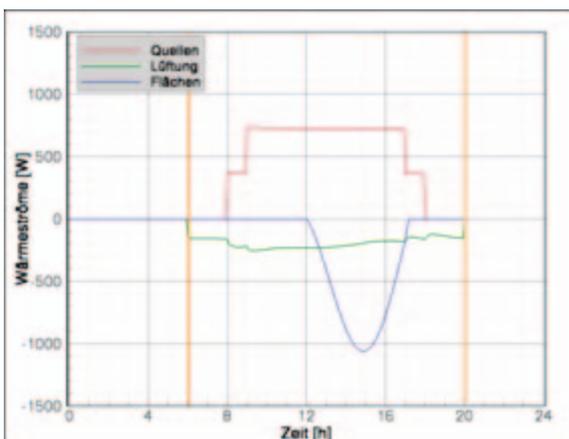


Abbildung 4.1.03: Wärmeströme - Input

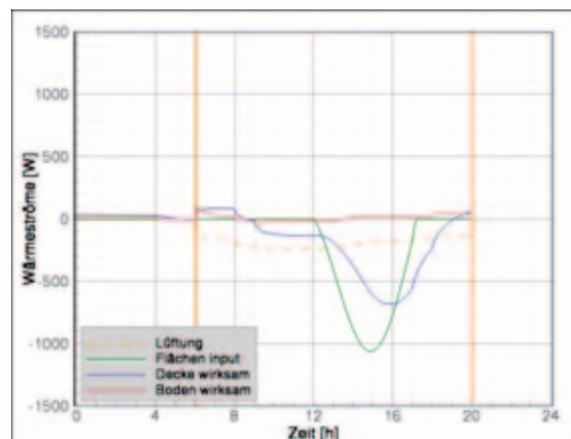


Abbildung 4.1.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Für die Beurteilung der Variante wurden stellvertretend die Resultate der Simulation um 16 Uhr herangezogen.

Die Abbildungen 4.1.05-4.1.14 zeigen insgesamt ein sehr ausgewogenes Klima im untersuchten Büroraum zu diesem Zeitpunkt. Aufgrund der Quelllüftung, verbunden mit der Luftabsaugung oberhalb der Tür kommt es zu einer hervorragenden Versorgung des Aufenthaltsbereichs mit Frischluft, was sich sowohl in hohen Werten des lokalen Luftaustauschindex als auch in niedrigen Werten der CO<sub>2</sub>-Verteilung widerspiegelt. Die operativen Temperaturen liegen in weiten Bereichen des Raumes sehr nahe bei den anvisierten 26 °C. Hierbei wird die höhere Lufttemperatur im Deckenbereich durch eine deutlich niedrigere Strahlungstemperatur (Kühldecke) ausgeglichen.

Im Aufenthaltsbereich treten lediglich in der Nähe des Quellluftauslasses geringe Zugbelastungen auf, im Raum insgesamt stellt sich ein ruhiges und aus Sicht der thermischen Behaglichkeit akzeptables Strömungsfeld ein.

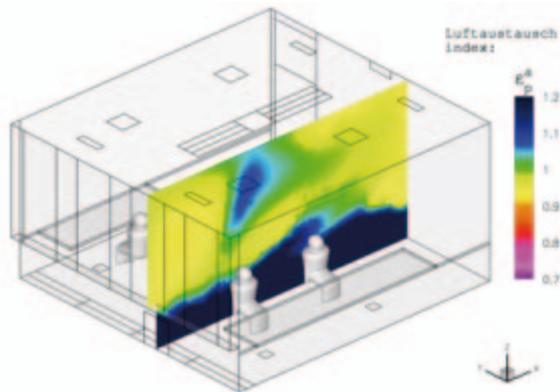


Abbildung 4.1.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

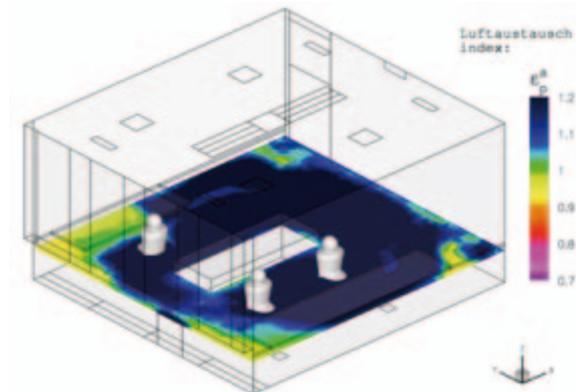


Abbildung 4.1.06: Luftaustauschindex bei  $z = 0,6$  m

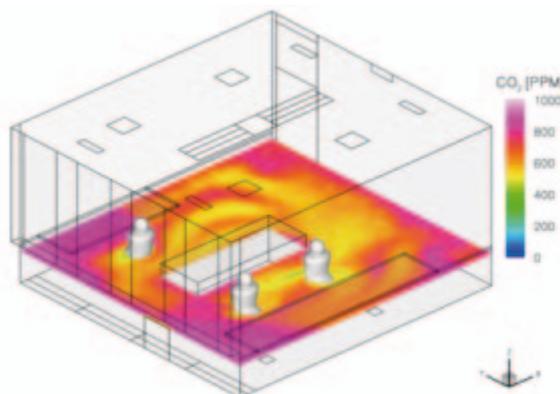


Abbildung 4.1.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm -  $z = 0,6$  m

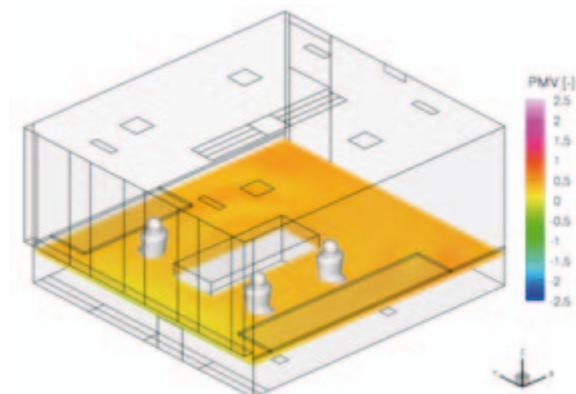


Abbildung 4.1.08: PMV-Index bei  $z = 0,6$  m

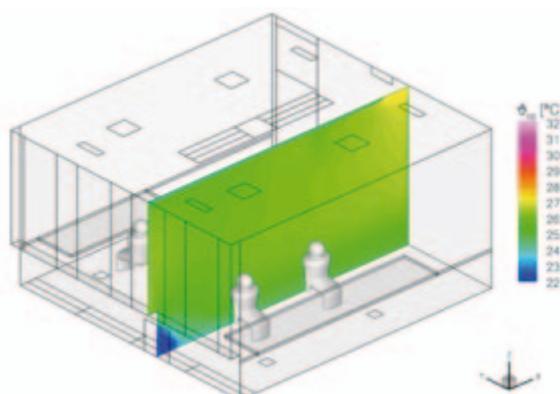


Abbildung 4.1.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

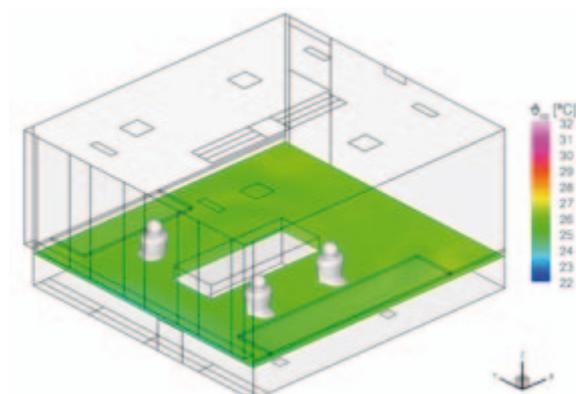


Abbildung 4.1.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6$  m

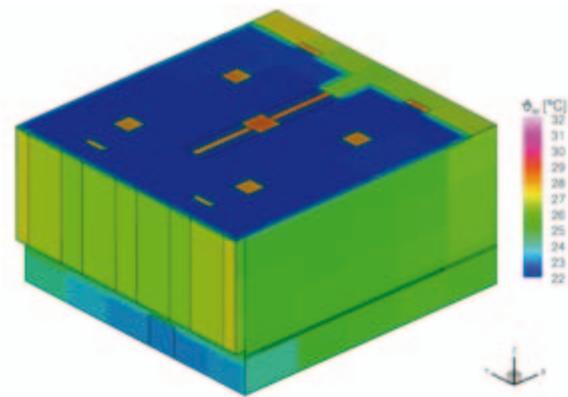


Abbildung 4.1.11: Wandtemperaturen mit Decke

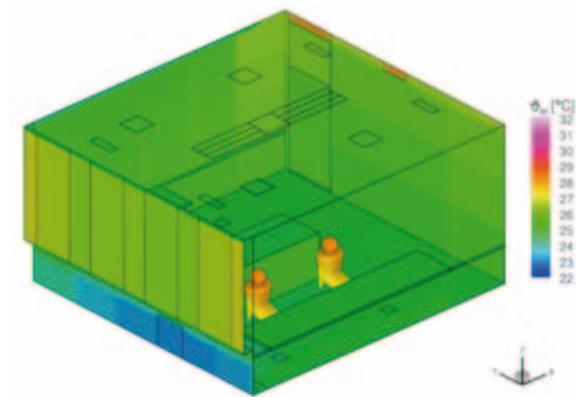


Abbildung 4.1.12: Wandtemperaturen mit Boden

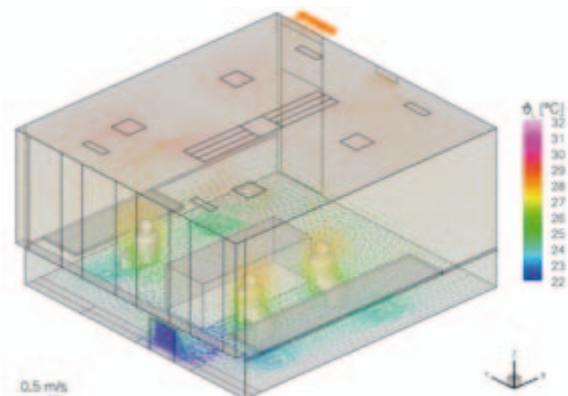


Abbildung 4.1.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

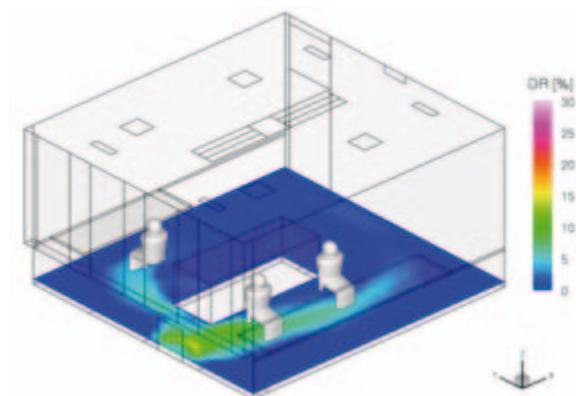


Abbildung 4.1.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.1.3. Fazit

Diese Belüftungsvariante ist für sommerliche Verhältnisse als sehr günstig anzusehen. Die Solltemperatur von 26 °C wird kaum überschritten, und es herrscht ein sehr homogenes und behagliches Raumklima. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die 26 °C im PMV-Index schon als etwas zu warm eingestuft werden.

## 4.2. Variante PL5 F1D Sommer – Drallauslässe im Boden und Putzkühldecke mit Kapillarrohrmatte

### 4.2.1. Randbedingungen der Simulation

- Wandaufbau der abgehängten Decke entsprechend Vorgabe IBO
- Boden als Hohlraumboden
- Kühlleistung: maximal  $80 \text{ W/m}^2$
- Verlegedichte 85 %, Streifen oberhalb der Trennwand zum Flur ausgespart

Regelung/Kühldecke:

- Regelung der Kühldecke mittels PI-Regler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ °C}$

Lüftung:

- 5 Drallauslässe entsprechend Vorgabe IBO im Bodenbereich, Durchmesser 150 mm, Positionen entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von  $105 \text{ m}^3/\text{h}$ , gleichmäßig auf die Auslässe aufgeteilt
- Zulufttemperatur 4 K unterhalb der Sensortemperatur, gleitend

Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.2.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Aufgrund der hohen Wärmedämmung des Gebäudes und aufgrund der permanenten Versorgung des Raumes mit Frischluft kommt es hier erst gegen 13 Uhr zur Überschreitung der Solltemperatur im Sensor und somit zum Einsatz der Kühldecke, siehe Abb. 4.2.01 und Abb. 4.2.02. Die Überschreitung der Solltemperatur fällt in dieser Variante trotz der in Abb. 4.2.03 sichtbaren hohen inneren Lasten mit 0,5 K zwischen 13 und 16 Uhr moderat aus. Die Putzkühldecke ist in der Lage, die eingebrachte Kühlleistung schnell dem Raum zuzuführen, siehe Abb. 4.2.04.

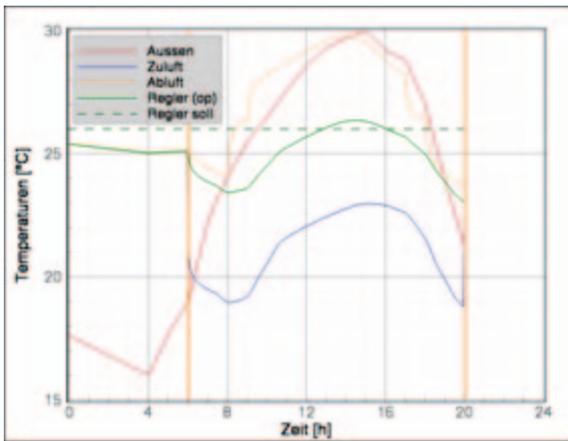


Abbildung 4.2.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

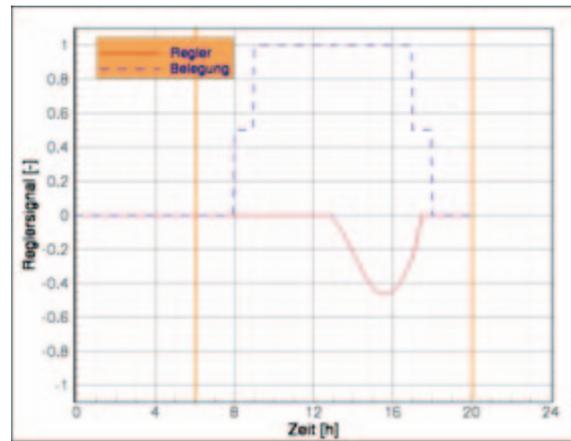


Abbildung 4.2.02: Reglersignal und Belegung

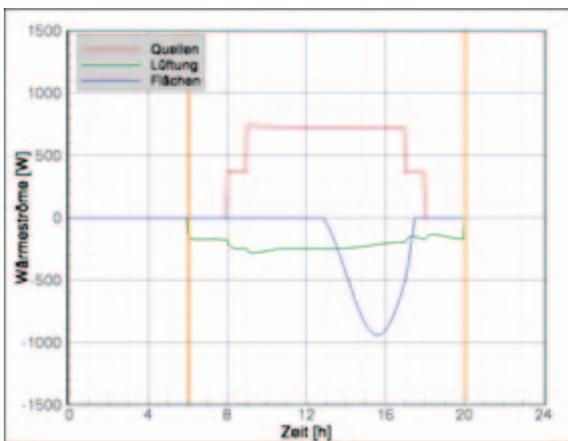


Abbildung 4.2.03: Wärmeströme - Input

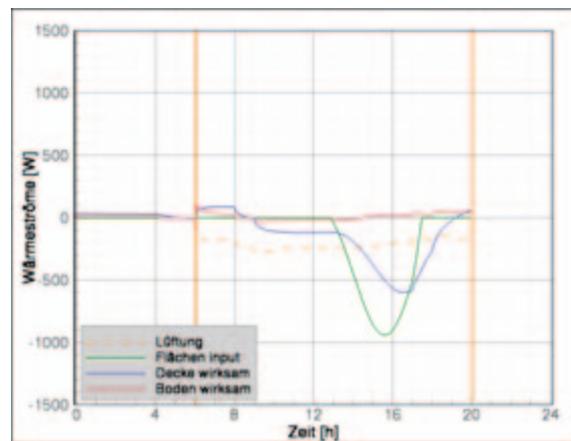


Abbildung 4.2.04: Wärmeströme raumwirksam

## Ausgewählte Zeitpunkte

Für die Beurteilung der Variante wurden hier stellvertretend die Resultate der Simulation um 16 Uhr, also zu einem Zeitpunkt hoher energetischer Belastung des Raumes herangezogen.

Die Abbildungen 4.2.05-4.2.14 zeigen insgesamt ein der modellierten Anlagentechnik entsprechendes und sehr ausgewogenes Raumklima. Die 5 Drallluftauslässe, verbunden mit der Luftabsaugung oberhalb der Tür generieren einen Frischluftsee, der dem beim Quellluftauslass ähnelt und somit eine hervorragende Versorgung des Aufenthaltsbereichs mit Frischluft garantiert. Dies zeigt sich sowohl in den hohen Werten des lokalen Luftaustauschindex als auch in niedrigen Werten der CO<sub>2</sub>-Verteilung im unteren Raumbereich. Die operativen Temperaturen liegen in weiten Bereichen des Raumes sehr nahe bei den anvisierten 26 °C. Hierbei wird die höhere Lufttemperatur im Deckenbereich durch eine deutlich niedrigere Strahlungstemperatur (Kühldecke) ausgeglichen.

Im Aufenthaltsbereich treten lediglich in der Nähe der Drallluftauslässe geringe Zugbelastungen auf, im Raum insgesamt stellt sich ein ruhiges und aus Sicht der thermischen Behaglichkeit akzeptables Strömungsfeld ein.

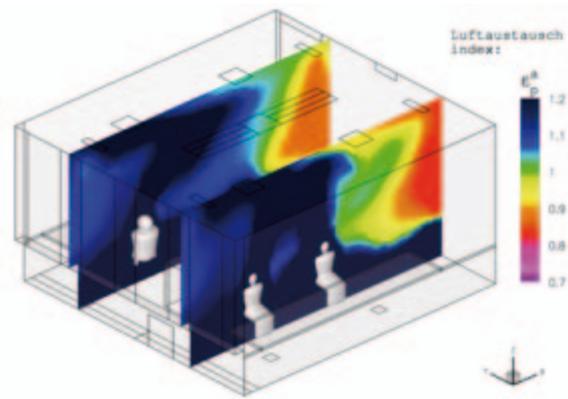


Abbildung 4.2.05: Luftaustauschindex – Vertikalschnitt

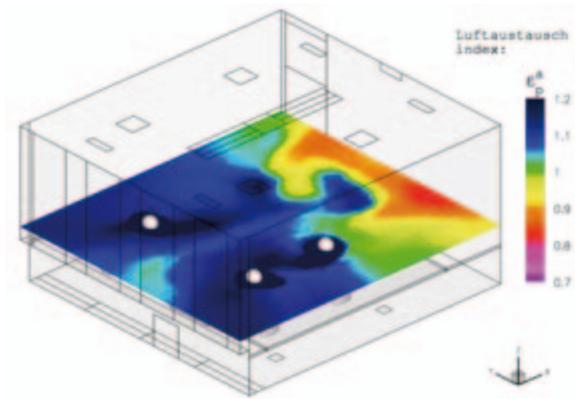


Abbildung 4.2.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1$  m

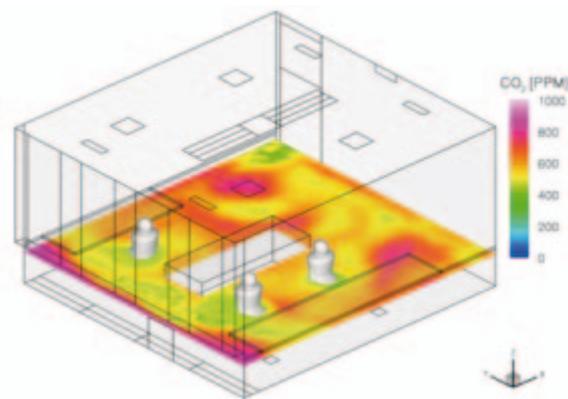


Abbildung 4.2.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm -  $z = 0,6$  m

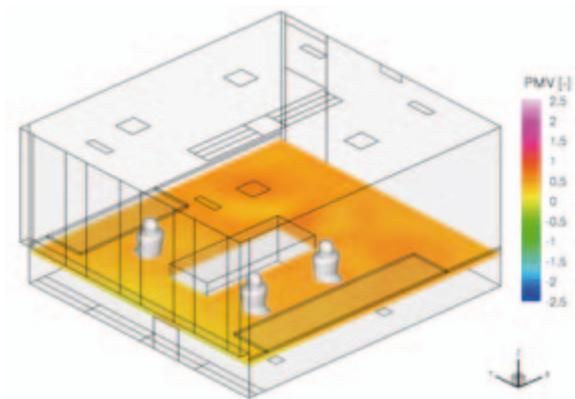


Abbildung 4.2.08: PMV-Index bei  $z = 0,6$  m

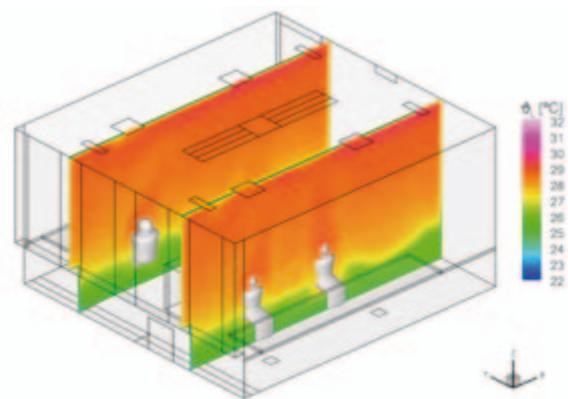


Abbildung 4.2.09: Lufttemperatur Vertikalschnitt

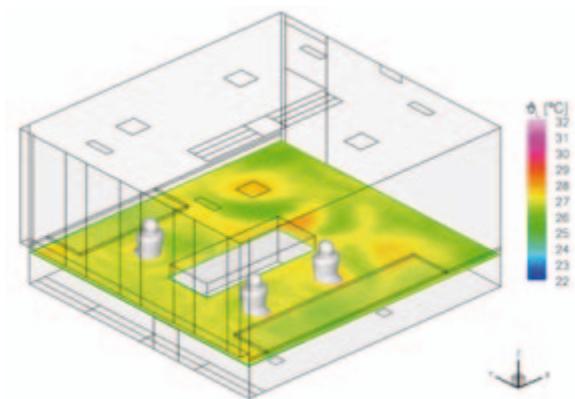


Abbildung 4.2.10: Lufttemperatur bei  $z = 0,6$  m

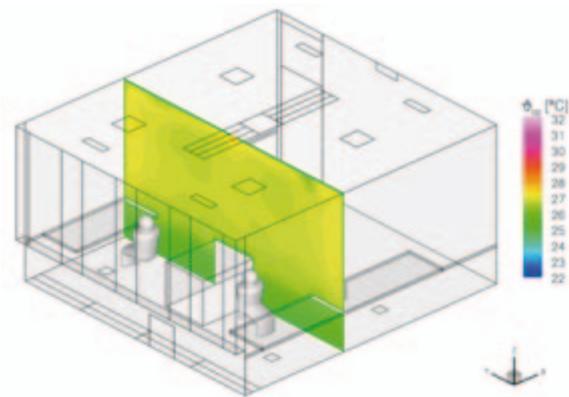


Abbildung 4.2.11: Operative Temperatur Vertikalschnitt

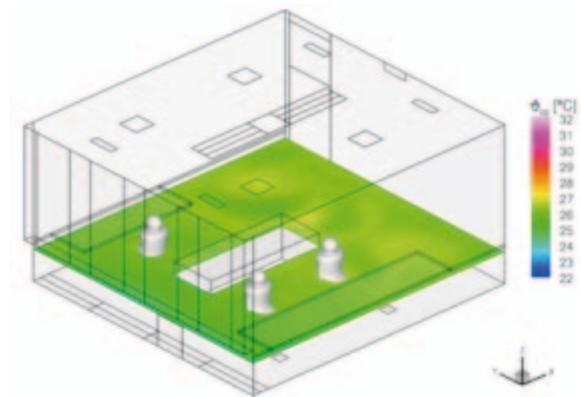


Abbildung 4.2.12: Operative Temperatur bei  $z = 0,6 \text{ m}$

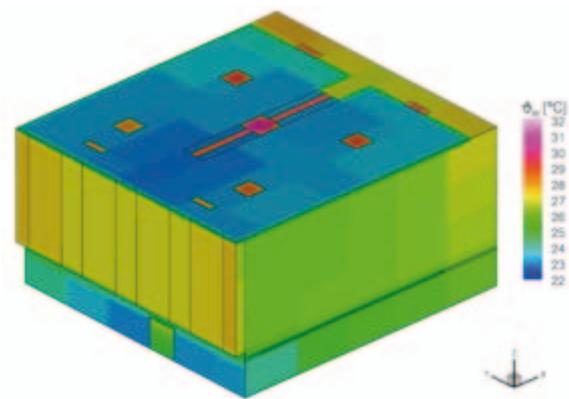


Abbildung 4.2.13: Wandtemperaturen mit Decke

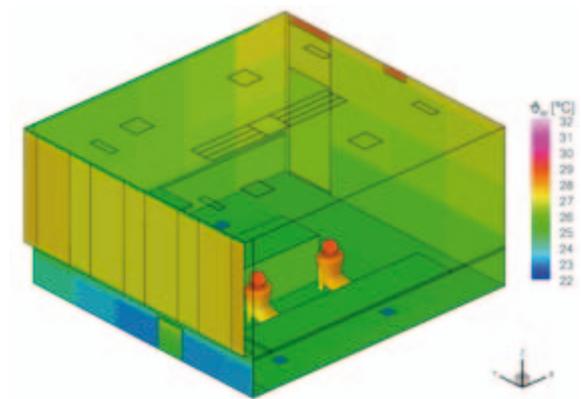


Abbildung 4.2.14: Wandtemperaturen mit Boden

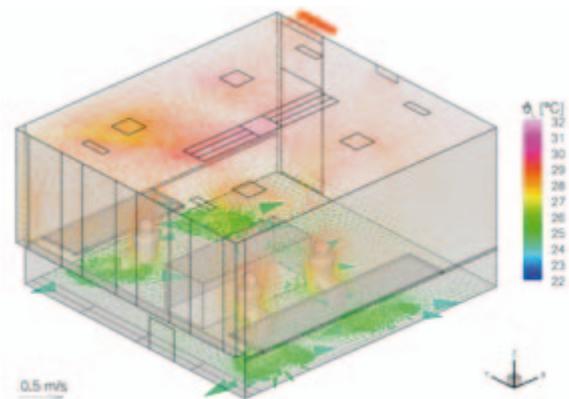


Abbildung 4.2.15: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

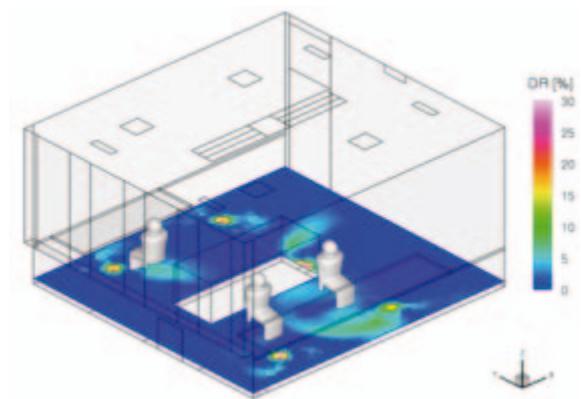


Abbildung 4.2.16: Zugluftisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.2.3. Fazit

Diese Belüftungsvariante ist ebenfalls für sommerliche Verhältnisse als sehr günstig anzusehen. Die Solltemperatur von 26 °C wird kaum überschritten und es herrscht ein sehr homogenes und behagliches Raumklima. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die Versorgung mit Frischluft im Innenwandbereich etwas schlechter ist, als im Falle des Quellluftauslasses.

### 4.3. Variante PL5 F1D Winter – Drallauslässe im Boden und Putzheizdecke mit Kapillarrohrmatte

#### 4.3.1. Randbedingungen der Simulation

- Wandaufbau der abgehängten Decke entsprechend Vorgabe IBO
- Boden als Hohlraumboden
  
- Heizleistung: maximal  $52 \text{ W/m}^2$
- Verlegedichte 85 %, Streifen oberhalb der Trennwand zum Flur ausgespart

Regelung/Heizdecke:

- Regelung der Heizdecke mittels PI-Regler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt
- Position des Sensors in 0,6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 22 \text{ °C}$

Lüftung:

- 5 Drallauslässe entsprechend Vorgabe IBO im Bodenbereich, Durchmesser 150 mm, Positionen entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von  $105 \text{ m}^3/\text{h}$ , gleichmäßig auf die Auslässe aufgeteilt
- Zulufttemperatur 2 K unterhalb der Sensortemperatur, gleitend

Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

#### 4.3.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

##### Zeitverlauf

Im Falle der hier modellierten winterlichen Verhältnisse zeigt sich, dass die Anlage beim Wiederaufheizen am Montag erst deutliche Schwierigkeiten hat, die Solltemperaturen über den gesamten Nutzungszeitraum zu sichern. Die geforderten  $22 \text{ °C}$  im Sensorpunkt werden erst gegen 12 Uhr erreicht, im Anschluss daran kommt es dann infolge der inneren Quellen zu einer leichten Überhitzung des Raumes.

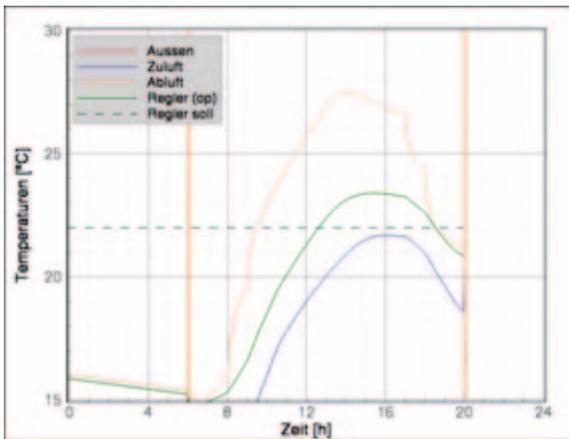


Abbildung 4.3.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

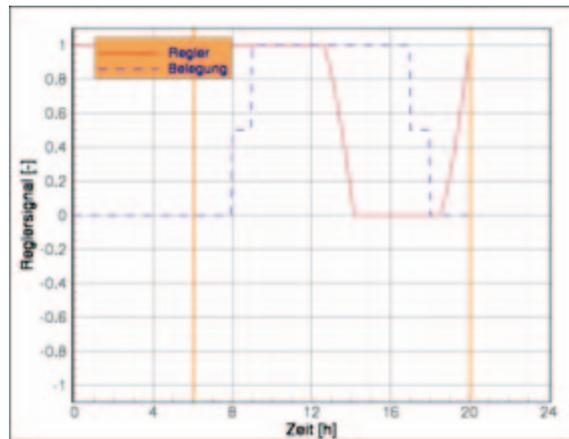


Abbildung 4.3.02: Reglersignal und Belegung

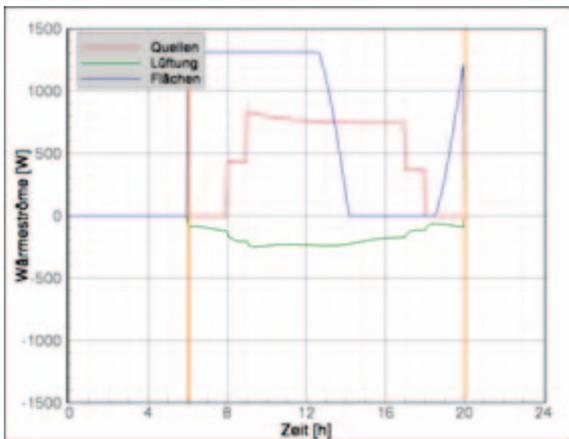


Abbildung 4.3.03: Wärmeströme - Input

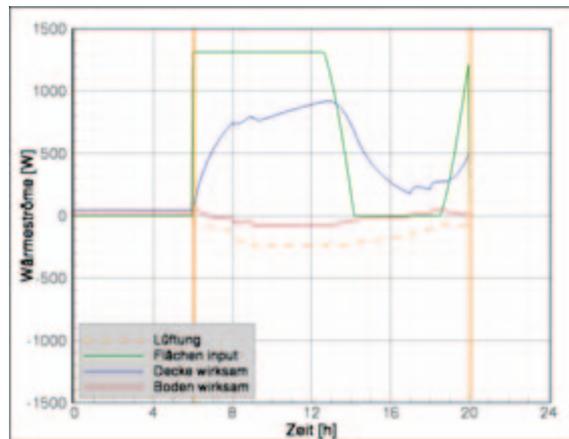


Abbildung 4.3.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Für die Beurteilung der Variante wurden hier stellvertretend die Resultate der Simulation um 10 Uhr, also zu einem Zeitpunkt herangezogen, in dem die Solltemperatur im Sensorpunkt noch nicht erreicht wurde, siehe Abbildungen 4.3.05-4.3.14.

Aus Sicht der Frischluftverteilung ist die Variante auch für winterliche Verhältnisse als sehr gut einzustufen. Es bildet sich ein Frischluftsee, und man kann deutlich das Aufsteigen der Luft im Bereich der Personen erkennen.

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit ist dieser Zeitpunkt als etwas zu kühl einzustufen, was durch die immer noch recht niedrige Temperatur der Umfassungsflächen hervorgerufen wird. Dies hat Einfluss auf die Strahlungstemperatur und dementsprechend auch auf den PMV-Index.

Die Deckenheizung, verbunden mit den um 2 K unterhalb der Sensortemperatur einblasenden Drallluftauslässen führt zu einer großen Temperaturschichtung im Raum.

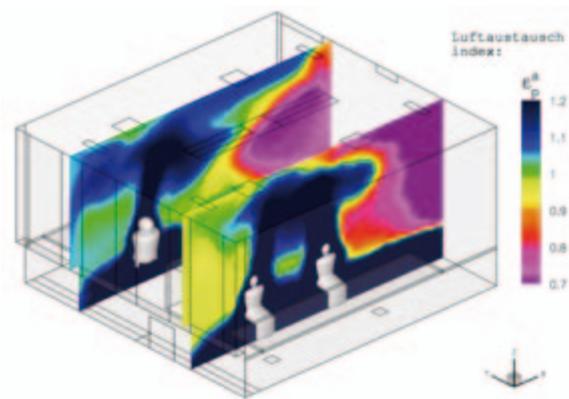


Abbildung 4.3.05: Luftaustauschindex – Vertikalschnitt

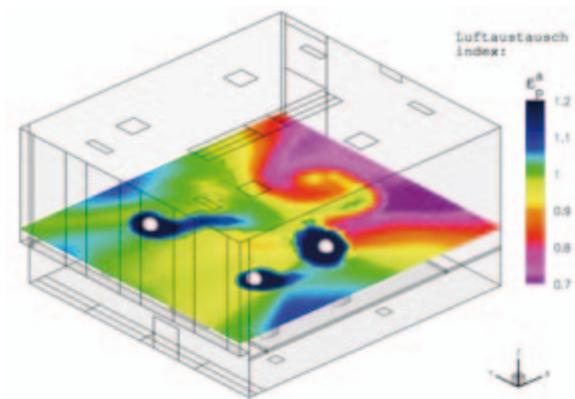


Abbildung 4.3.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1$  m

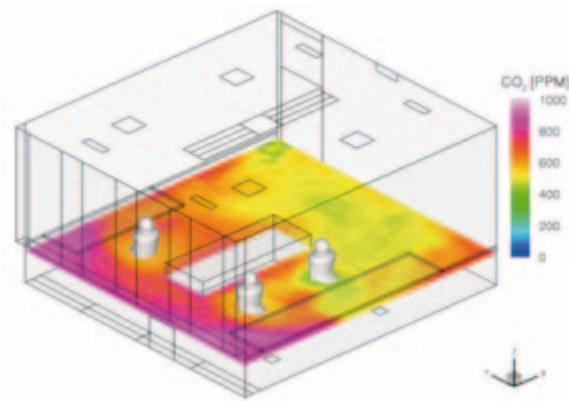


Abbildung 4.3.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm  $z = 0,6$  m

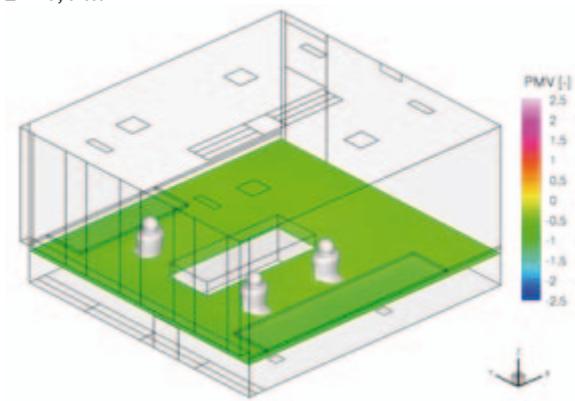


Abbildung 4.3.08: PMV-Index bei  $z = 0,6$  m

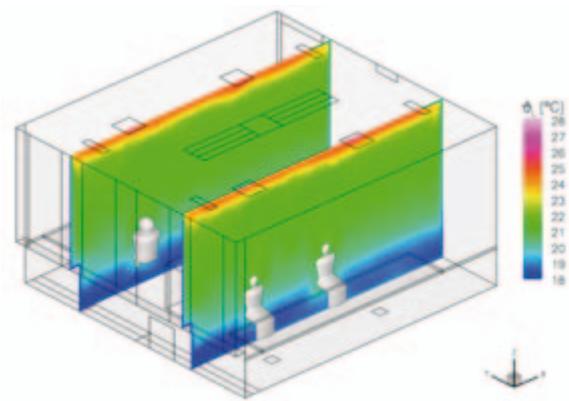


Abbildung 4.3.09: Lufttemperatur Vertikalschnitt

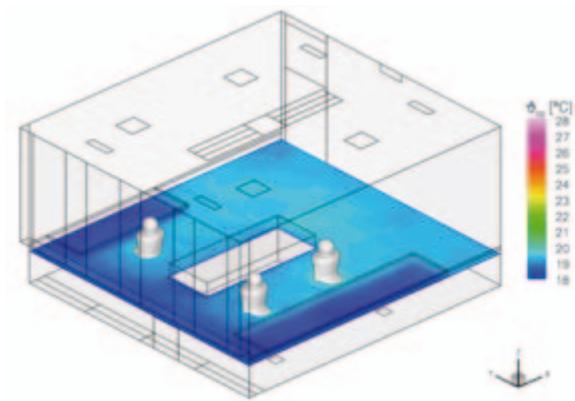


Abbildung 4.3.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6$  m

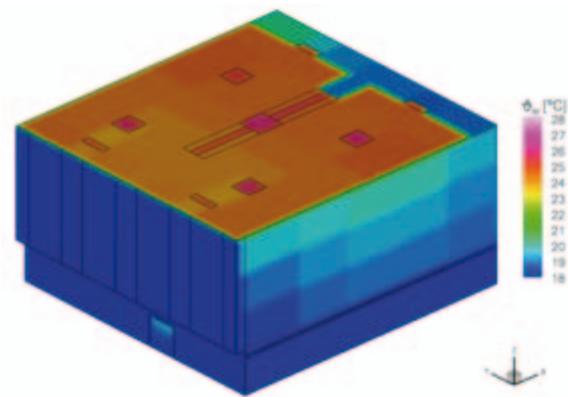


Abbildung 4.3.11: Wandtemperaturen mit Decke

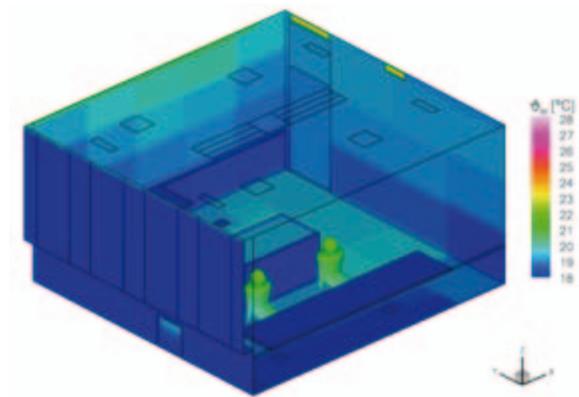


Abbildung 4.3.12: Wandtemperaturen mit Boden

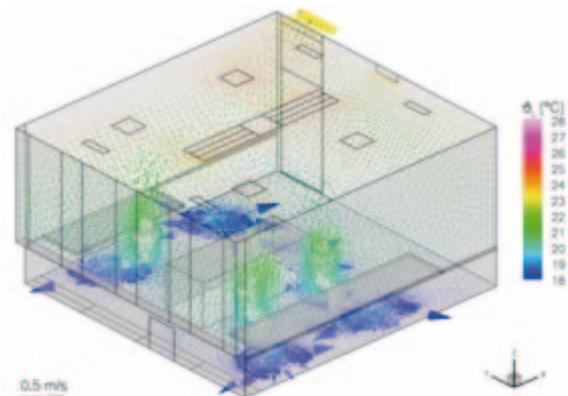


Abbildung 4.3.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

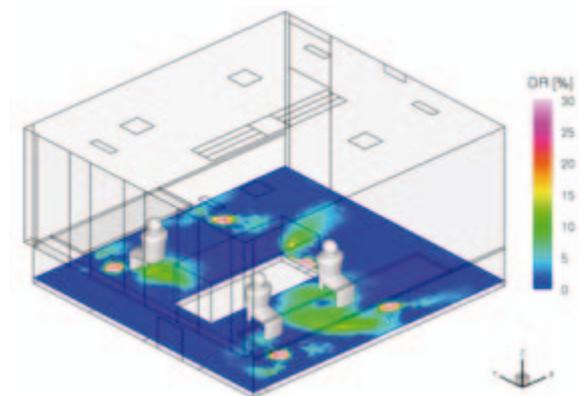


Abbildung 4.3.14: Zugluftisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.3.3. Fazit

Bei winterlichen Verhältnissen zeigt sich, dass die Kombination einer Heizdecke mit Drallluftauslässen im Bodenbereich, die zudem mit Untertemperatur einblasen, zu leichten Einbußen bei der thermischen Behaglichkeit führen kann. Durch die Deckenheizung kommt es zu einer stabilen Temperaturschichtung, die erwärmte Luft bleibt im oberen Raumbereich und wird somit erst spät im Aufenthaltsbereich wirksam. Im weiteren Verlauf des Tages führen die inneren Lasten zudem zu einer Überhitzung des Raumes. Um das Verhalten der Anlage zu verbessern, wäre es z.B. denkbar, die Zuluft frühmorgens mit Übertemperatur einzubringen und erst zur Nutzungszeit auf die 2 K Untertemperatur umzuschalten.

## 4.4. Variante PL2 F5A Sommer – Lüftungsgitter und Fußbodenkühlung

### 4.4.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Fußbodenkühlung, Trockenestrich, Decke analoger Aufbau, thermoaktive Schicht in Fußboden und Decke (als Kühlung für Raum darüber), 2.5 cm unterhalb des Estrichs
- Kühlleistung: maximal 30 W/m<sup>2</sup>
- Verlegedichte 90 %, über Faktor realisiert

Regelung/Fußbodenkühlung:

- Regelung mittels PI-Regler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Lüftung:

- 1 Lüftungsgitter mittig oben an der Innenwand entsprechend Vorgabe IBO, Abmessungen 25 x 125 mm, Position entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur 6 K unterhalb der Sensortemperatur, gleitend.

Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00Uhr

### 4.4.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Im Falle der Fußbodenkühlung in Verbindung mit dem Zuluftgitter kommt es fast über den gesamten Nutzungszeitraum zu einer leichten Überschreitung der Solltemperatur im Sensorpunkt. Die Kühlleistung der Fußbodenkühlung reicht in diesem Falle nicht aus, die hohen inneren Lasten zu kompensieren.

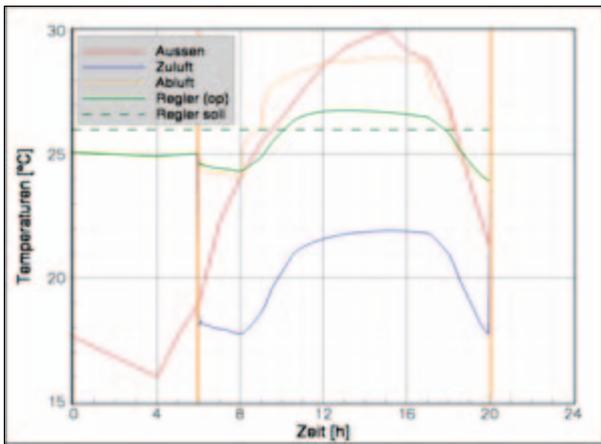


Abbildung 4.4.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

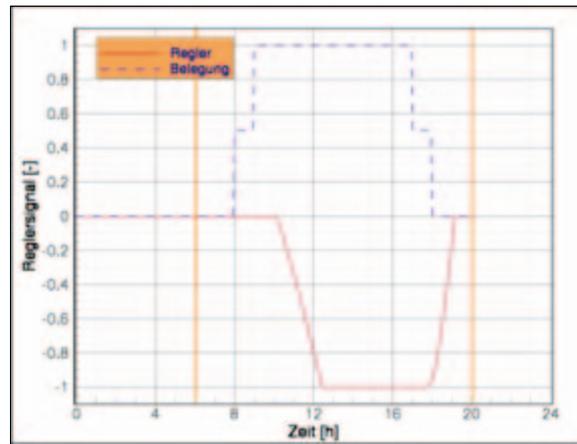


Abbildung 4.4.02: Reglersignal und Belegung

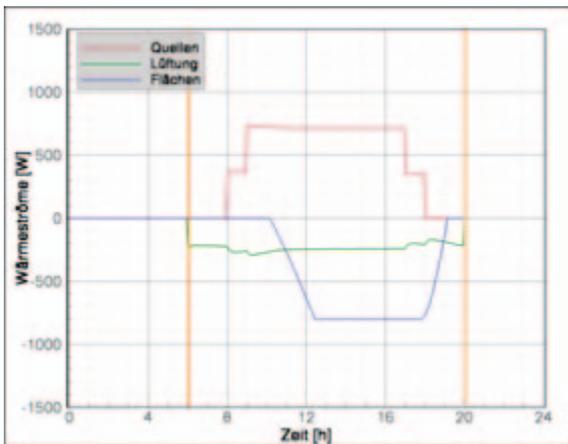


Abbildung 4.4.03: Wärmeströme – Input

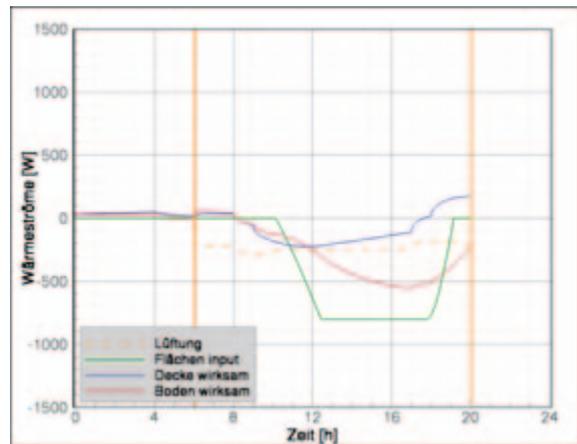


Abbildung 4.4.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Auch hier wurden beispielhaft die Resultate um 16 Uhr, also zu einem Zeitpunkt hoher thermischer Belastung des Raumes zur Bewertung der thermischen und Behaglichkeitsverhältnisse herangezogen, siehe Abbildungen 4.4.05-4.4.16.

Insgesamt stellt sich, bedingt durch den im oberen Bereich eingebrachten Zuluftstrahl ein deutlich inhomogeneres Strömungsfeld ein. Die Versorgung des Aufenthalts mit Frischluft sowie der Abtransport von CO<sub>2</sub> sind hier schlechter als in den vorangegangenen Varianten. Es kommt zu einer starken Durchmischung von Zu- und Raumluft, was sich auch in Werten des lokalen Luftaustauschindex nahe 1 widerspiegelt.

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit ist die Variante als zu warm einzustufen, eine Kühlung im Bodenbereich ist nicht ausreichend, um die hohen inneren Lasten zu kompensieren.

Die Zugbelastung ist in diesem Falle ebenfalls höher, jedoch im Bereich der Personen unproblematisch.

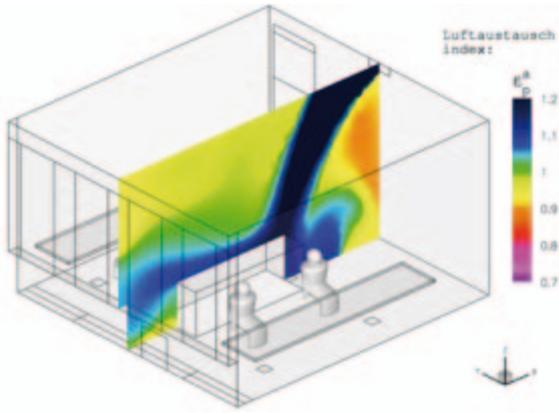


Abbildung 4.4.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

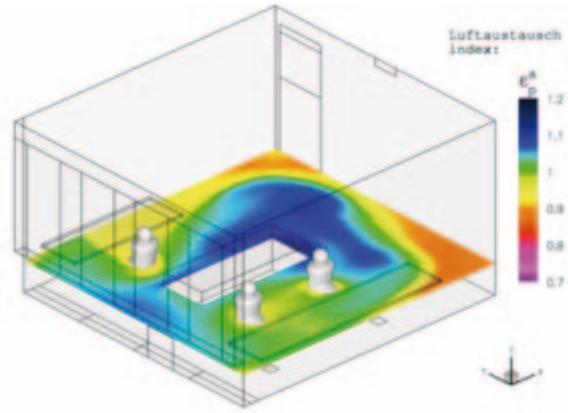


Abbildung 4.4.06: Luftaustauschindex bei  $z = 0,6 \text{ m}$

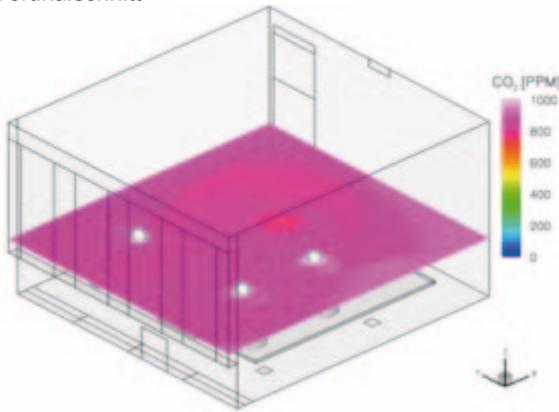


Abbildung 4.4.07:  $\text{CO}_2$ -Konzentration in ppm -  $z = 1,1 \text{ m}$

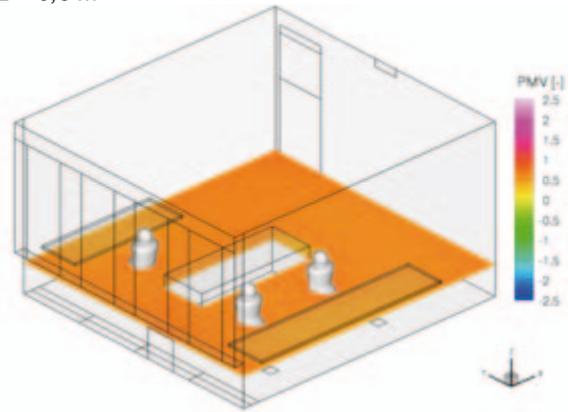


Abbildung 4.4.08: PMV-Index bei  $z = 0,6 \text{ m}$

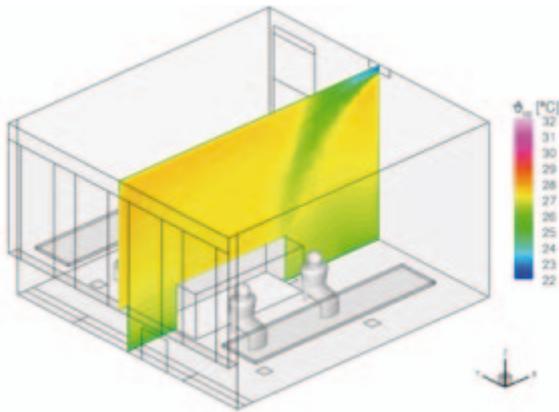


Abbildung 4.4.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

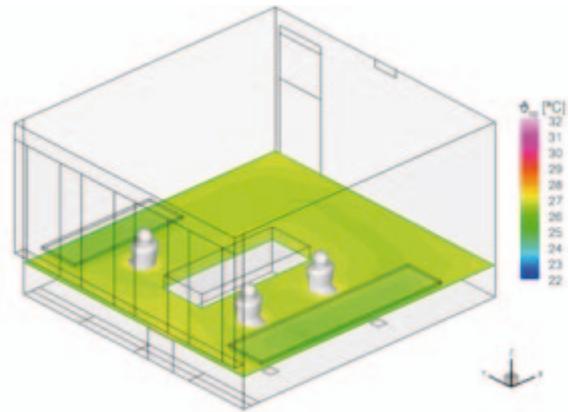


Abbildung 4.4.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6 \text{ m}$

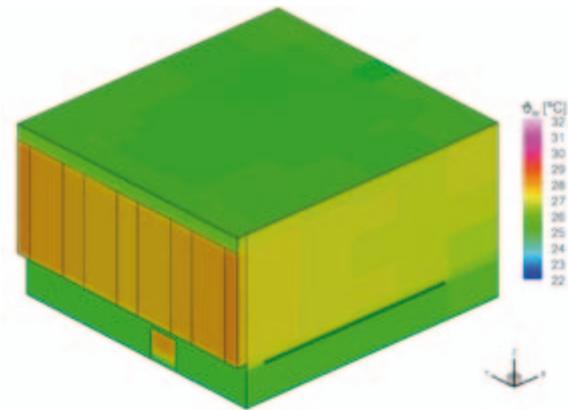


Abbildung 4.4.11: Wandtemperaturen mit Decke

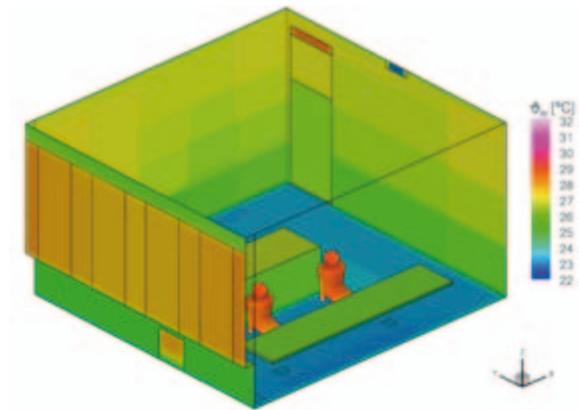


Abbildung 4.4.12: Wandtemperaturen mit Boden

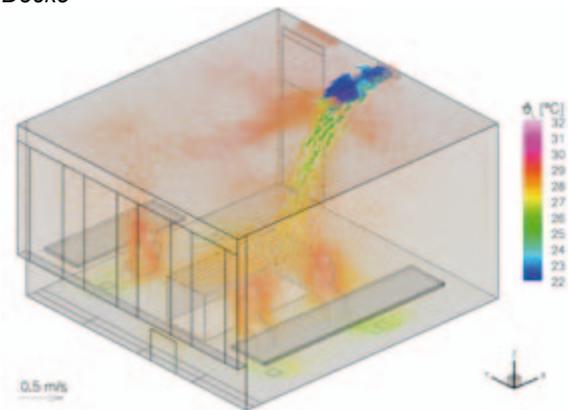


Abbildung 4.4.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

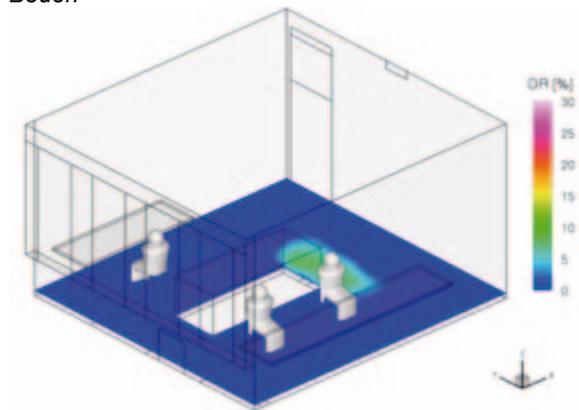


Abbildung 4.4.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

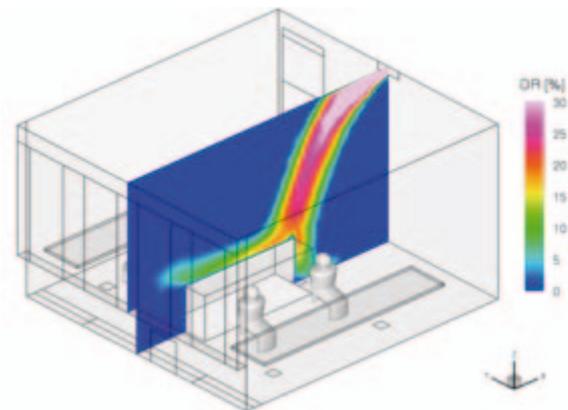


Abbildung 4.4.15: Zugluftrisiko - Vertikalschnitt

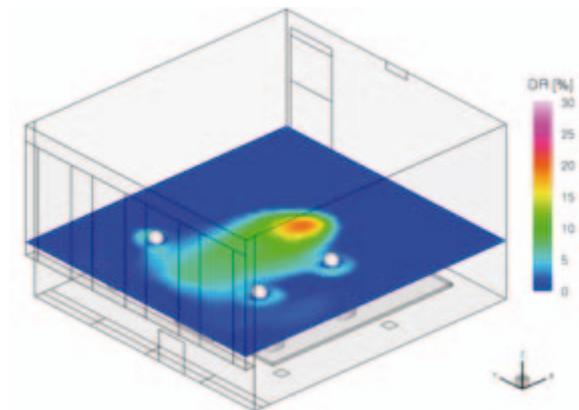


Abbildung 4.4.16: Zugluftrisiko im Kopfbereich (1,1 m)

### 4.4.3. Fazit

Unter den hier gegebenen Voraussetzungen führt die Kombination des Lüftungsgitters mit Fußbodenkühlung zu einer dauerhaften Überschreitung der Solltemperatur von 26 °C. Der Raum ist aus Sicht der thermischen Behaglichkeit als zu warm einzustufen.

## 4.5. Variante PL2 F5A Winter – Lüftungsgitter und Fußbodenheizung

### 4.5.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Fußbodenheizung Trockenestrich, Decke analoger Aufbau, thermoaktive Schicht in Fußboden und Decke (als Heizung für Raum darüber)
- Heizleistung: maximal 50 W/m<sup>2</sup>
- Belegungsdichte 90 %, über Faktor realisiert

Regelung/Fußbodenheizung:

- Regelung mittels PI-Regler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt.

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 22 \text{ °C}$

Lüftung:

- 1 Lüftungsgitter mittig oben an der Innenwand entsprechend Vorgabe IBO, Abmessungen 325 x 125 mm, Position entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur isotherm, gleitend

Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.5.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Unter winterlichen Bedingungen ist die Variante sehr schnell in der Lage, die geforderte Solltemperatur von 22 °C zu erreichen. Daran anschließend sind allein die inneren thermischen Quellen ausreichend, den Raum auf dem geforderten Temperaturniveau zu halten.

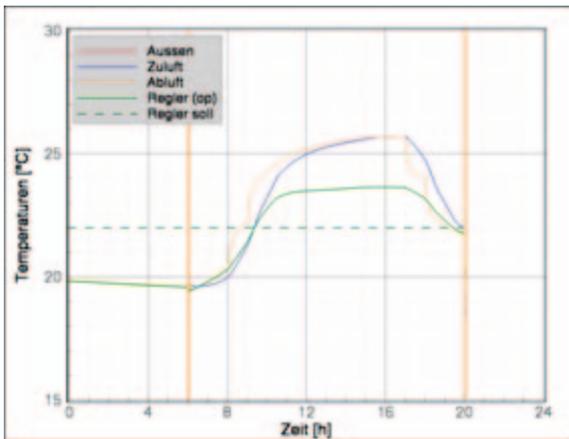


Abbildung 4.5.01: Temperaturverläufe am Koppeltag

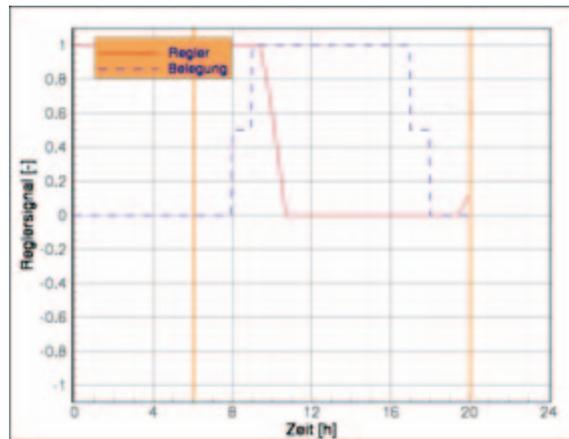


Abbildung 4.5.02: Reglersignal und Belegung

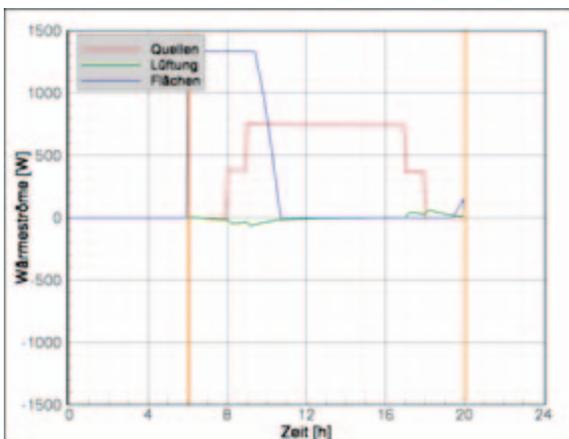


Abbildung 4.5.03: Wärmeströme - Input

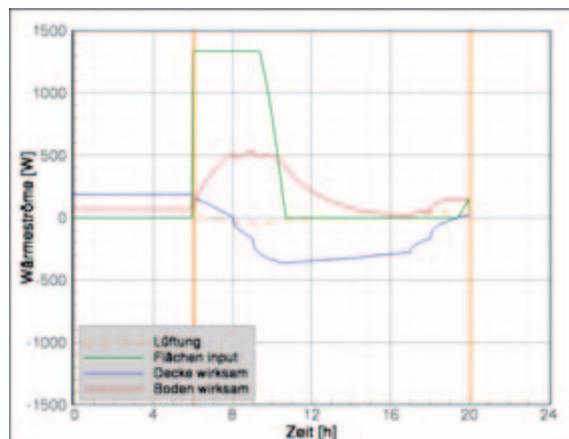


Abbildung 4.5.04: Wärmeströme raumwirksam

## Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.5.05-4.5.14 zeigen die Resultate der Simulation um 10 Uhr.

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit ist die Variante als etwas zu warm einzustufen. Die Einbringung der Zuluft isotherm durch das Lüftungsgitter führt zudem zu einer etwas schlechteren Versorgung des Raumes mit Frischluft, da diese sich bereits im oberen Raumbereich mit der Raumluft vermischt.

Darüber hinaus verstärkt der Zuluftstrahl die Fallströmung an der kühlen Glasfassade, wodurch sich im Bodenbereich leichte Zugerscheinungen ergeben.

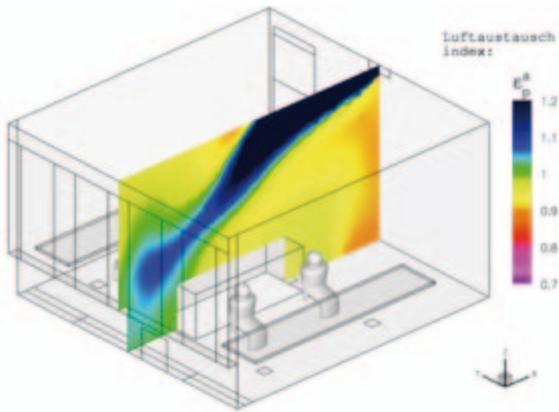


Abbildung 4.5.05: Luftaustauschindex – Vertikal-schnitt

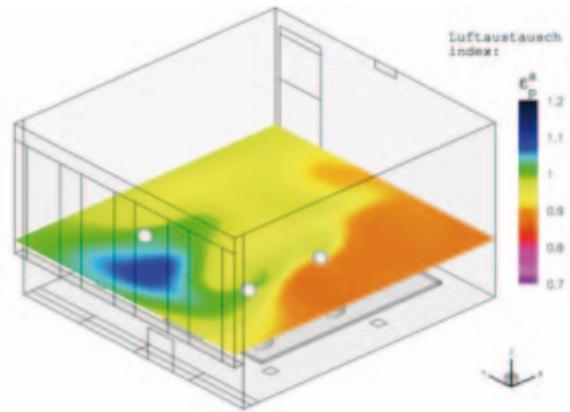


Abbildung 4.5.06: Luftaustauschindex bei z = 1,1 m

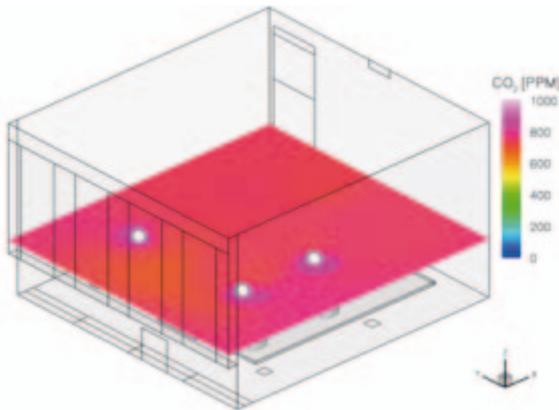


Abbildung 4.5.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm - z = 1,1 m

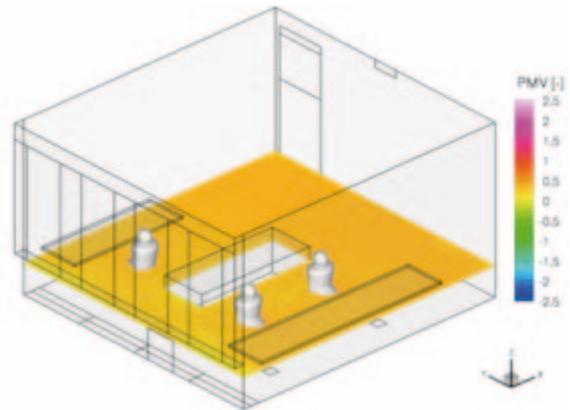


Abbildung 4.5.08: PMV-Index bei z = 0,6 m

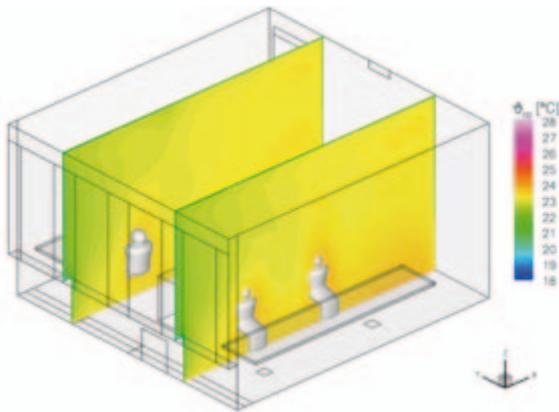


Abbildung 4.5.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

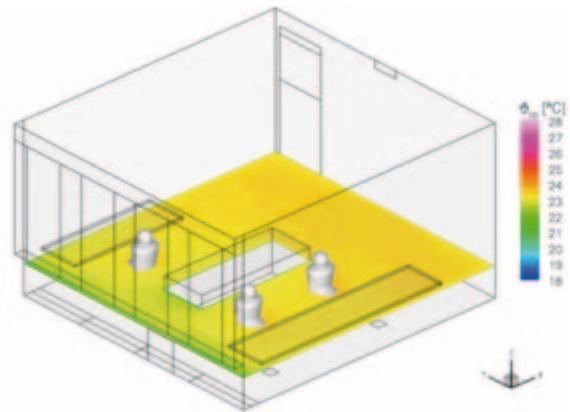


Abbildung 4.5.10: Operative Temperatur bei z = 0,6 m

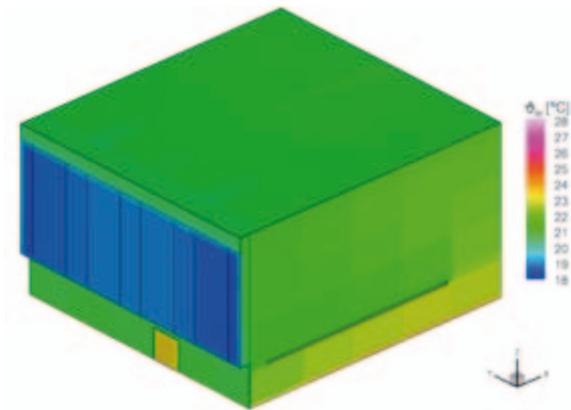


Abbildung 4.5.11: Wandtemperaturen mit Decke

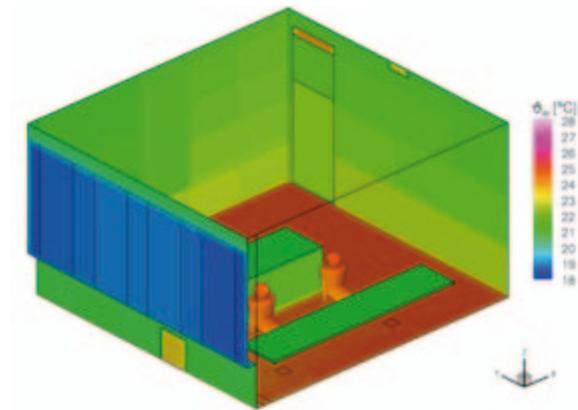


Abbildung 4.5.12: Wandtemperaturen mit Boden

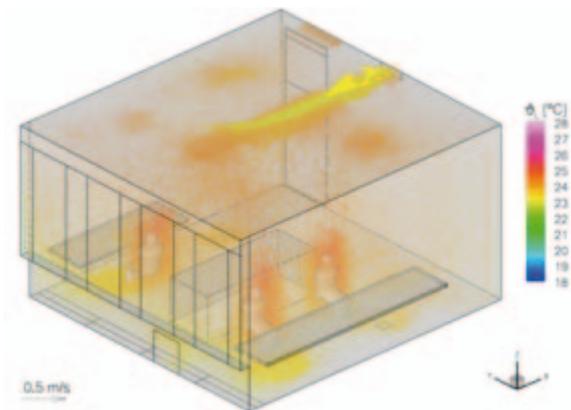


Abbildung 4.5.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

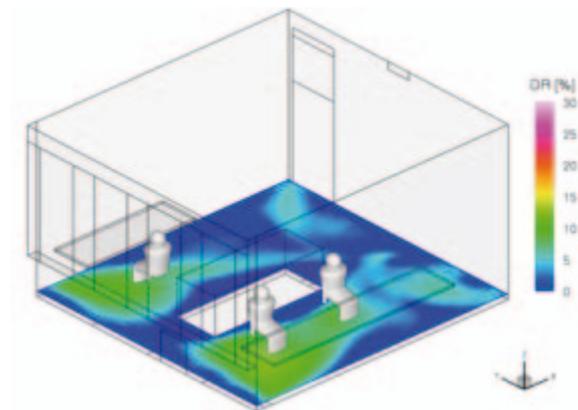


Abbildung 4.5.14: Zugluftisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.5.3. Fazit

Im Falle winterlicher Verhältnisse ist diese Variante sehr gut geeignet, thermisch akzeptable Verhältnisse im Raum zu sichern. Die Solltemperatur wird sehr schnell erreicht.

Aufgrund der inneren Lasten kommt es dann zu einer Überhitzung des Raumes, obwohl die Fußbodenheizung heruntergeregelt ist.

## 4.6. Variante PL4 F2A Sommer – Quelllüftung und Betonkernaktivierung

### 4.6.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau, thermoaktive Schicht in Fußboden und Decke (in der 28 cm Stahlbetonschicht)
- Kühlleistung: maximal 40 W/m<sup>2</sup>
- Verlegedichte 95 %, über Faktor realisiert

Regelung/Betonkernaktivierung:

- Regelung mittels PI-Regler nach mittlerer Oberflächentemperatur der Decke

Solltemperatur an der Decke:  $\vartheta_w = 23 \text{ °C}$

Lüftung: Quellluftauslass entsprechend Vorgabe IBO unterhalb der Fensterfassade

- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur 4 K unter Raumluftsensortemperatur (analog Variante PL4-F1D ), gleitend

Start der Betonkernaktivierung um 0:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.6.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Die Quelllüftung und die Energieabgabe der Betonkernaktivierung ermöglicht trotz der hohen inneren Lasten über die gesamte Nutzungszeit die Einhaltung der Solltemperatur von 26 °C. Die geforderte Deckentemperatur von 23 °C wird zwar überschritten, die installierte Kühlleistung reicht aber trotzdem aus.

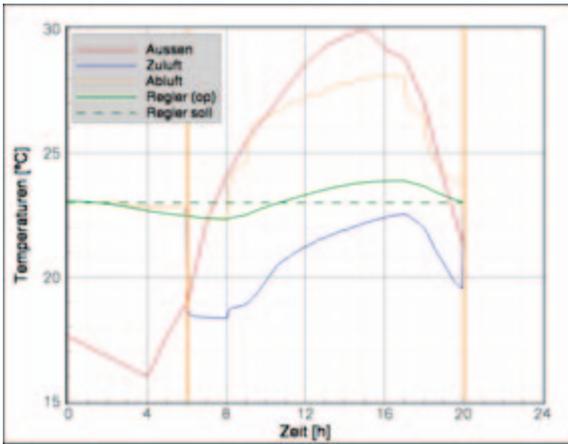


Abbildung 4.6.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

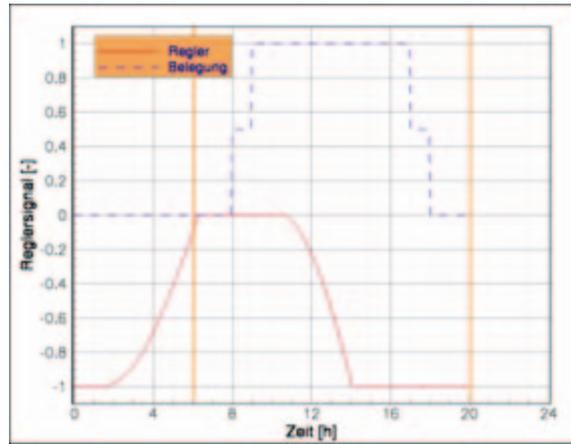


Abbildung 4.6.02: Reglersignal und Belegung

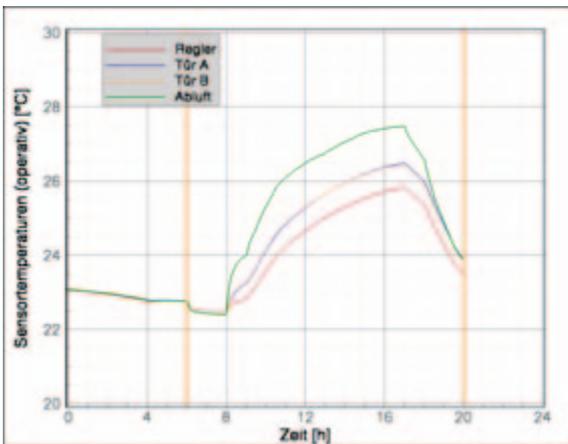


Abbildung 4.6.03: Sensortemperaturen

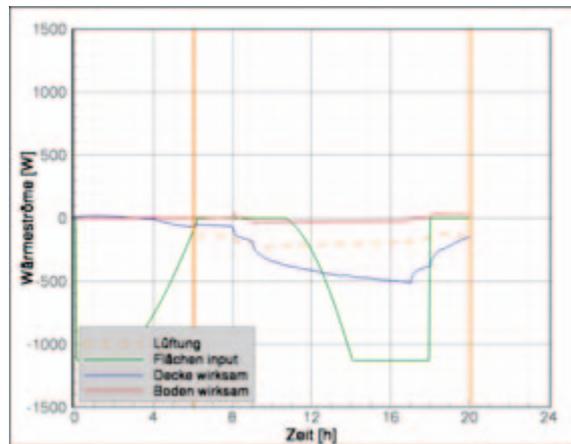


Abbildung 4.6.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Ergebnisse der Simulation um 16 Uhr zeigen, dass dieses Anlagenkonzept hervorragend geeignet ist, die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit und den Luftaustausch zu erfüllen. Lediglich im Bereich des Quellluftauslasses kommt es zu leichten Zugscheinungen. Im übrigen Raum stellen sich sehr günstige klimatische Verhältnisse ein.

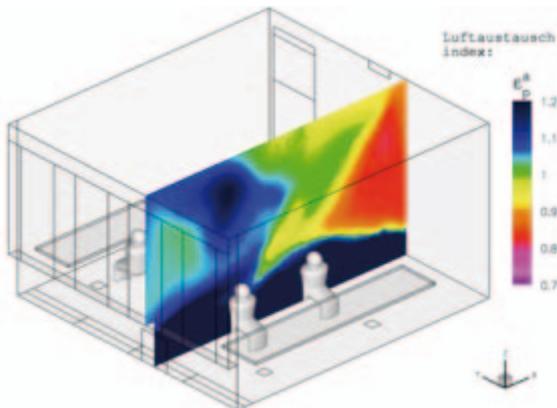


Abbildung 4.6.05: Luftaustauschindex – Vertikal-schnitt

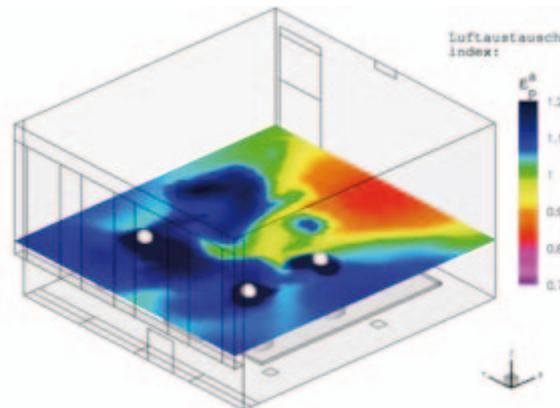


Abbildung 4.6.06: Luftaustauschindex bei z = 1,1 m

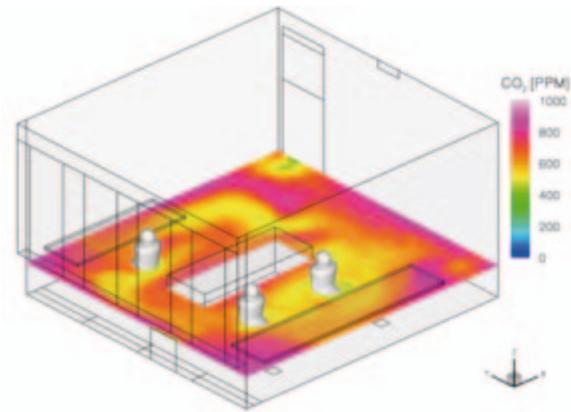


Abbildung 4.6.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm - z = 0,6 m

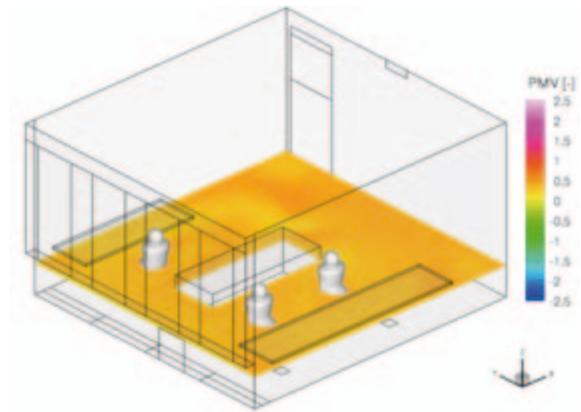


Abbildung 4.6.08: PMV-Index bei z = 0,6 m

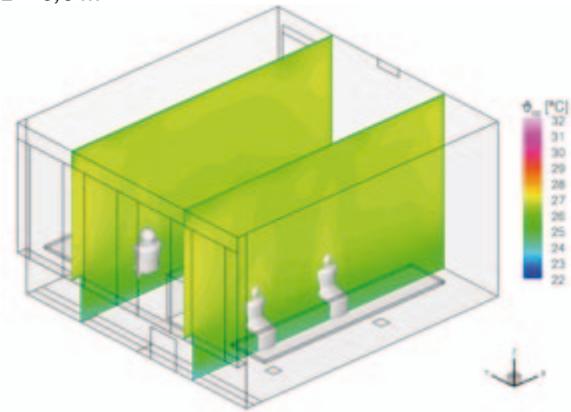


Abbildung 4.6.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

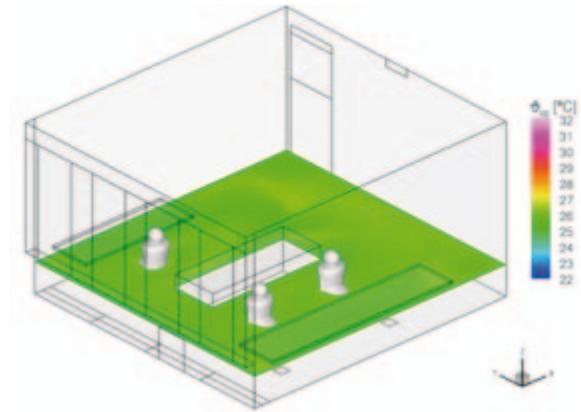


Abbildung 4.6.10: Operative Temperatur bei z = 0,6 m

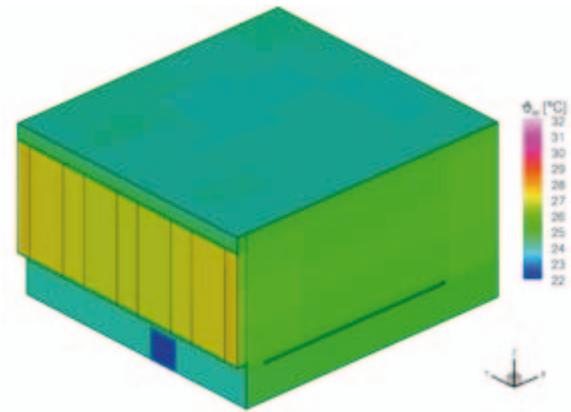


Abbildung 4.6.11: Wandtemperaturen mit Decke

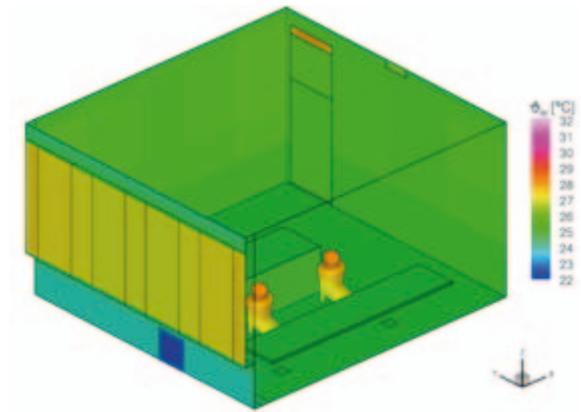


Abbildung 4.6.12: Wandtemperaturen mit Boden

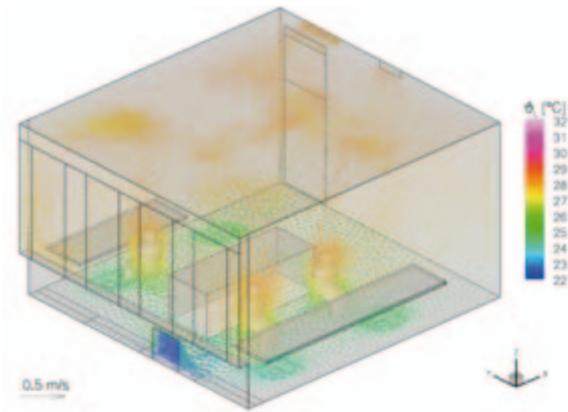


Abbildung 4.6.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

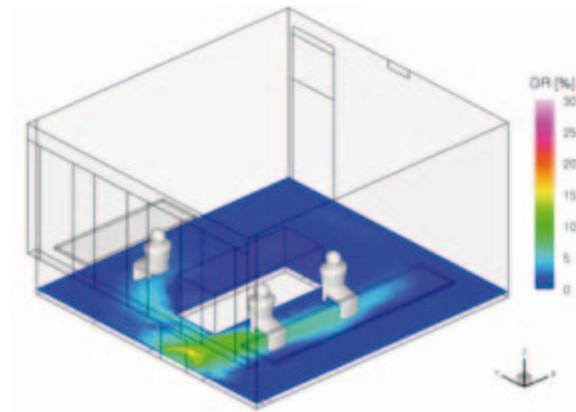


Abbildung 4.6.14: Zugluftisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.6.3. Fazit

Betonkernaktivierung und Quelllüftung in Kombination ermöglichen eine sehr gute Klimatisierung und Belüftung des Raumes unter den hier modellierten sommerlichen Bedingungen.

## 4.7. Variante PL4 F2A Winter – Quelllüftung und Betonkernaktivierung

### 4.7.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau, thermoaktive Schicht in Fußboden und Decke (in der 28 cm Stahlbetonschicht)
- Heizleistung: maximal 30 W/m<sup>2</sup>
- Verlegedichte 95 %, über Faktor realisiert

Regelung/Betonkernaktivierung:

- Regelung mittels PI-Regler nach mittlerer Oberflächentemperatur der Decke.

Solltemperatur an der Decke:  $\vartheta_w = 24 \text{ °C}$

Lüftung: Quellluftauslass entsprechend Vorgabe IBO unterhalb der Fensterfassade

- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur 4 K unter Raumluftsensortemperatur (analog Variante PL4-F1D ), gleitend

Start der Betonkernaktivierung um 0:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.7.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Auch unter winterlichen Bedingungen ist die hier modellierte Anlagenkombination in der Lage, die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit zu erfüllen. Lediglich zwischen 8 und 10 Uhr gibt es eine leichte Unterschreitung der geforderten Solltemperatur. Da die Temperaturen allerdings trotzdem noch bei 21 °C liegen, ist nicht von einer Beeinträchtigung der Nutzer auszugehen. Hier zeigt sich auch der große Vorteil der Betonkernaktivierung. Durch die in den Decken gespeicherte Energie kommt es zu einer wesentlich geringeren Auskühlung des Raumes am Wochenende. Im Mittel liegen die Temperaturen zu Beginn der Nutzungszeit um fast 5 K höher.

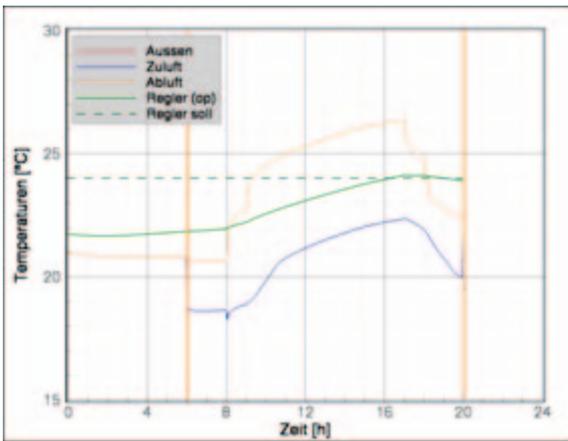


Abbildung 4.7.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

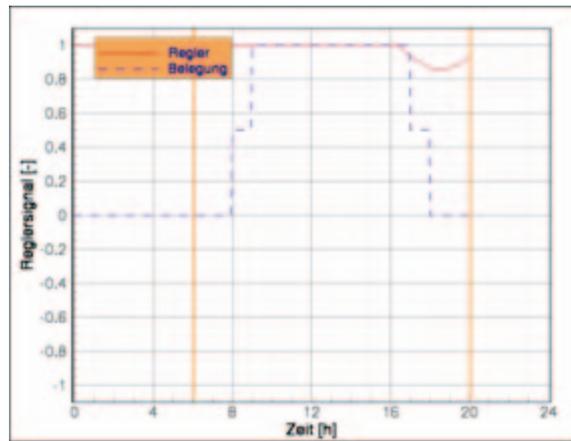


Abbildung 4.7.02: Reglersignal und Belegung

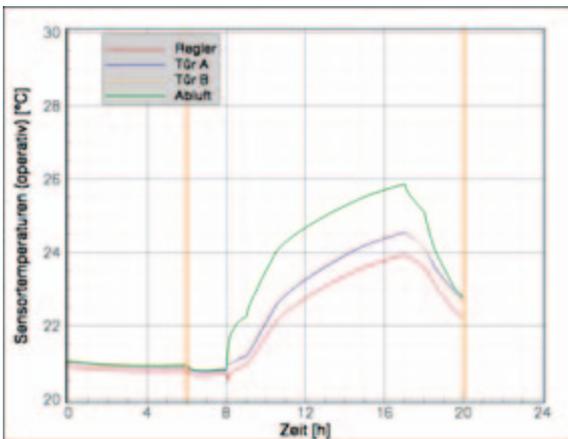


Abbildung 4.7.03: Sensortemperaturen

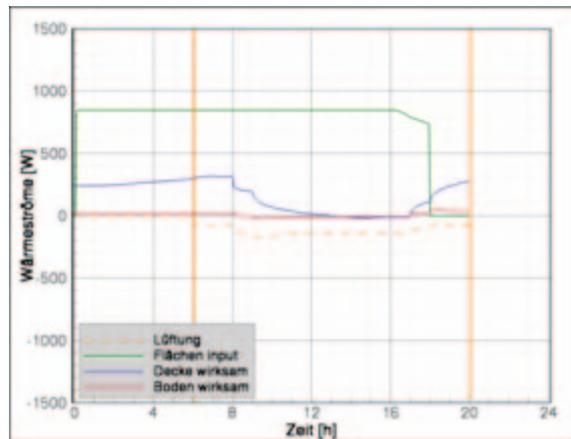


Abbildung 4.7.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.7.05-4.7.14 zeigen ebenso, wie in der sommerlichen Variante, ein sehr ausgeglichenes Raumklima. Sowohl aus Sicht des Luftaustausches als auch aus Sicht der thermischen Behaglichkeit gibt es keine Einschränkungen (hier beispielhaft für 10 Uhr). Die im Tagesverlauf auftretende leichte Überhitzung des Raumes ist eine Folge der inneren Lasten.

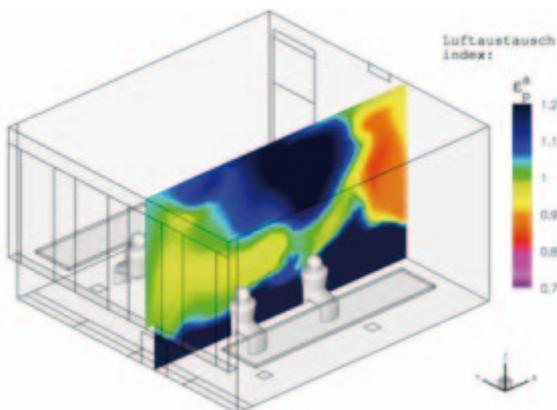


Abbildung 4.7.05: Luftaustauschindex – Vertikalschnitt

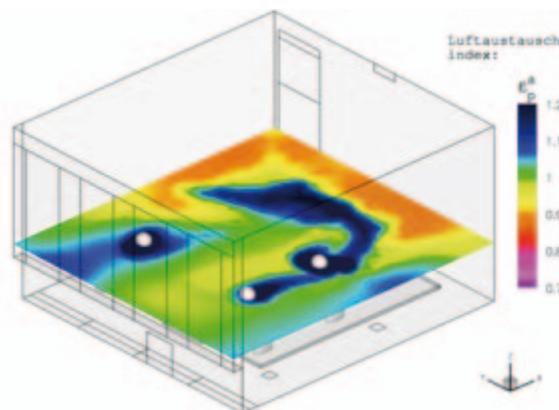


Abbildung 4.7.06: Luftaustauschindex bei z = 1,1 m

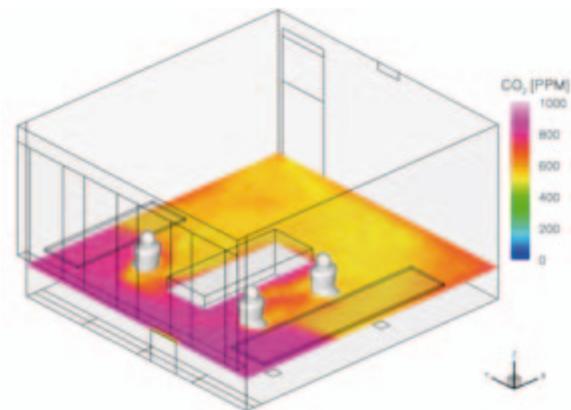


Abbildung Abb. 4.7.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm - z = 0,6 m

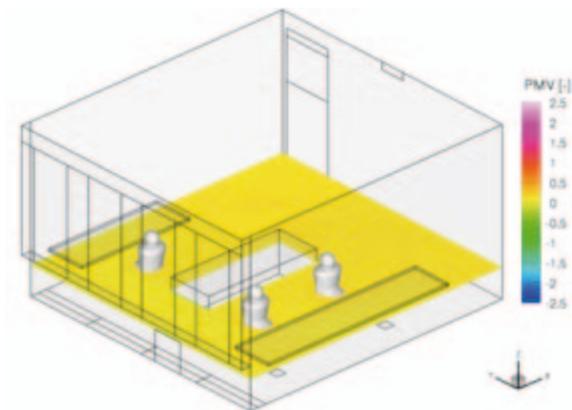


Abbildung 4.7.08: PMV-Index bei z = 0,6 m

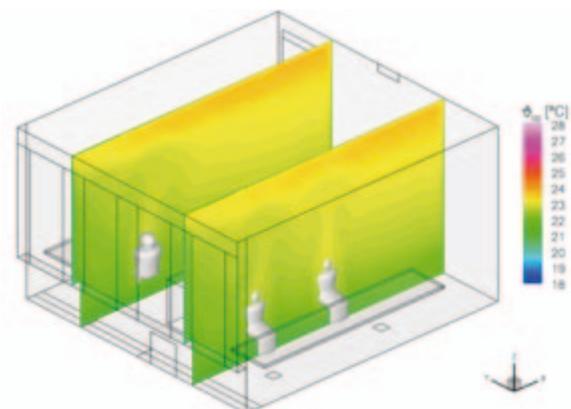


Abbildung 4.7.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

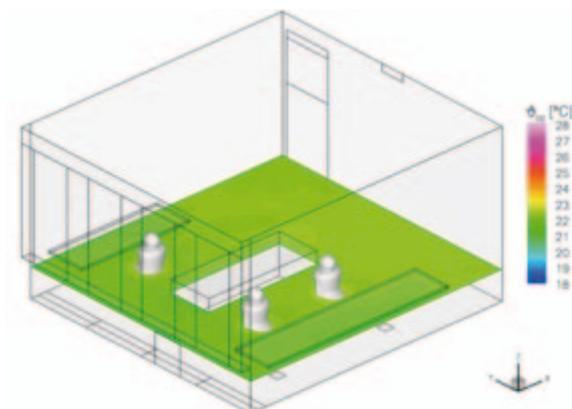


Abbildung 4.7.10: Operative Temperatur bei z = 0,6 m

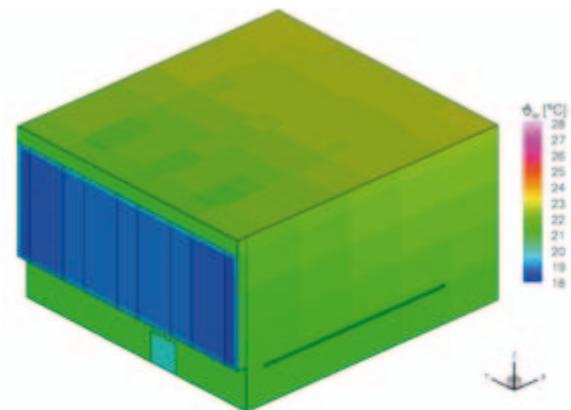


Abbildung 4.7.11: Wandtemperaturen mit Decke

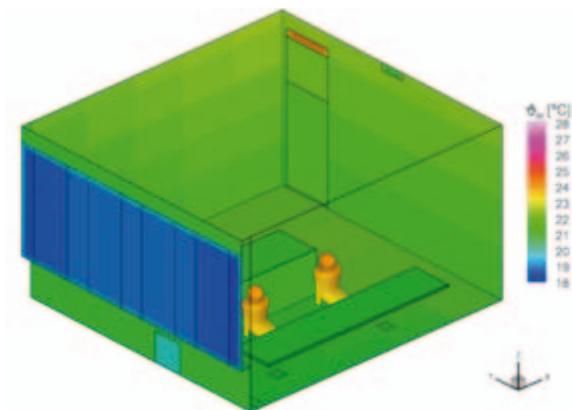


Abbildung 4.7.12: Wandtemperaturen mit Boden

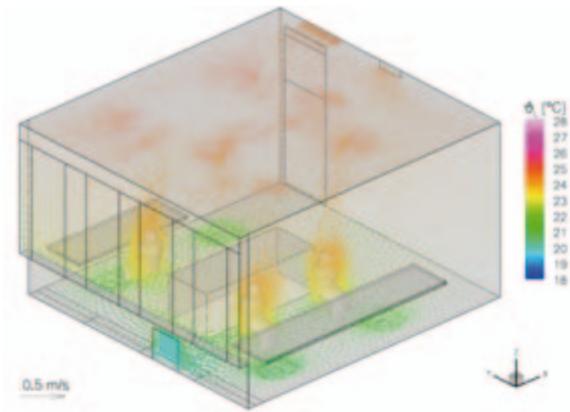


Abbildung 4.7.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

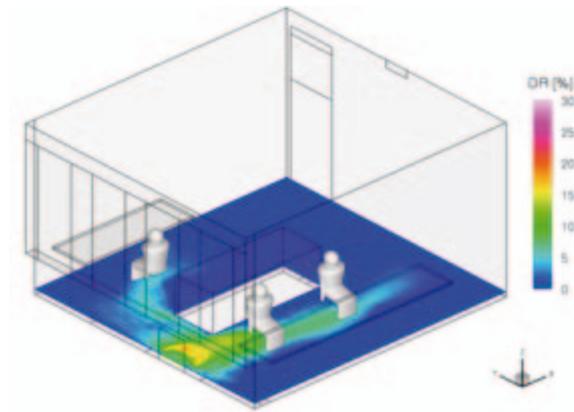


Abbildung 4.7.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.7.3. Fazit

Die Betonkernaktivierung und die Quelllüftung in Kombination sind auch unter winterlichen Verhältnissen sehr gut geeignet, die Anforderungen an Raumluftqualität und thermische Behaglichkeit zu erfüllen.

## 4.8. Variante PL2 L1A Sommer – Lüftungsgitter und Ventilatorconvektoren

### 4.8.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau

Ventilatorconvektor:

- 2 Geräte, unterhalb der Brüstung, reiner Umluftbetrieb.
- Realisiert über Gitter in Fassade und Fensterbrett. Untere Gitter, HxB = 0.15 x 0.8 m, obere Gitter: HxB = 0.1 x 0.8 m, bei y = 1.6 m und 4.2 m
- Kühlleistung max. 2 x 2.42 kW, Volumenstromregelung, Untertemperatur der Zuluft: 15 K, minimal jedoch 14 °C
- Ausblasgeschwindigkeit 1.3 bis max 2 m/s nach oben, Ansaugung max 1.2 m/s nach unten/vorn (Zuluftvolumenstrom max 2 x 484 m<sup>3</sup>/h, in höchster Stufe)

Regelung:

- Regelung mittels Zweipunktregler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt. Anlage läuft auf erster Stufe, Volumenstrom: 2 x 252 m<sup>3</sup>/h, Regelung dieser Stufe mittels Zweipunktregler: Einschaltpunkt 26 °C, Ausschaltpunkt 24 °C
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ °C}$

Lüftung:

- 1 Lüftungsgitter mittig oben an der Innenwand entsprechend Vorgabe IBO, Abmessungen 325 x 125 mm, Position entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur isotherm

### 4.8.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Anhand der Diagramme 4.8.01 - 4.8.04 ist klar erkennbar, dass die installierten Ventilatorconvektoren in der niedrigsten Leistungsstufe betrieben werden können, um die geforderte Solltemperatur von 26 °C am Sensorpunkt einzuhalten. Aufgrund der hohen Eintrittsvolumenströme und der niedrigen Eintrittstemperatur

wird die geforderte Raumtemperatur sehr schnell erreicht. Durch die Nutzung des Zweipunktreglers kommt es zu einem Takten der Anlage. Zudem ist erkennbar, dass sich die kalte Umluft der Konvektoren nur auf den unteren Raumbereich auswirkt, die starken Schwankungen der Sensortemperatur treten im Bereich der Abluftöffnung nur sehr viel geringer auf.

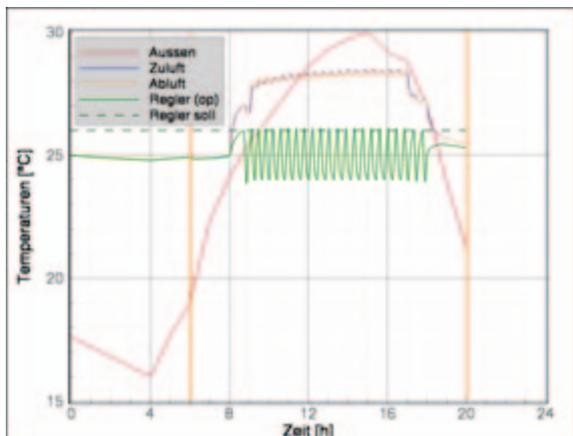


Abbildung 4.8.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

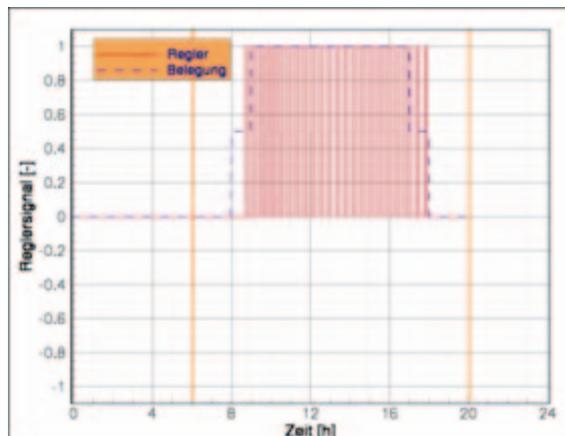


Abbildung 4.8.02: Reglersignal und Belegung

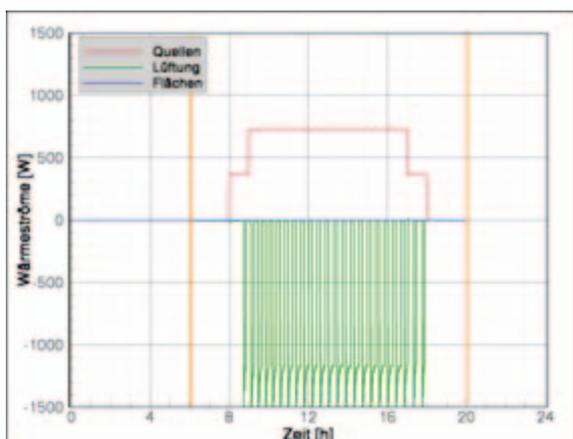


Abbildung 4.8.03: Wärmeströme - Input

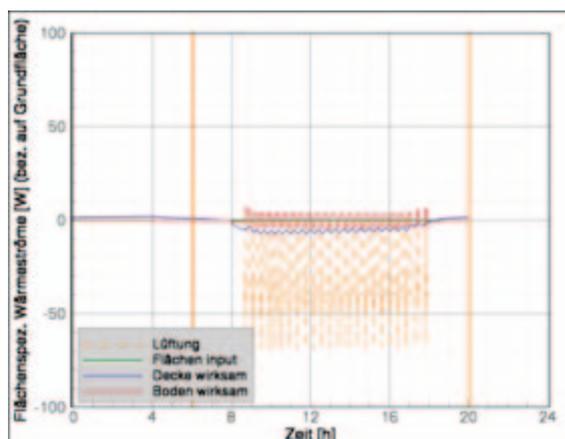


Abbildung 4.8.04: Wärmeströme raumwirksam

## Ausgewählte Zeitpunkte

Um den Anlagenbetrieb hier deutlich darstellen zu können, wurden zwei unterschiedliche Zeitpunkte gewählt. Ein Zeitpunkt, an dem die Konvektoren in Betrieb sind, in diesem Falle 10 Uhr und ein zweiter Zeitpunkt 16 Uhr, an dem die Konvektoren nicht betrieben werden müssen.

Anhand der Abbildungen ist gut erkennbar, dass die hier gewählte Anlagenkonfiguration zwar in der Lage ist, die geforderte Solltemperatur schnell zu erreichen, dafür jedoch deutliche Abstriche in Bezug auf thermische Behaglichkeit und Luftqualität zur Folge hat.

Da die Ventilator-konvektoren in reinem Umluftbetrieb arbeiten, tragen sie nicht zum Luftaustausch des Raumes bei. Darüber hinaus führt der hohe Umluftwechsel zu einem Kaltluftsee im unteren Raumbereich. Zusätzlich bewirkt der isotherm eingebrachte Zuluftvolumenstrom im oberen Raumbereich in Verbindung mit der Absaugung oberhalb der Tür und den Auftriebseffekten an der warmen Glasfassade einen deutlichen Kurzschlusseffekt. Die frische Zuluft verbleibt somit im oberen Raumbereich, und die Luft in der

Aufenthaltszone wird nur unzureichend ausgetauscht. Dies spiegelt sich auch in sehr hohen Werten der CO<sub>2</sub>-Konzentration wider.

Zudem kommt es aufgrund der niedrigen Austrittstemperatur und des hohen Volumenstroms der Ventilator-konvektoren im Betrieb zu Zugerscheinungen im Knöchelbereich.

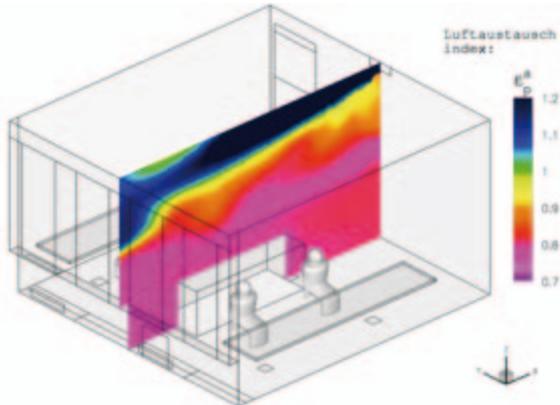


Abbildung 4.8.05: Luftaustauschindex – Vertikalschnitt um 10 Uhr

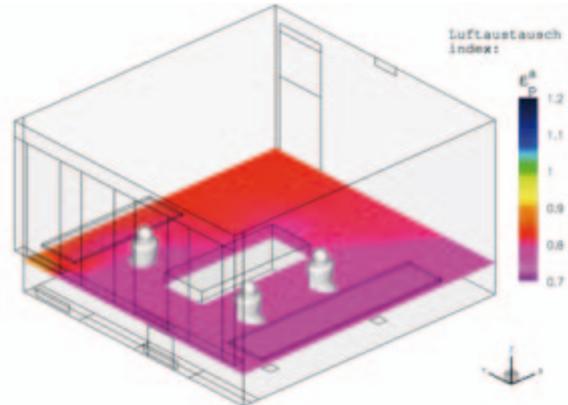


Abbildung 4.8.06: Luftaustauschindex bei z = 0,6 m um 10 Uhr

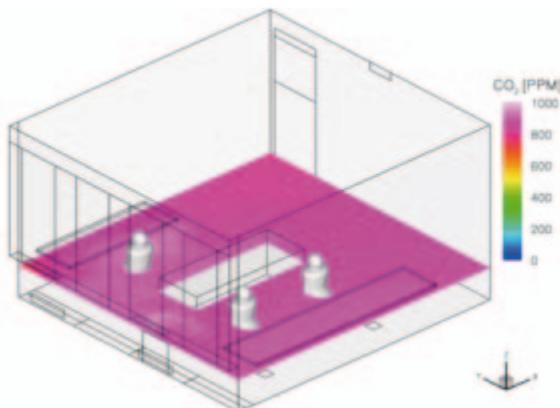


Abbildung 4.8.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm - z = 0,6 m um 10 Uhr

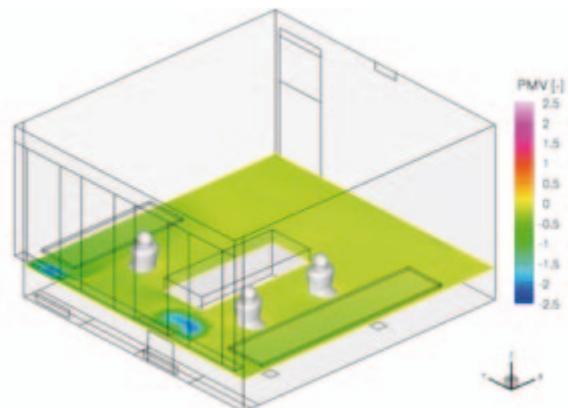


Abbildung 4.8.08: PMV-Index bei z = 0,6 m um 10 Uhr

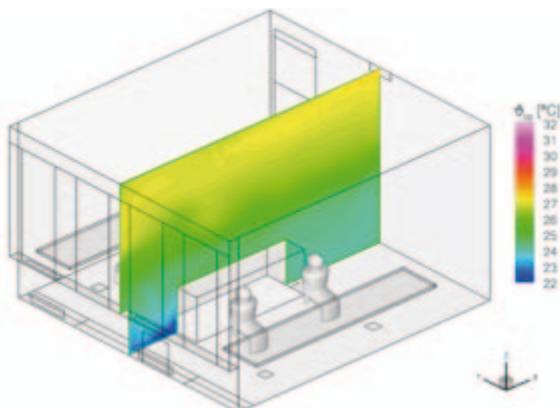


Abbildung 4.8.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt um 10 Uhr

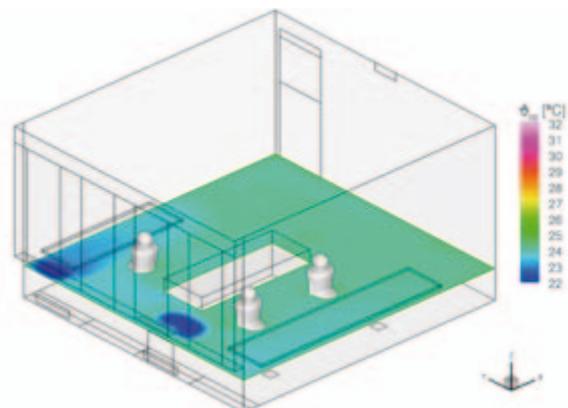


Abbildung 4.8.10: Operative Temperatur bei z = 0,6 m um 10 Uhr

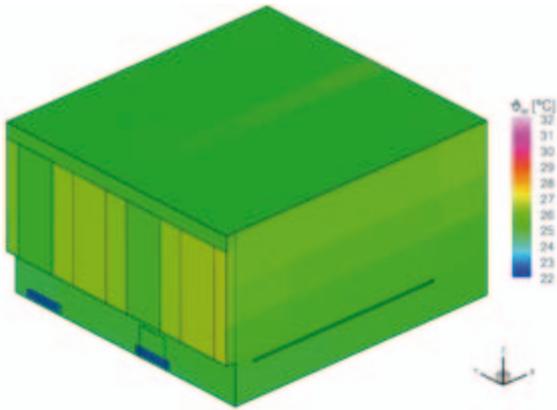


Abbildung 4.8.11: Wandtemperaturen mit Decke um 10 Uhr

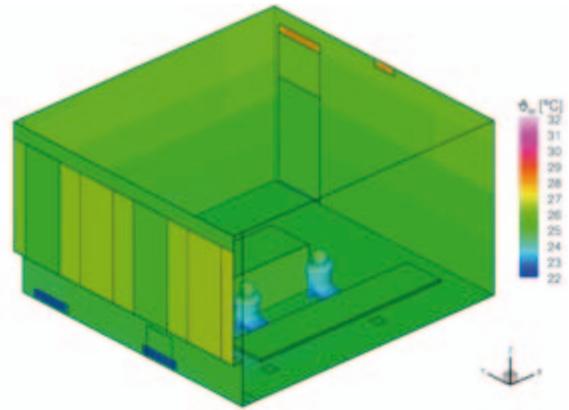


Abbildung 4.8.12: Wandtemperaturen mit Boden um 10 Uhr

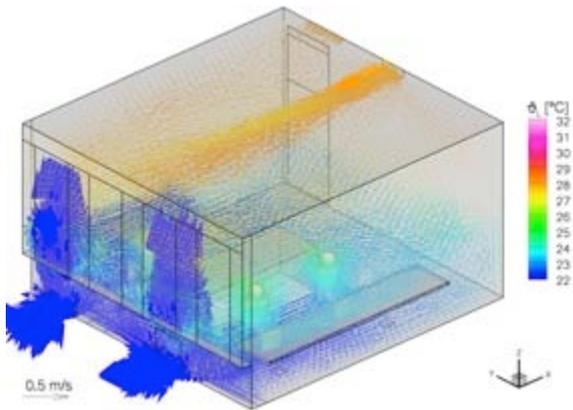


Abbildung 4.8.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt um 10 Uhr

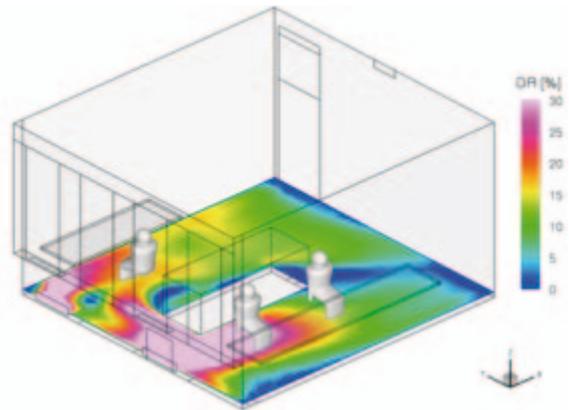


Abbildung 4.8.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m) um 10 Uhr

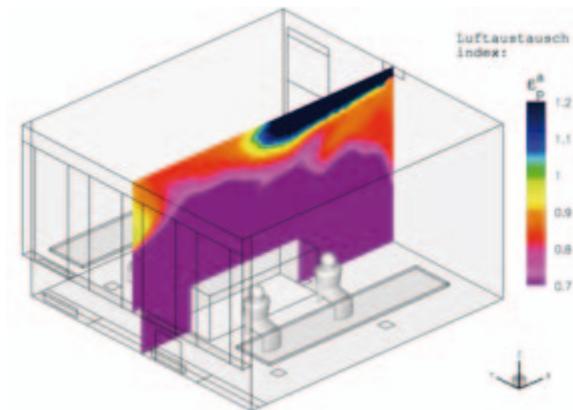


Abbildung 4.8.15: Luftaustauschindex – Vertikal-schnitt um 16 Uhr

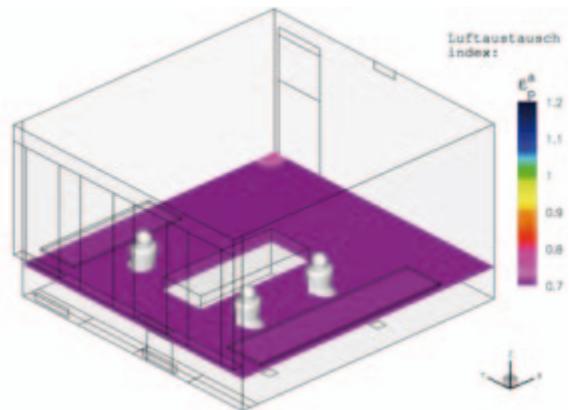


Abbildung 4.8.16: Luftaustauschindex bei  $z = 0,6 \text{ m}$  um 16 Uhr

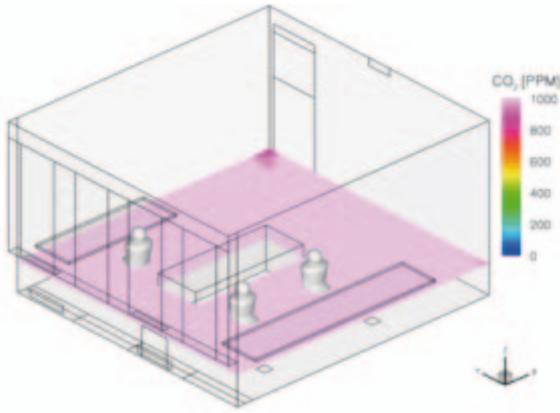


Abbildung 4.8.17: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm - z = 0,6 m um 16 Uhr

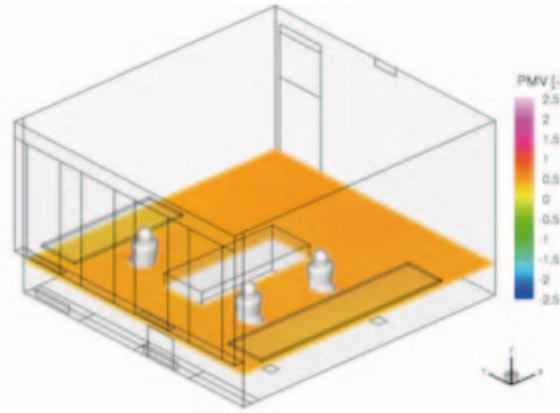


Abbildung 4.8.18: PMV-Index bei z = 0,6 m um 16 Uhr

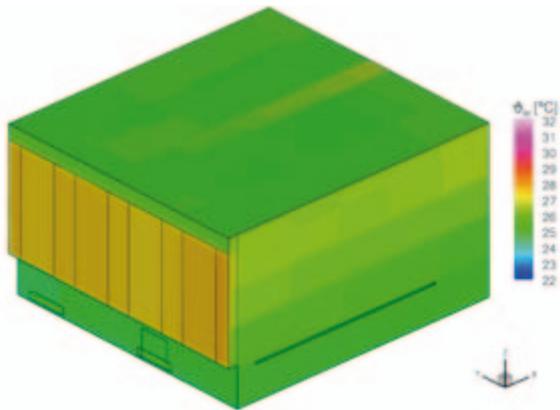


Abbildung 4.8.19: Wandtemperaturen mit Decke um 16 Uhr

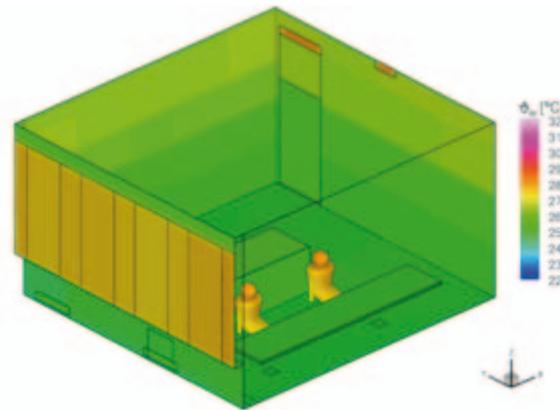


Abbildung 4.8.20: Wandtemperaturen mit Boden um 16 Uhr

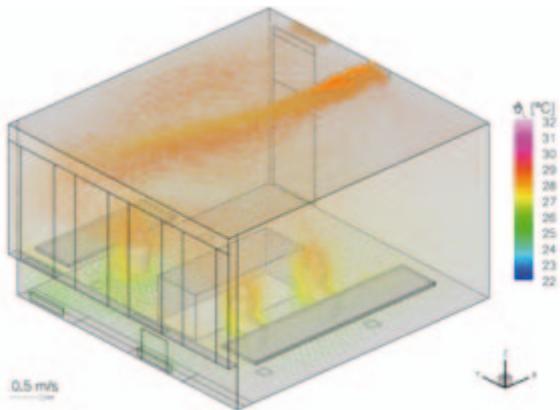


Abbildung 4.8.21: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt um 16 Uhr

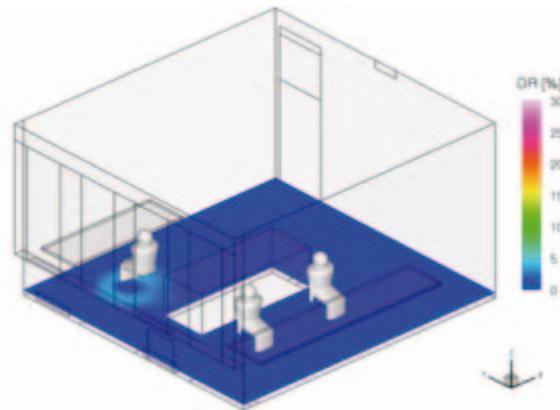


Abbildung 4.8.22: Zugluftisiko im Bodenbereich (0,1 m) um 16 Uhr

### 4.8.3. Fazit

Die Nutzung der Ventilatorconvektoren in reinem Umluftbetrieb und mit Ausblasung nach oben in Verbindung mit einer isotherm eingebrachten Grundlüftung führt zu deutlichen Einbußen in Bezug auf die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit.

## 4.9. Variante PL2 L1A Winter – Lüftungsgitter und Ventilatorkonvektoren

### 4.9.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau

Ventilatorkonvektor:

- 2 Geräte, unterhalb der Brüstung, reiner Umluftbetrieb.
- Realisiert über Gitter in Fassade und Fensterbrett. Untere Gitter, HxB = 0.15 x 0.8 m, obere Gitter: HxB = 0.1 x 0.8 m, bei y = 1.6 m und 4.2 m

Heizleistung max. 2 x 3.31 kW, Volumenstromregelung, Übertemperatur der Zuluft: 20 K

- Ausblasgeschwindigkeit 1.3 bis max 2 m/s nach oben, Ansaugung max 1.2 m/s nach unten/vorn (Zuluftvolumenstrom max 2 x 484 m<sup>3</sup>/h, in höchster Stufe)

Regelung:

- Regelung mittels Zweipunktregler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt. Anlage läuft auf erster Stufe, Volumenstrom: 2 x 252 m<sup>3</sup>/h, Regelung dieser Stufe mittels Zweipunktregler: Einschaltpunkt 22 °C, Ausschaltpunkt 24 °C
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 22 \text{ °C}$

Lüftung:

- 1 Lüftungsgitter mittig oben an der Innenwand entsprechend Vorgabe IBO, Abmessungen 325 x 125 mm, Position entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur isotherm

### 4.9.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Anhand der Diagramme 4.9.01–4.9.04 erkennt man deutlich, dass die Ventilatorkonvektoren auch unter winterlichen Verhältnissen in der Lage sind, die geforderte Sollraumtemperatur zu realisieren. Ein Betrieb

der Konvektoren ist lediglich in den Zeitbereichen außerhalb der Nutzung erforderlich. Im Nutzungszeitraum reichen die inneren Quellen selbst aus, den Raum am Sensorpunkt auf 22 °C zu halten.

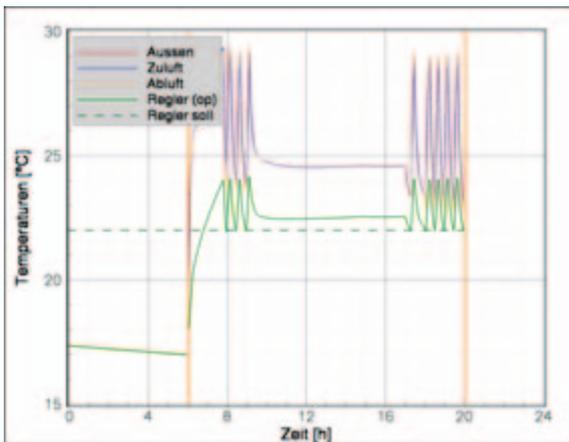


Abbildung 4.9.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

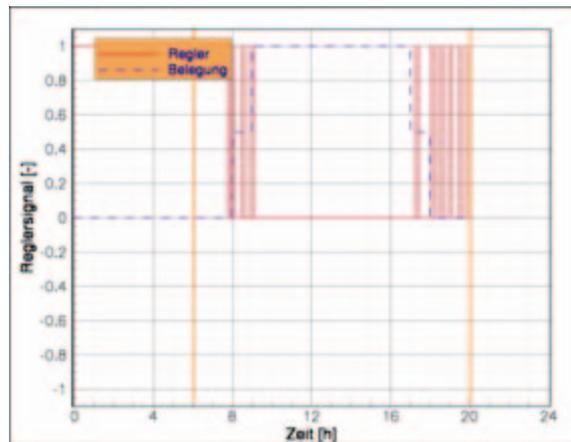


Abbildung 4.9.02: Reglersignal und Belegung

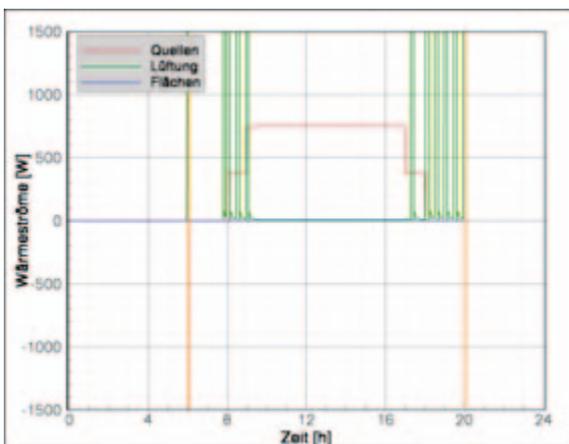


Abbildung 4.9.03: Wärmeströme - Input

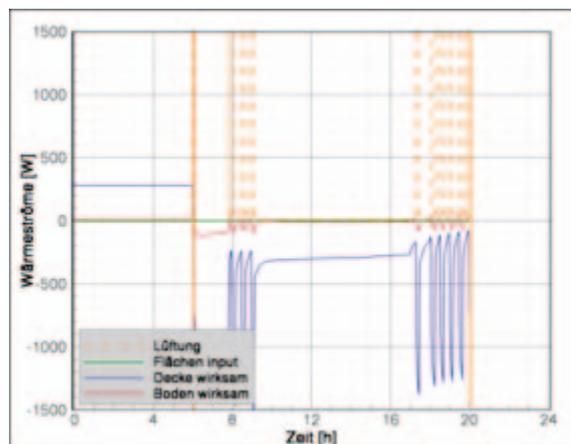


Abbildung 4.9.04: Wärmeströme raumwirksam

## Ausgewählte Zeitpunkte

Um den Anlagenbetrieb deutlich darstellen zu können, wurden hier zwei unterschiedliche Zeitpunkte gewählt. Ein Zeitpunkt, an dem die Konvektoren in Betrieb sind, in diesem Falle 9 Uhr und ein zweiter Zeitpunkt 16 Uhr, an dem die Konvektoren nicht betrieben werden müssen.

Die Abbildungen 4.9.05–4.9.24 zeigen, dass die Anlagenkonfiguration unter winterlichen Verhältnissen sehr gut geeignet ist, die erforderliche Solltemperatur zu gewährleisten. Darüber hinaus werden die Anforderungen an Luftqualität und thermische Behaglichkeit ebenfalls sehr gut erfüllt.

Im Betrieb führen die Ventilatorkonvektoren aufgrund ihres hohen Volumenstroms und der hohen Austrittstemperatur zu einer Raumlufthalze, durch die letztlich die an der Innenwand eingebrachte Frischluft nach unten in den Aufenthaltsbereich abgelenkt wird. Dadurch kommt es dort zu einem hohen Luftaustausch.

Im Falle nicht arbeitender Ventilatorkonvektoren kommt es aufgrund der Fallströmung an den Scheiben zu

einer gegenläufigen Raumluftwalze, mit der ebenfalls die eingebrachte Frischluft in den Aufenthaltsbereich transportiert wird. Somit ergeben sich in allen Betriebspunkten ein hoher Luftaustausch und eine geringe CO<sub>2</sub>-Konzentration im Aufenthaltsbereich.

Zugerscheinungen im Aufenthaltsbereich treten ebenfalls nicht auf, da die warme Luft direkt an der Scheibe zur Decke strömt. Im Falle nicht arbeitender Konvektoren gibt es im Bereich der Fensterfronten leichte Zugerscheinungen.

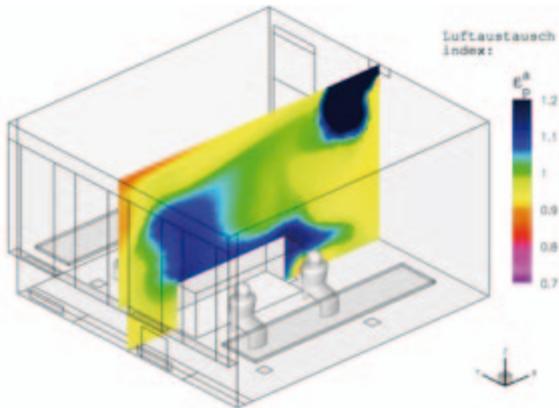


Abbildung 4.9.05: Luftaustauschindex – Vertikal-schnitt um 9 Uhr

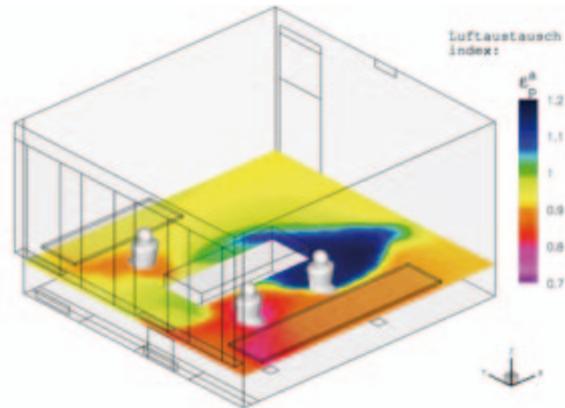


Abbildung 4.9.06: Luftaustauschindex bei z = 0,6 m um 9 Uhr

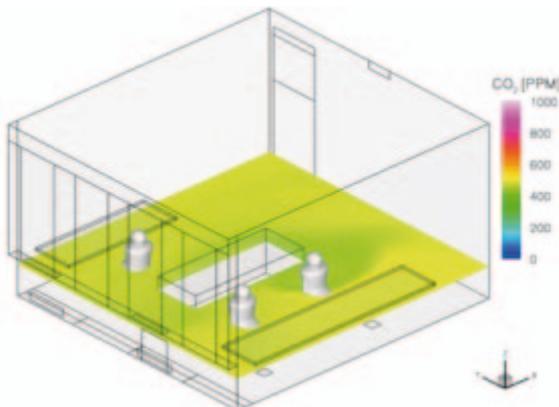


Abbildung 4.9.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm - z = 0,6 m um 9 Uhr

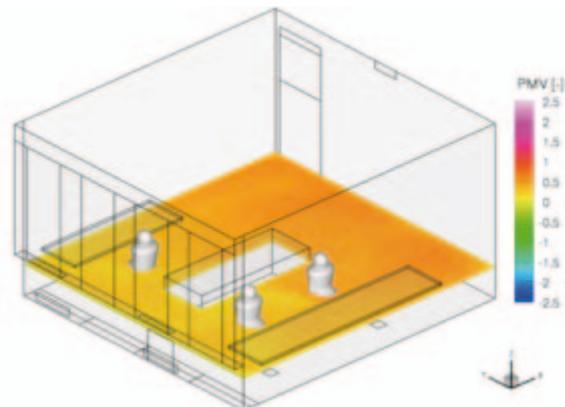


Abbildung 4.9.08: PMV-Index bei z = 0,6 m um 9 Uhr

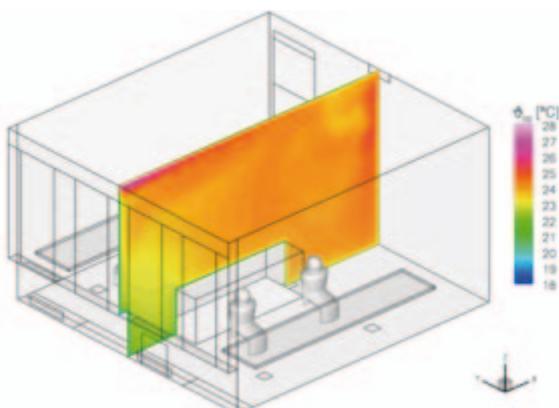


Abbildung 4.9.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt um 9 Uhr

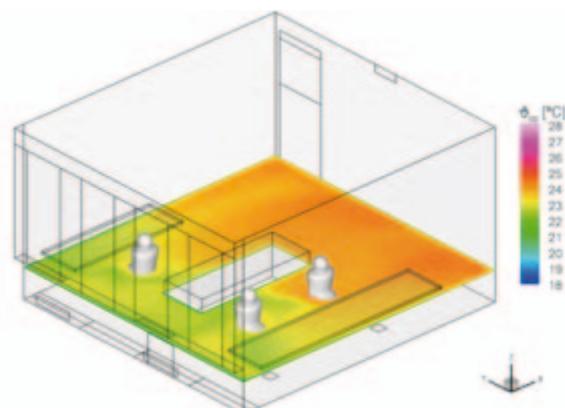


Abbildung 4.9.10: Operative Temperatur bei z = 0,6 m um 9 Uhr

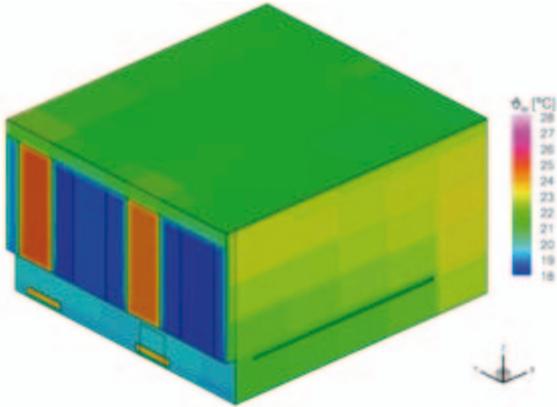


Abbildung 4.9.11: Wandtemperaturen mit Decke um 9 Uhr

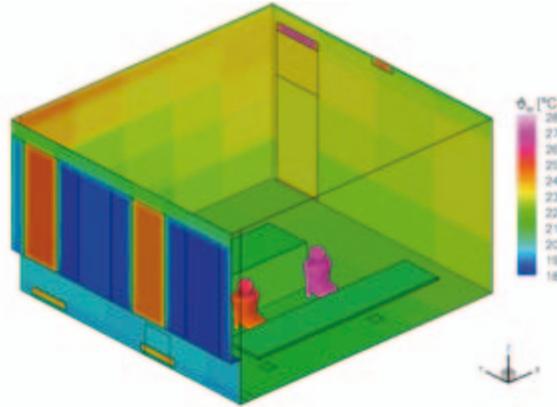


Abbildung 4.9.12: Wandtemperaturen mit Boden um 9 Uhr

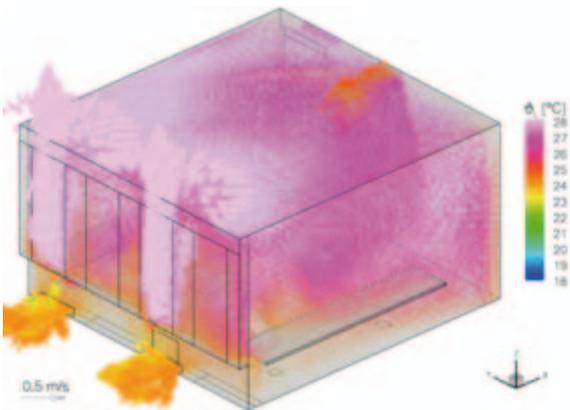


Abbildung 4.9.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt um 9 Uhr

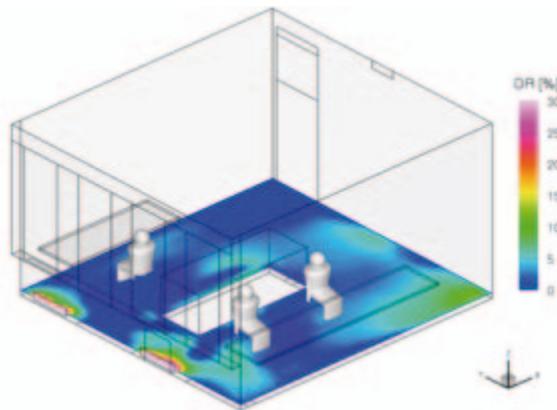


Abbildung 4.9.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m) um 9 Uhr

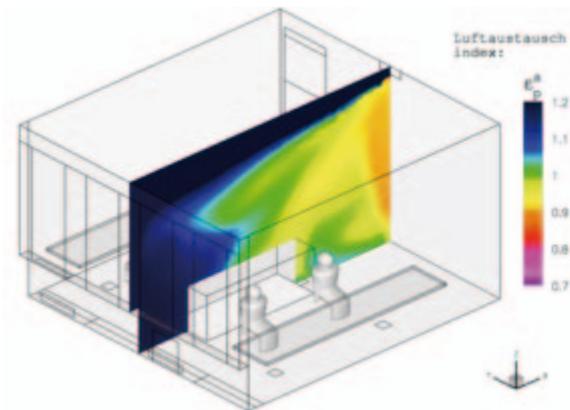


Abbildung 4.9.15: Luftaustauschindex – Vertikal-schnitt um 16 Uhr

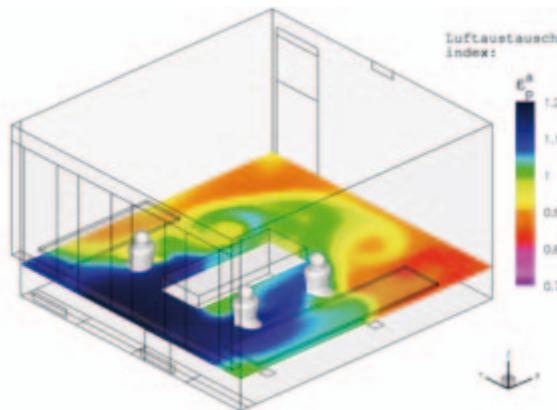


Abbildung 4.9.16: Luftaustauschindex bei  $z = 0,6$  m um 16 Uhr

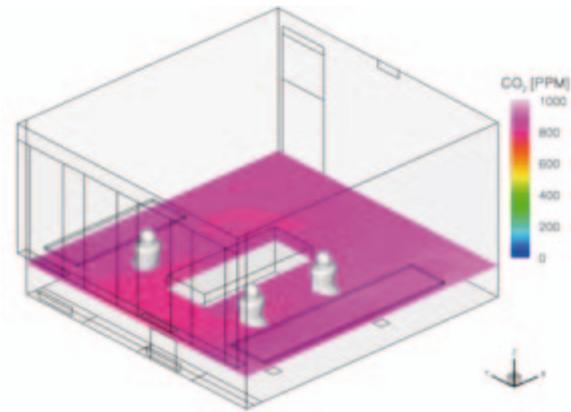


Abbildung 4.9.17: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm – z = 0,6 m um 16 Uhr

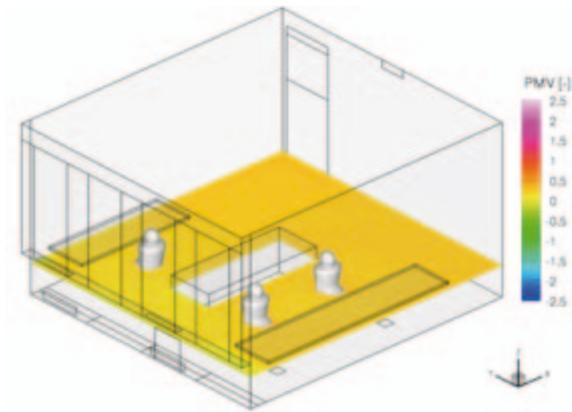


Abbildung 4.9.18: PMV-Index bei z = 0,6 m um 16 Uhr

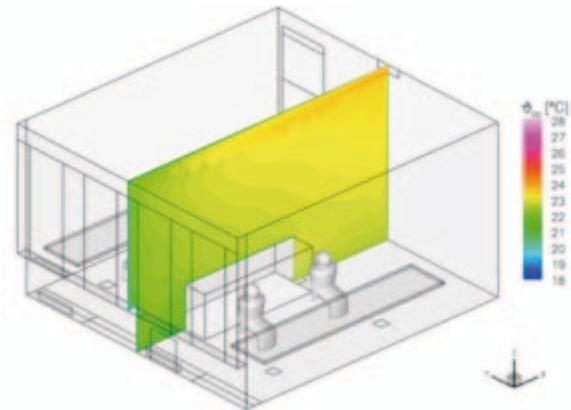


Abbildung 4.9.19: Operative Temperatur Vertikalschnitt um 16 Uhr

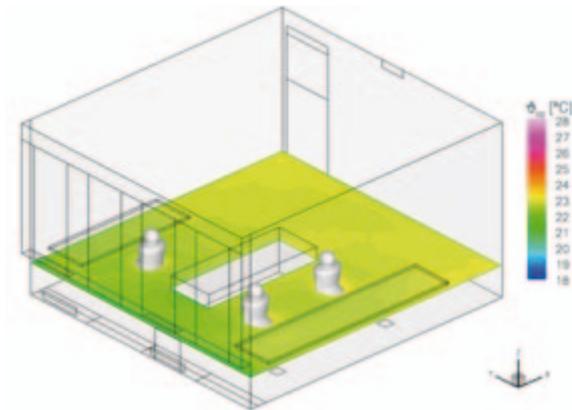


Abbildung 4.9.20: Operative Temperatur bei z = 0,6 m um 16 Uhr

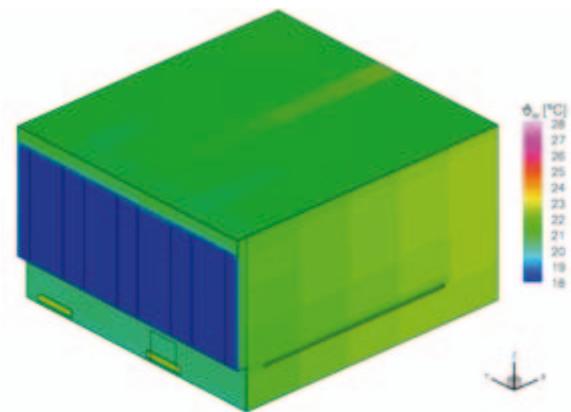


Abbildung 4.9.21: Wandtemperaturen mit Decke um 16 Uhr

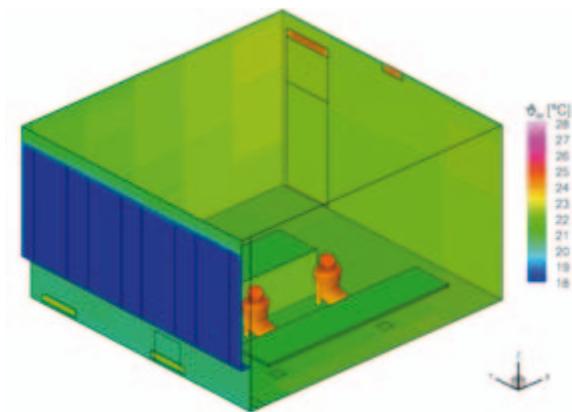


Abbildung 4.9.22: Wandtemperaturen mit Boden um 16 Uhr

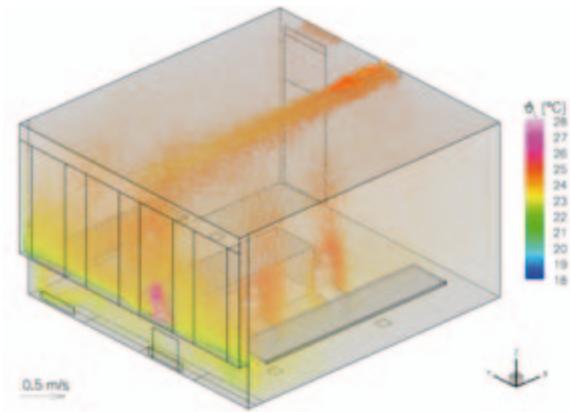


Abbildung 4.9.23: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt um 16 Uhr

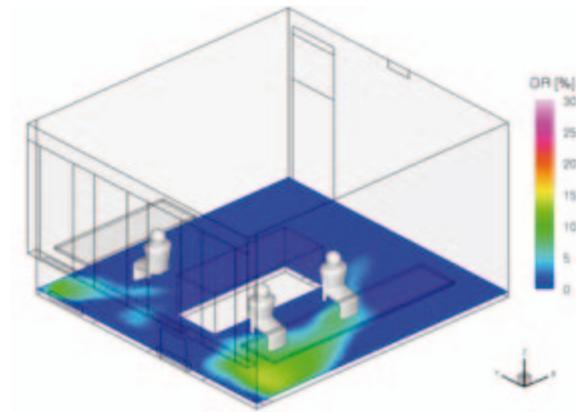


Abbildung 4.9.24: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m) um 16 Uhr

### 4.9.3. Fazit

Unter winterlichen Verhältnissen erreicht man mit der hier gewählten Anlagenkonfiguration sehr gute Resultate in Bezug auf den Luftaustausch und die thermische Behaglichkeit. Zudem ist die Anlage aufgrund ihrer hohen Dynamik sehr effektiv und sparsam, da ein Überheizen des Raumes komplett vermieden werden kann.

## 4.10. Variante L1A Sommer – Ventilatorconvektoren mit Primärluftanteil

### 4.10.1. Randbedingungen der Simulation

- Abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau

Ventilatorconvektor:

- 2 Geräte, unterhalb der Brüstung, Betrieb mit Primärluftanteil-realisiert über Gitter in Fassade und Fensterbrett. Untere Gitter, HxB = 0.15 m x 0.8 m, obere Gitter: HxB = 0.1 m x 0.8 m, bei y = 1.6 m und 4.2 m
- Faktor Primärluftanteil: Grundluftwechsel von 105 m<sup>3</sup>/h wird gewährleistet, somit ergibt sich in der ersten Stufe der Geräte ein Primärluftanteil von 21%
- Kühlleistung max. 2 x 2.42 kW, Volumenstromregelung, Untertemperatur der Zuluft: 15 K, minimal jedoch 14 °C
- Ausblasgeschwindigkeit 1.3 bis max. 2 m/s nach oben, Ansaugung max. 1.2 m/s nach unten/vorn (Zuluftvolumenstrom max. 2 x 484 m<sup>3</sup>/h, in höchster Stufe)

Regelung:

- Regelung mittels Zweipunktregler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt. Anlage läuft auf erster Stufe, Volumenstrom: 2 x 252 m<sup>3</sup>/h, Regelung dieser Stufe mittels Zweipunktregler: Einschaltpunkt 26 °C, Ausschaltpunkt 24 °C
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ °C}$

Lüftung:

- 105 m<sup>3</sup>/h Volumenstrom als Primärluftanteil im Lüftungsgerät
- Gerät läuft, wenn Kühlung nicht erforderlich, isotherm permanent mit diesem Grundluftwechsel

### 4.10.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Anhand der Diagramme 4.10.01 - 4.10.04 ist klar erkennbar, dass die installierten Ventilatorconvektoren in der niedrigsten Leistungsstufe betrieben werden können, um die geforderte Solltemperatur von 26 °C am Sensorpunkt einzuhalten. Die hohen Eintrittsvolumenströme und die niedrige Eintrittstemperatur sorgen für ein rasches Erreichen des gewünschten Temperaturwertes. Durch die Nutzung des Zweipunktreglers

kommt es hier zu einem Takten der Anlage. Zudem ist erkennbar, dass sich die in Variante 4.8 (Lüftungsgitter und Ventilator-konvektoren im Umluftbetrieb) sichtbare Entkopplung von unterem und oberem Raumbereich hier nicht so deutlich ausbildet. Da die Primärluft direkt durch die Ventilator-konvektoren im unteren Raumbereich eingebracht und die Abluft im oberen Raumbereich abgesaugt wird, kommt es zu einer stärkeren Durchmischung des Raumes und dementsprechend auch zu einer deutlicheren Schwankung in der Ablufttemperatur. Durch den in Variante 4.8 auftretenden Kurzschlusseffekt war diese Schwankung kaum feststellbar.

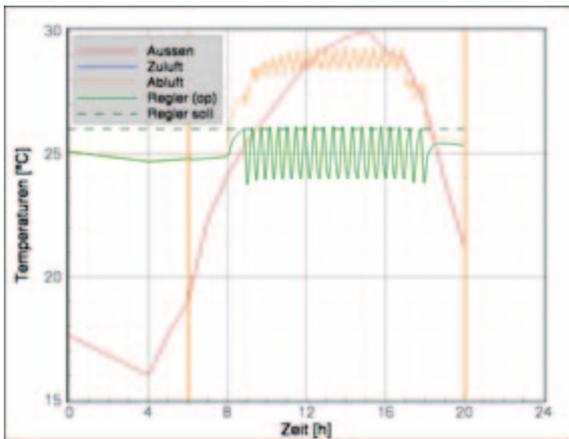


Abbildung 4.10.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

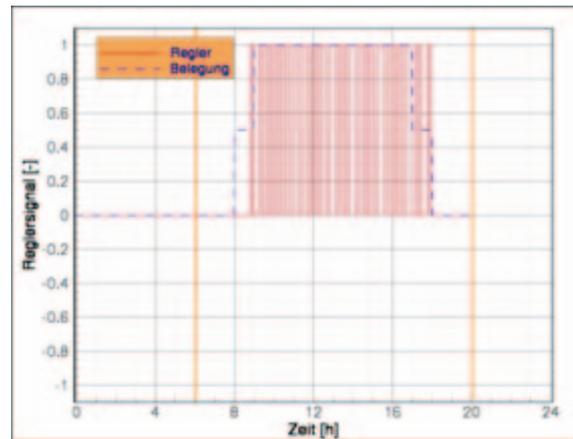


Abbildung 4.10.02: Reglersignal und Belegung

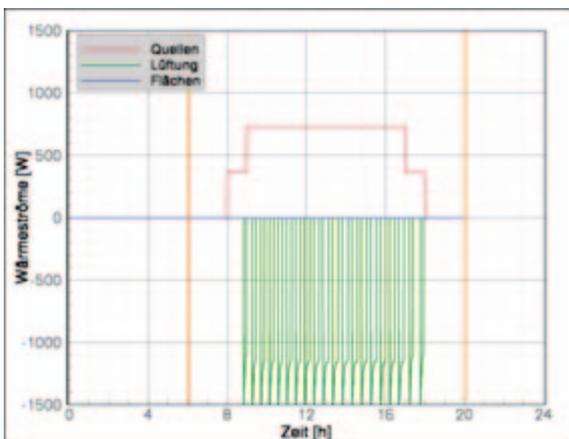


Abbildung 4.10.03: Wärmeströme – Input

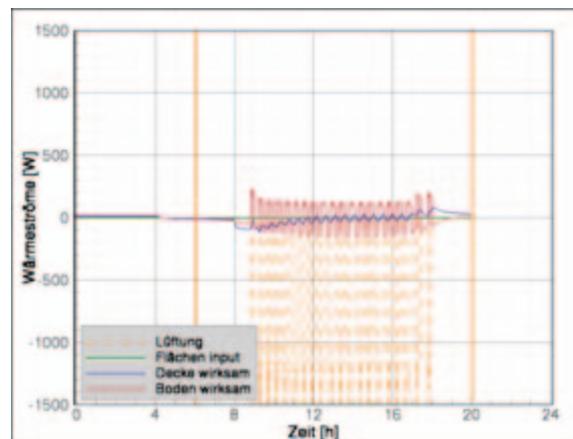


Abbildung 4.10.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Um den Anlagenbetrieb hier deutlich darstellen zu können, wurden nochmals zwei unterschiedliche Zeitpunkte gewählt. Ein Zeitpunkt, an dem die Konvektoren nicht in Betrieb sind, in diesem Falle 10 Uhr und ein zweiter Zeitpunkt 16 Uhr, an dem die Konvektoren betrieben werden müssen.

Anhand der folgenden Abbildungen ist gut erkennbar, dass die hier gewählte Anlagenkonfiguration zwar in der Lage ist, die geforderte Solltemperatur schnell zu erreichen und eine ausgezeichnete Frischluftversorgung zu garantieren, dafür jedoch deutliche Abstriche in Bezug auf die thermische Behaglichkeit zur Folge hat. Letzteres ist auch nachvollziehbar, da die Ventilator-konvektoren bezüglich der

sich einstellenden Temperaturen und Luftvolumenströme ein mit Variante 4.8 vergleichbares Betriebsregime aufweisen.

Aufgrund der deutlich kühleren Zuluft kommt es im Kühlbetrieb zur Ausbildung eines Kaltluftsees. Durch die Einbringung und Durchmischung der Zuluft mit Hilfe der Konvektoren ergibt sich zudem ein sehr gleichmäßiges und geringes Luftalter im Aufenthaltsbereich.

In Zeitabschnitten, in denen die Konvektoren ausschließlich den Grundluftwechsel absichern, gibt es keine weiteren Einschränkungen bezüglich Zugbelastung und thermischer Behaglichkeit. Ist die Anlage jedoch im Kühlbetrieb, muss davon ausgegangen werden, dass der Raum im Bodenbereich zu kühl wird und dass es zu starken Zugerscheinungen im Knöchelbereich kommt.

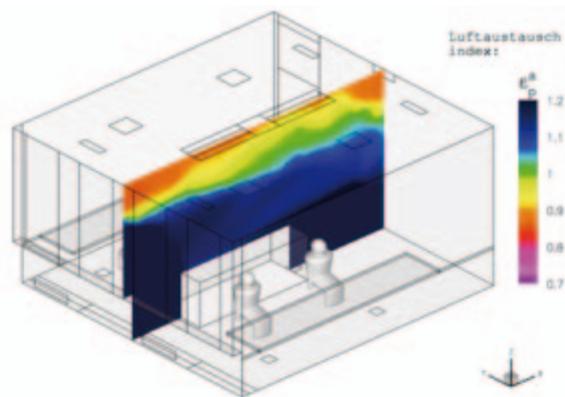


Abbildung 4.10.05: Luftaustauschindex – Vertikalschnitt um 10 Uhr

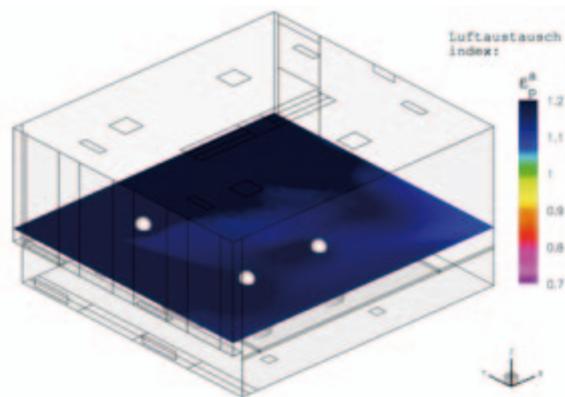


Abbildung 4.10.06: Luftaustauschindex bei  $z = 0,6$  m um 10 Uhr

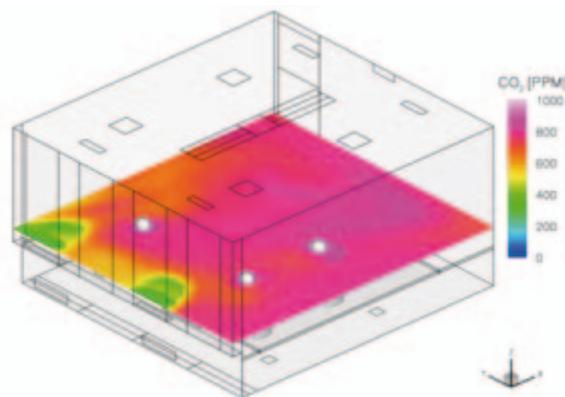


Abbildung 4.10.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm -  $z = 0,6$  m um 10 Uhr

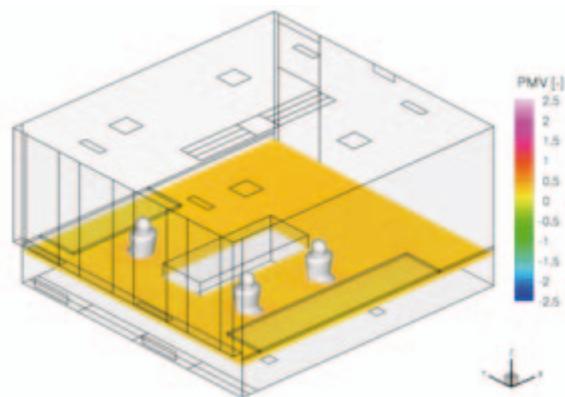


Abbildung 4.10.08: PMV-Index bei  $z = 0,6$  m um 10 Uhr

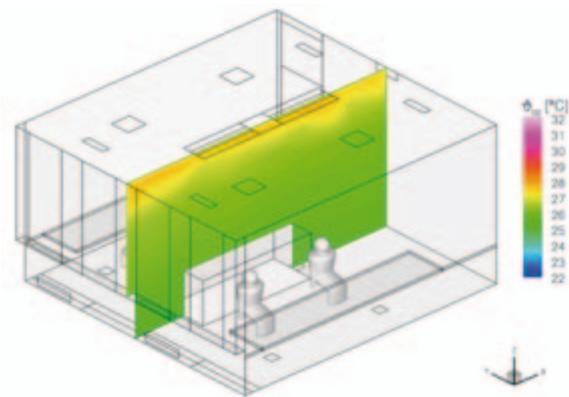


Abbildung 4.10.09: Operative Temperatur  
Vertikalschnitt um 10 Uhr

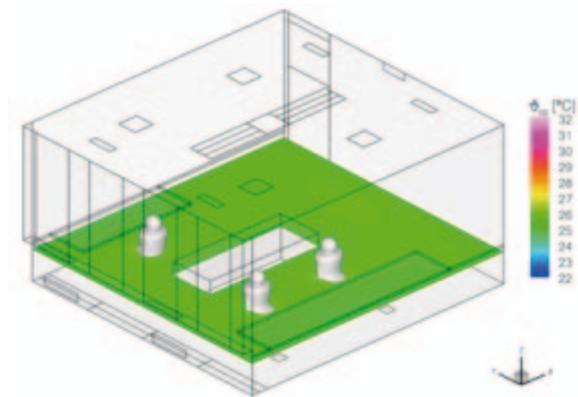


Abbildung 4.10.10: Operative Temperatur bei  
 $z = 0,6 \text{ m}$  um 10 Uhr

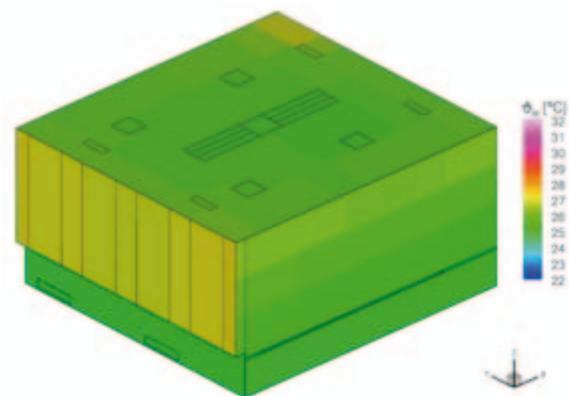


Abbildung 4.10.11: Wandtemperaturen mit Decke  
um 10 Uhr

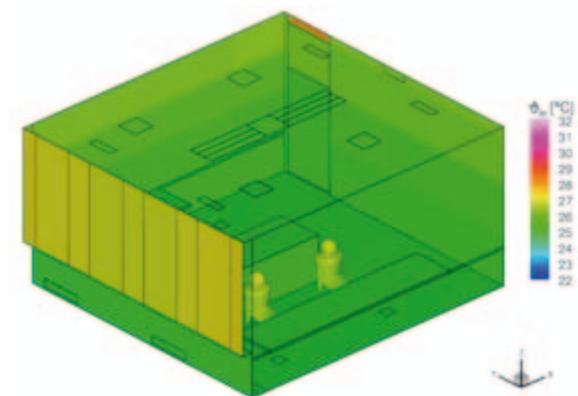


Abbildung 4.10.12: Wandtemperaturen mit Boden  
um 10 Uhr

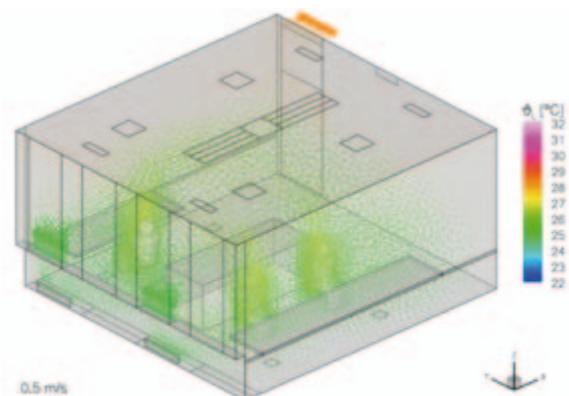


Abbildung 4.10.13: Strömungsfeld in Temperatur  
gefärbt um 10 Uhr

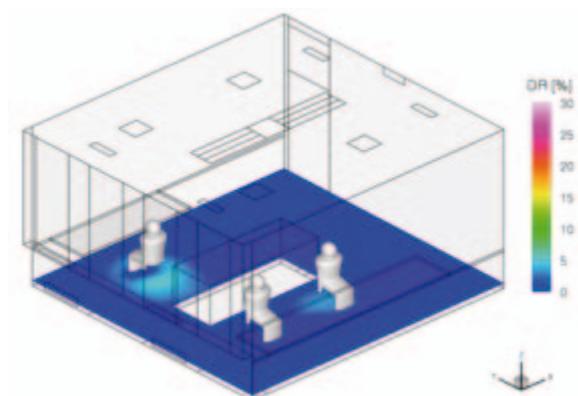


Abbildung 4.10.14: Zugluftisiko im Bodenbereich  
(0,1 m) um 10 Uhr

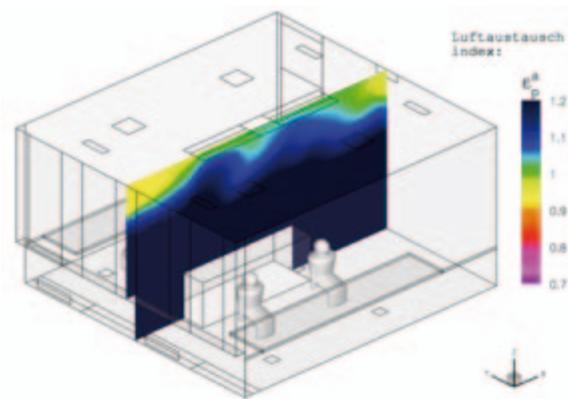


Abbildung 4.10.15: Luftaustauschindex – Vertikalschnitt um 16 Uhr

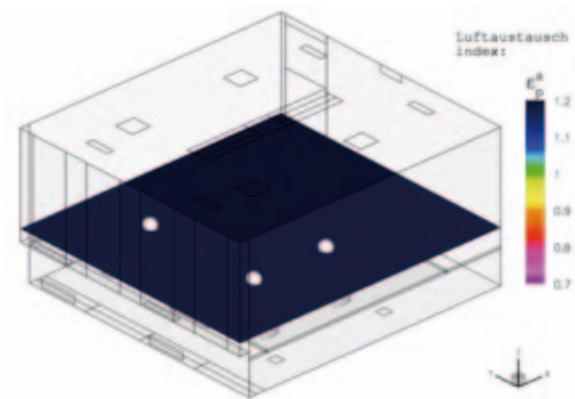


Abbildung 4.10.16: Luftaustauschindex bei  $z = 0,6$  m um 16 Uhr

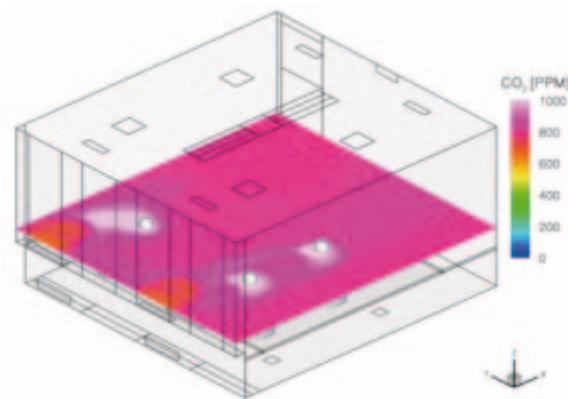


Abbildung 4.10.17: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm -  $z = 0,6$  m um 16 Uhr

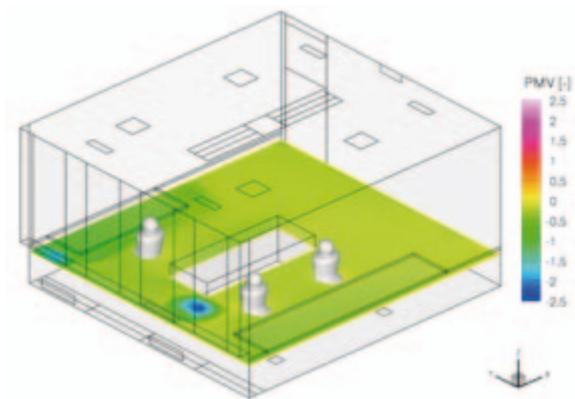


Abbildung 4.10.18: PMV-Index bei  $z = 0,6$  m um 16 Uhr

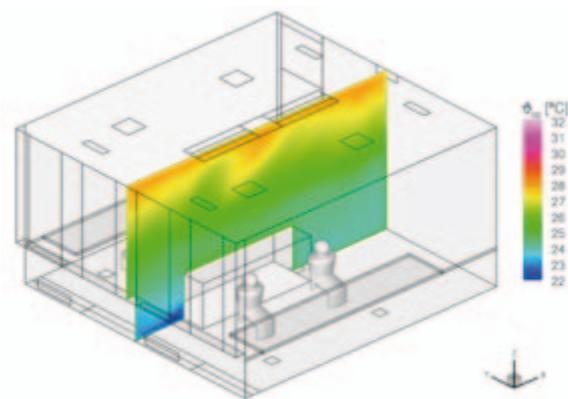


Abbildung 4.10.19: Operative Temperatur Vertikalschnitt um 16 Uhr

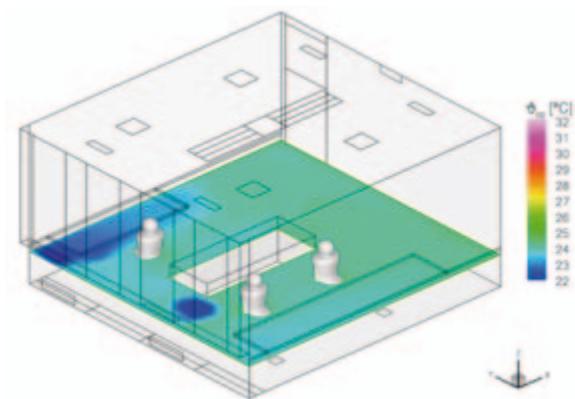


Abbildung 4.10.20: Operative Temperatur bei  $z = 0,6$  m um 16 Uhr

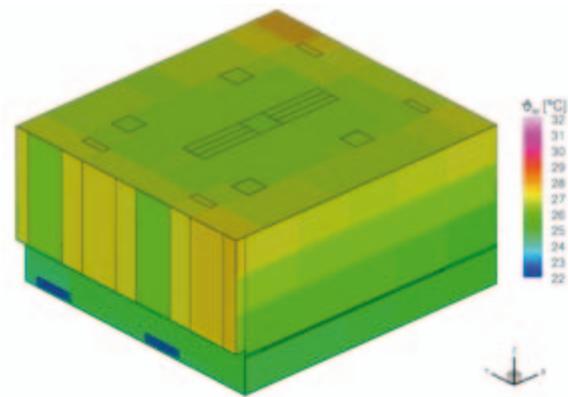


Abbildung 4.10.21: Wandtemperaturen mit Decke um 16 Uhr

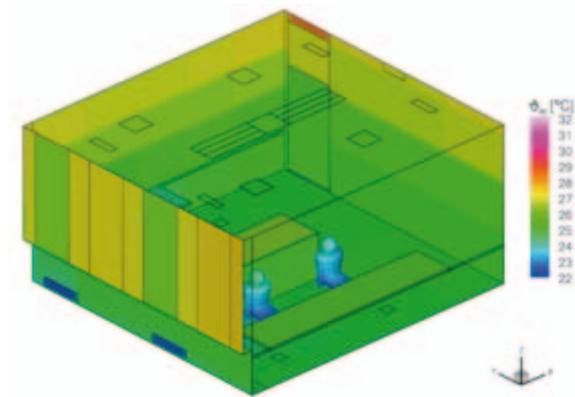


Abbildung 4.10.22: Wandtemperaturen mit Boden um 16 Uhr

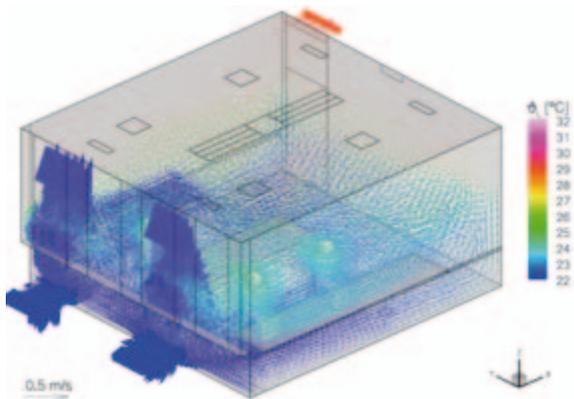


Abbildung 4.10.23: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt um 16 Uhr

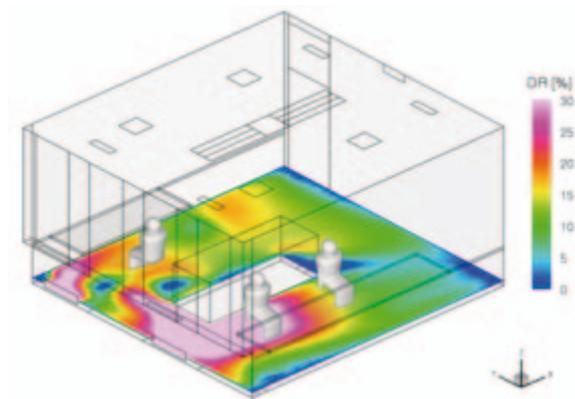


Abbildung 4.10.24: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m) um 16 Uhr

### 4.10.3. Fazit

Mit dieser Anlagenkonfiguration ist man unter sommerlichen Bedingungen sehr gut in der Lage, die geforderte Sollraumtemperatur zu erreichen. Verglichen zur Variante 4.8 (Ventilatorkonvektoren im Umluftbetrieb) kommt es zu einer sehr viel besseren Versorgung des Aufenthaltsraumes mit Frischluft, aufgrund der hohen Volumenströme und geringen Zulufttemperaturen im Kühlbetrieb muss allerdings mit deutlichen Einschränkungen bezüglich der thermischen Behaglichkeit gerechnet werden.

## 4.11. Variante L1A Winter – Ventilatorconvektoren mit Primärluftanteil

### 4.11.1. Randbedingungen der Simulation

- Abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau

Ventilatorconvektor:

- 2 Geräte, unterhalb der Brüstung, Betrieb mit Primärluftanteil, realisiert über Gitter in Fassade und Fensterbrett. Untere Gitter, HxB = 0.15 m x 0.8 m, obere Gitter: HxB = 0.1 m x 0.8 m, bei y = 1.6 m und 4.2 m
- Faktor Primärluftanteil: Grundluftwechsel von 105 m<sup>3</sup>/h wird gewährleistet, somit ergibt sich in der ersten Stufe der Geräte ein Primärluftanteil von 21 %
- Heizleistung max. 2 x 3.31 kW, Volumenstromregelung, Übertemperatur der Zuluft: 20 K
- Ausblasgeschwindigkeit 1.3 bis max. 2 m/s nach oben, Ansaugung max. 1.2 m/s nach unten/vorn (Zuluftvolumenstrom max. 2 x 484 m<sup>3</sup>/h, in höchster Stufe)

Regelung:

- Regelung mittels Zweipunktregler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt. Anlage läuft auf erster Stufe, Volumenstrom: 2 x 252 m<sup>3</sup>/h, Regelung dieser Stufe mittels Zweipunktregler: Einschaltpunkt 22 °C, Ausschaltpunkt 24 °C
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 22 \text{ °C}$

Lüftung:

- 105 m<sup>3</sup>/h Volumenstrom als Primärluftanteil im Lüftungsgerät
- Gerät läuft, wenn Heizung nicht erforderlich, isotherm permanent mit diesem Grundluftwechsel

### 4.11.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Anhand der Diagramme 4.11.01–4.11.04 erkennt man deutlich, dass die Ventilatorconvektoren unter winterlichen Verhältnissen problemlos in der Lage sind, die geforderte Sollraumtemperatur zu realisieren. Ein Betrieb der Convektoren ist lediglich in den Zeitbereichen außerhalb der Nutzung erforderlich. Im

Nutzungszeitraum reichen die inneren Quellen selbst aus, den Raum am Sensorpunkt auf 22 °C zu halten. Somit ist das Anlagenverhalten bezüglich der thermischen Behaglichkeit mit Variante 4.9 vergleichbar.

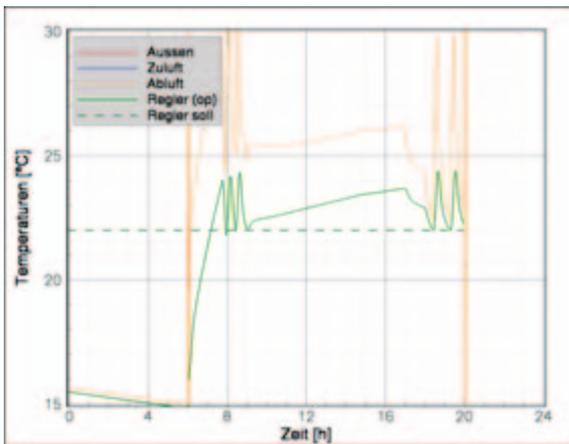


Abbildung 4.11.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

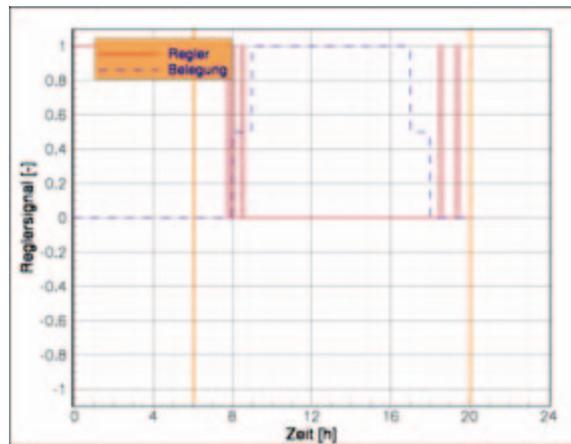


Abbildung 4.11.02: Reglersignal und Belegung

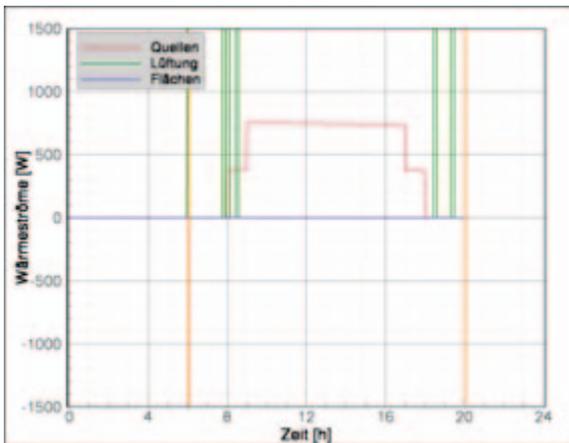


Abbildung 4.11.03: Wärmeströme - Input

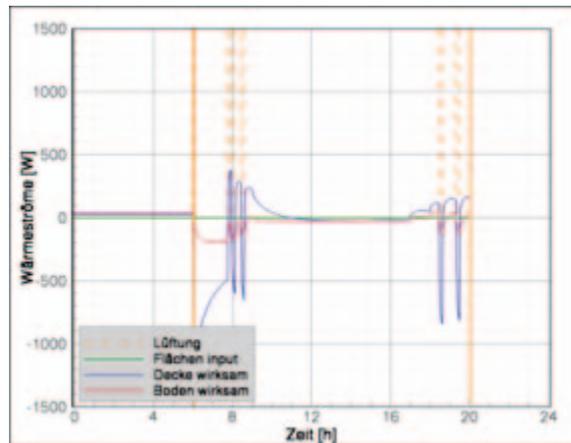


Abbildung 4.11.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.11.05-4.11.14 zeigen die Ergebnisse der Simulation um 10 Uhr, also zu einem Zeitpunkt, an dem die Konvektoren lediglich eine isotherme Sicherung des Grundluftwechsels von 105 m<sup>3</sup>/h übernehmen.

Da dies jedoch in der gesamten Nutzungszeit der Fall ist und da entsprechende Resultate für einen Heizungsbetrieb der Konvektoren bereits in Variante 4.9 dargestellt sind, genügen die hier vorliegenden Abbildungen für eine Anlagenbewertung.

Prinzipiell kommt es durch die hier modellierte impulsarme Einbringung der Zuluft (ähnlich einer Quelllüftung) in Verbindung mit der Fallströmung an den Fassaden zur Ausbildung eines Frischluftsees und zu einem effektiven Abtransport verbrauchter Luft. Bezüglich der thermischen Behaglichkeit sind ebenfalls keine Einschränkungen feststellbar, lediglich im Bereich der Fenster kommt es zu leichten Zugserscheinungen im Knöchelbereich.

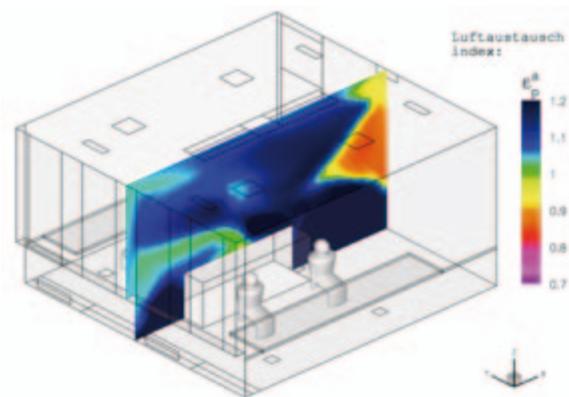


Abbildung 4.11.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

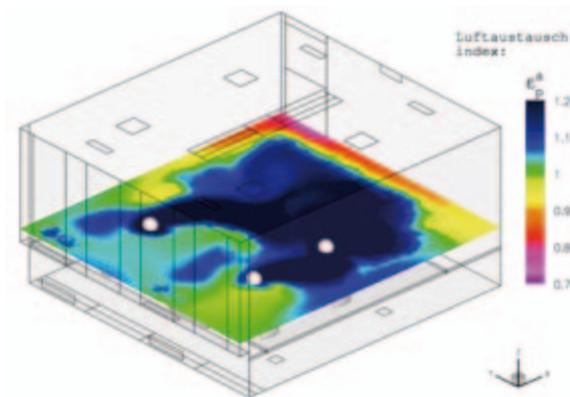


Abbildung 4.11.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1 \text{ m}$

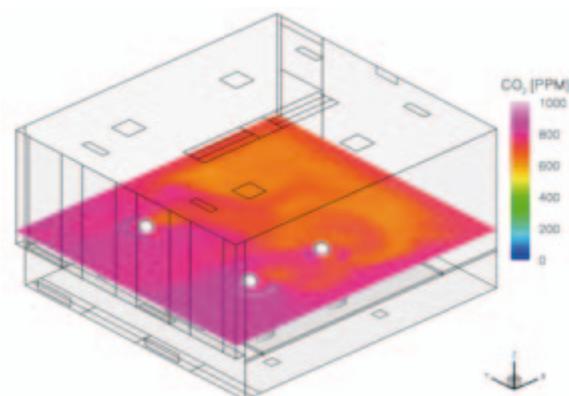


Abbildung 4.11.07:  $\text{CO}_2$ -Konzentration in ppm -  $z = 1,1 \text{ m}$

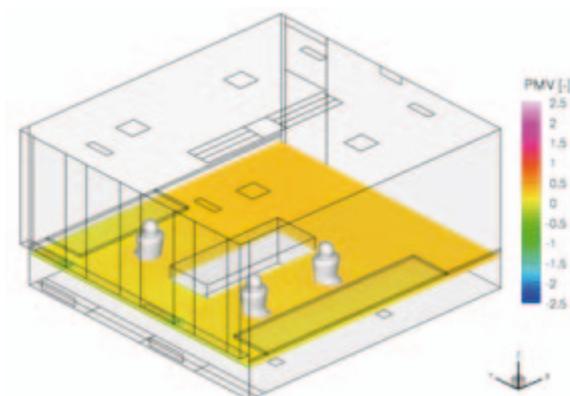


Abbildung 4.11.08: PMV-Index bei  $z = 0,6 \text{ m}$

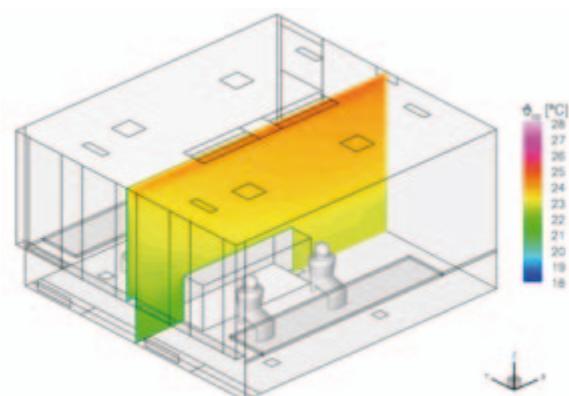


Abbildung 4.11.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

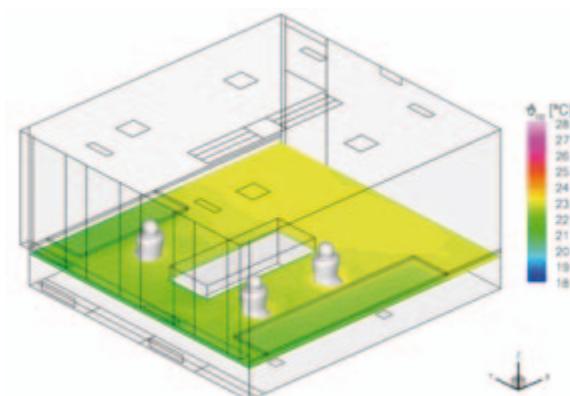


Abbildung 4.11.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6 \text{ m}$

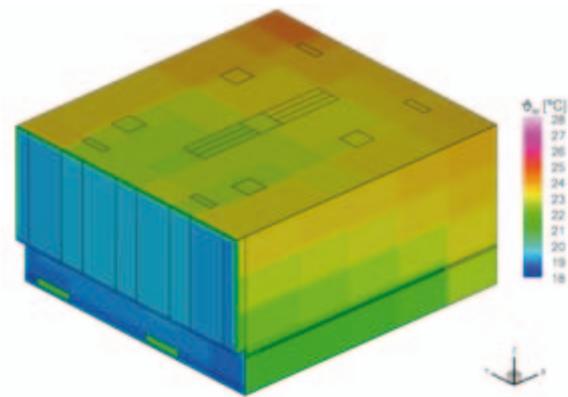


Abbildung 4.11.11: Wandtemperaturen mit Decke

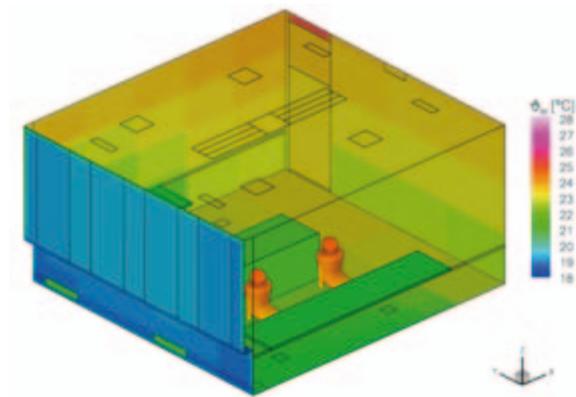


Abbildung 4.11.12: Wandtemperaturen mit Boden

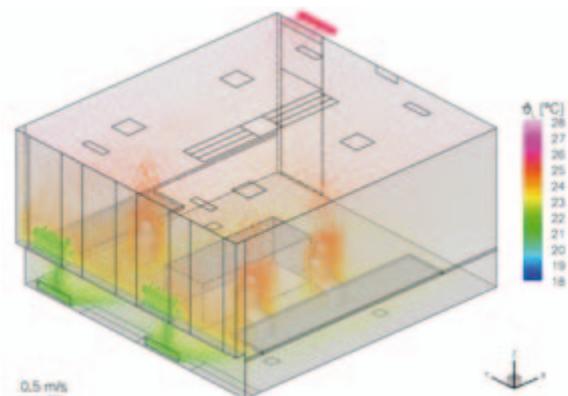


Abbildung 4.11.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

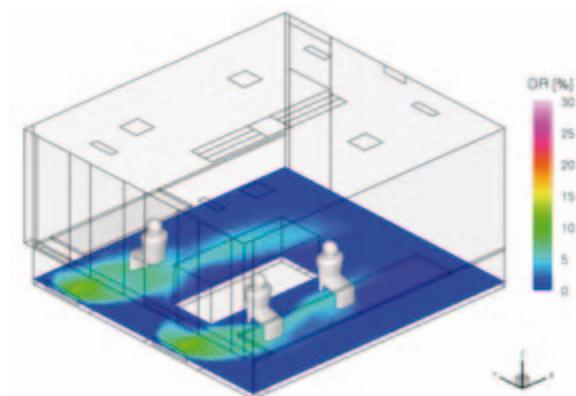


Abbildung 4.11.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.11.3. Fazit

Unter winterlichen Bedingungen und unter Voraussetzung der hier angenommenen inneren Lasten ist diese Anlage problemlos in der Lage, die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit sowie die Luftqualität zu erfüllen. Im Raum stellt sich ein gleichmäßiges Temperaturprofil ein, und Luftaustausch sowie Abtransport von CO<sub>2</sub> sind sehr effektiv.

## 4.12. Variante L1b Sommer – Ventilatorconvektoren Komfortbrüstungsgeräte

### 4.12.1. Randbedingungen der Simulation

- Abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.0 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau

Ventilatorconvektoren:

- 2 Komfortgeräte, unterhalb der Brüstung, Betrieb mit Umluft/Primärluft, Faktor 0.5
- Realisiert über Gitter in Fassade und Fensterbrett. Unteres Gitter, HxB = 0.45 m x 0.8 m, obere Gitter: HxB = 0.1 m x 0.8 m, bei y = 1.6 m und 4.2 m
- Kühlleistung max. 2 x 0.34 kW, in höchster Leistungsstufe Volumenstromregelung, Untertemperatur der Zuluft: 10 K, minimal jedoch 16 °C
- Faktor Primärluftanteil: Grundluftwechsel von 105 m<sup>3</sup>/h wird gewährleistet, somit ergibt sich in der realisierten Leistungsstufe der Geräte ein Primärluftanteil von 50 %
- Ausblasen im Kühlfall nach vorn, entsprechend Quellluftprinzip, Ansaugung oben.

Regelung:

- Regelung mittels Zweipunktregler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt. Anlage läuft auf maximaler Stufe, Volumenstrom: 2 x 100 m<sup>3</sup>/h, Regelung dieser Stufe mittels Zweipunktregler: Einschaltpunkt 26 °C, Ausschaltpunkt 24 °C
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ °C}$

Lüftung:

- 105 m<sup>3</sup>/h Volumenstrom als Primärluftanteil im Lüftungsgerät
- Gerät läuft, wenn Kühlung nicht erforderlich, isotherm permanent mit diesem Grundluftwechsel

### 4.12.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Aufgrund der gewählten Schaltpunkte und des geringeren Volumenstroms dieser Komfortbrüstungsgeräte ist die Kühlung des Raumes fast während der gesamten Nutzungszeit in Betrieb. Da die maximale Abkühlung des Raumes bei etwa 25 °C liegt, wäre eine Anpassung des Abschaltzeitpunktes denkbar.

Darüber hinaus ist die Anlage jedoch in der Lage, die geforderte Solltemperatur von 26 °C am Sensorpunkt zu sichern.

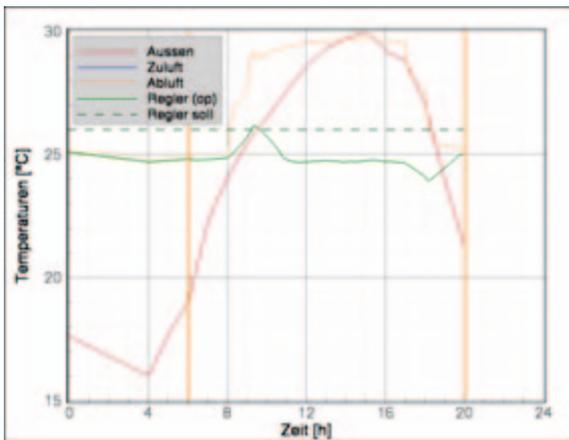


Abbildung 4.12.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

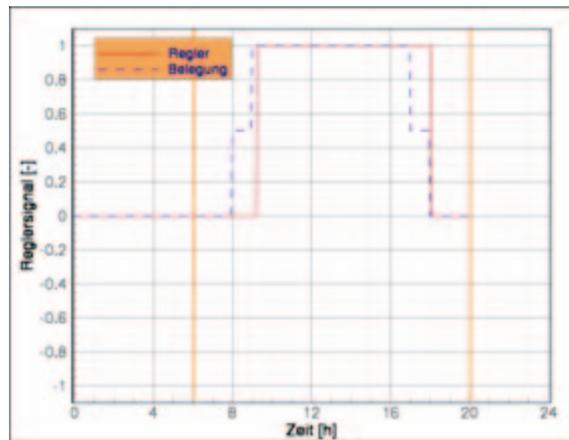


Abbildung 4.12.02: Reglersignal und Belegung

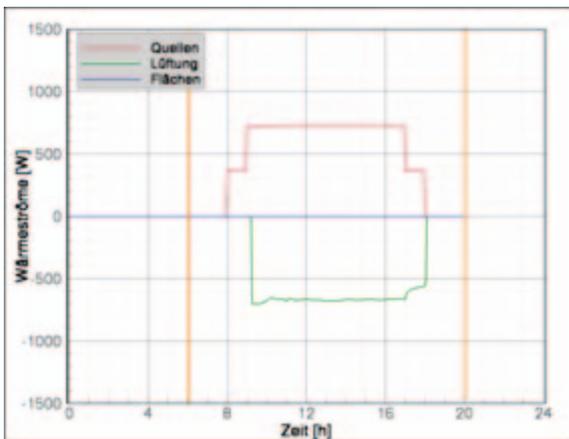


Abbildung 4.12.03: Wärmeströme - Input

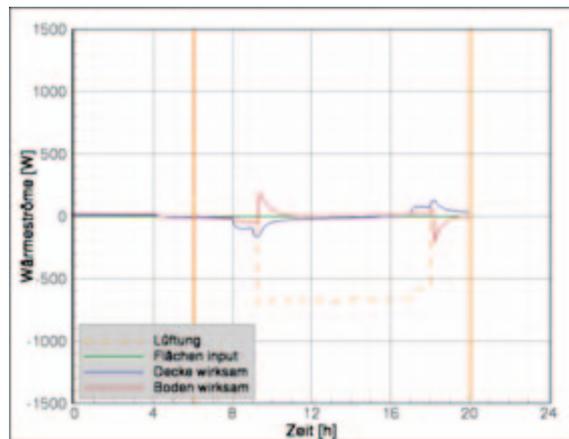


Abbildung 4.12.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.12.05-4.12.14 zeigen auszugswise die Resultate der Simulation um 16 Uhr. Anhand der dargestellten Größen ist klar erkennbar, dass diese Variante aufgrund ihrer sehr stark an die Quelllüftung angelehnten Funktionsweise zu einer außerordentlich guten Effektivität des Luftaustauschs im Aufenthaltsbereich führt.

Aufgrund der dennoch relativ hohen Eintrittsgeschwindigkeiten kommt es jedoch zu Zugserscheinungen im Knöchelbereich. In diesem Falle wäre ein Takten der Anlage, wie vorab angedeutet, sehr sinnvoll, da erfahrungsgemäß kurzzeitige Belastungen besser als permanente akzeptiert werden,.

Weitere Einschränkungen bezüglich der thermischen Behaglichkeit sind nicht zu erwarten.

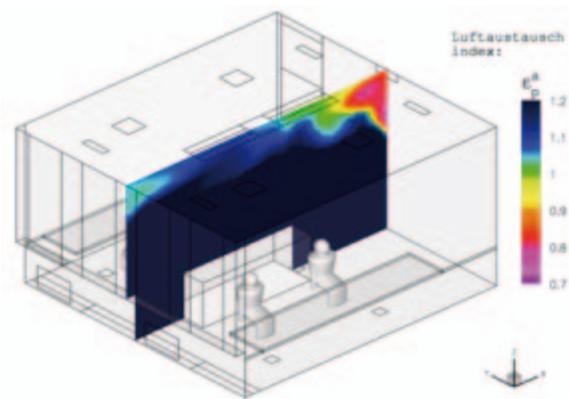


Abbildung 4.12.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

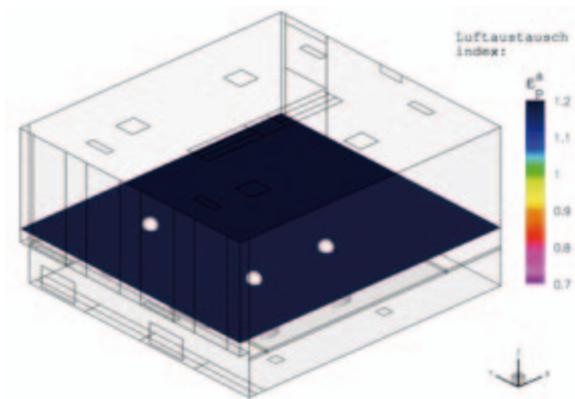


Abbildung 4.12.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1$  m

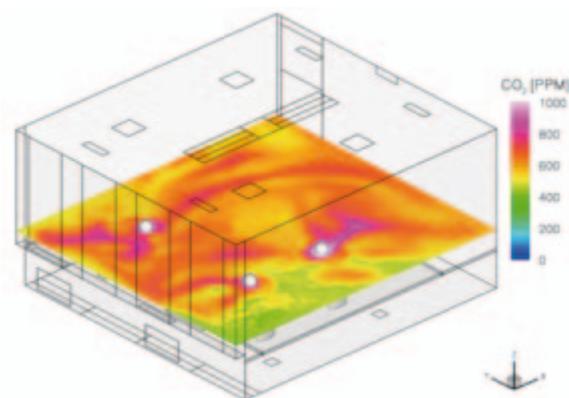


Abbildung 4.12.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm -  $z = 1,1$  m

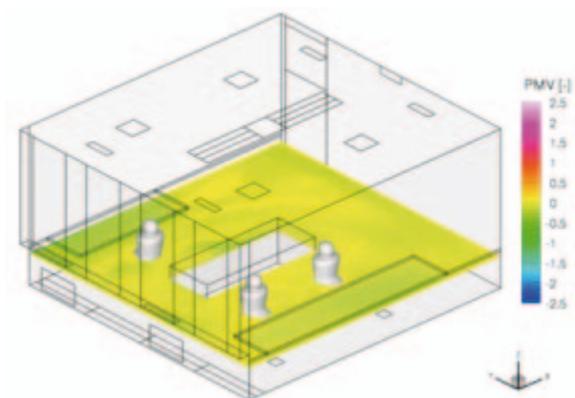


Abbildung 4.12.08: PMV-Index bei  $z = 0,6$  m

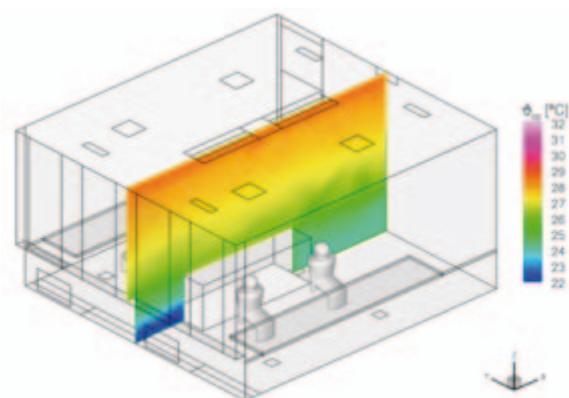


Abbildung 4.12.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

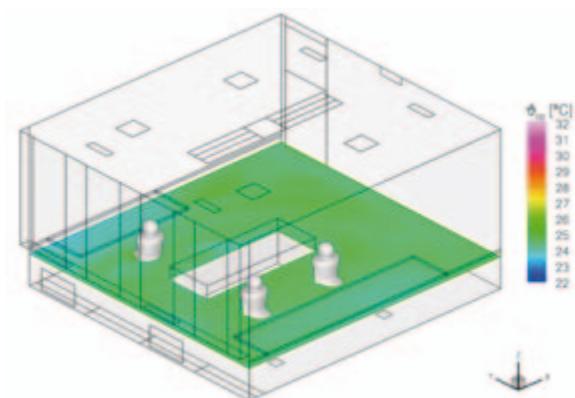


Abbildung 4.12.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6$  m

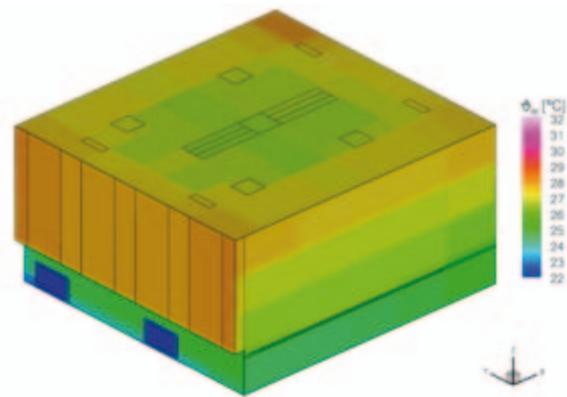


Abbildung 4.12.11: Wandtemperaturen mit Decke

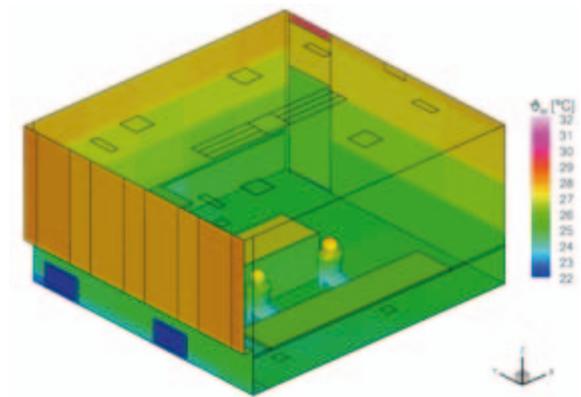


Abbildung 4.12.12: Wandtemperaturen mit Boden

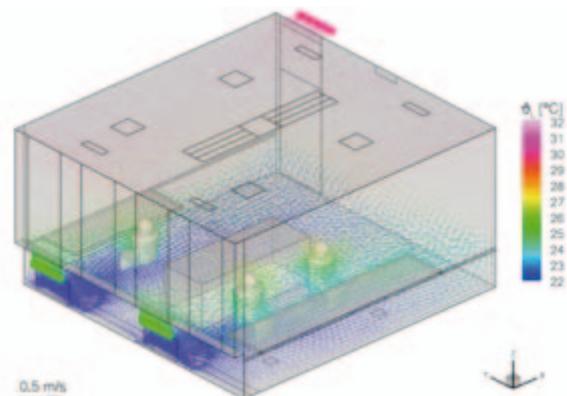


Abbildung 4.12.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

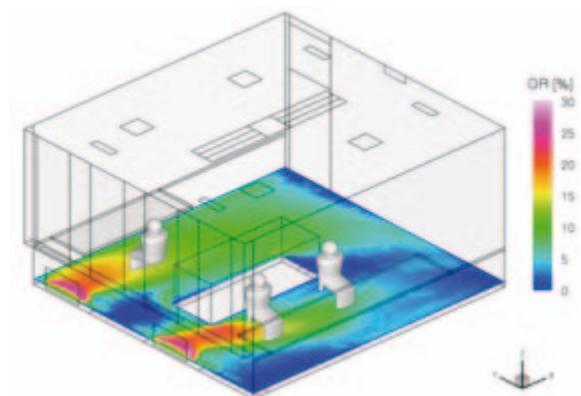


Abbildung 4.12.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.12.3. Fazit

Die Nutzung von Ventilator-konvektoren in der Ausführung „Komfortbrüstungsgerät“ mit Primärluftanteil ist eine sehr gute Möglichkeit, auch unter sommerlichen Verhältnissen ein gutes Raumklima und einen effektiven Luftaustausch bei vergleichsweise geringen Zugbelastungen zu sichern.

## 4.13. Variante PL5 F2A Sommer – Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung

### 4.13.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau, thermoaktive Schicht in Fußboden und Decke (in der 28 cm Stahlbetonschicht)
- Kühlleistung: maximal  $40 \text{ W/m}^2$
- Belegungsdichte 95 %, über Faktor realisiert

Regelung/Betonkernaktivierung:

- Regelung mittels PI-Regler nach mittlerer Oberflächentemperatur der Decke

Solltemperatur an der Decke:  $\vartheta_w = 23 \text{ °C}$

Lüftung:

- 5 Drallauslässe entsprechend Vorgabe IBO im Bodenbereich, Durchmesser 150 mm Positionen entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von  $105 \text{ m}^3/\text{h}$ , gleichmäßig auf die Auslässe aufgeteilt
- Zulufttemperatur 4 K unterhalb der Sensortemperatur, gleitend

Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.13.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Aufgrund der hohen Wärmedämmung des Gebäudes und aufgrund der permanenten Versorgung des Raumes mit Frischluft sowie der guten Vorkonditionierung durch die Betonkernaktivierung kommt es hier nicht zu einem Überschreiten der Solltemperatur im Raumsensorpunkt, siehe Abb. 4.13.01 bis 4.13.03. Am Sensorpunkt der Regelung in der Decke gibt es zwar eine Solltemperaturüberschreitung, die operative Temperatur zwischen den Personen in einer Höhe von 0,6 m bleibt jedoch stets unterhalb der geforderten  $26 \text{ °C}$ . Die Deckenkühlung setzt erst gegen 11 Uhr wieder ein und bleibt dann bis 20 Uhr aktiv.

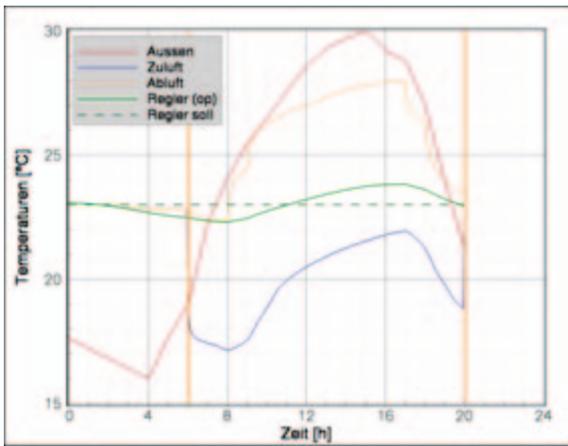


Abbildung 4.13.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

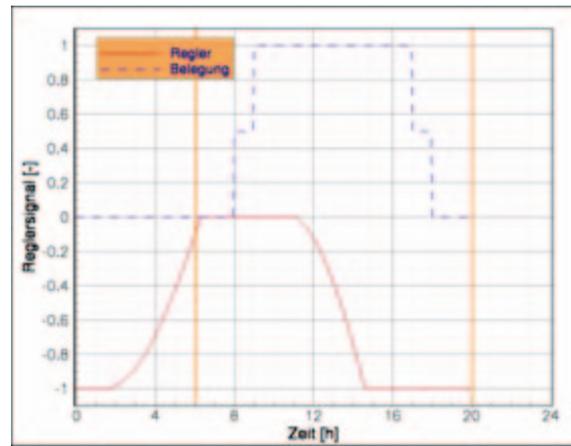


Abbildung 4.13.02: Reglersignal und Belegung

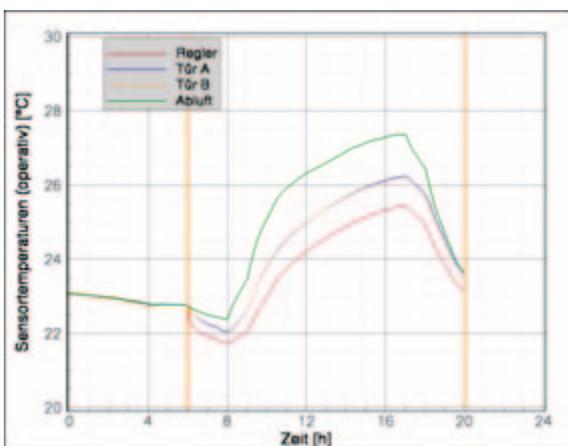


Abbildung 4.13.03: Sensortemperaturen

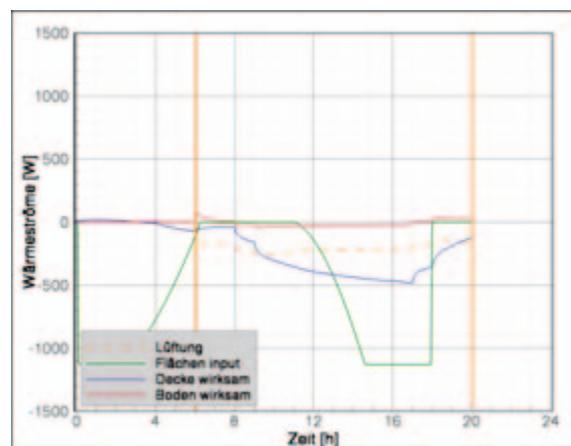


Abbildung 4.13.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Für die Beurteilung der Variante wurden hier stellvertretend die Resultate der Simulation um 16 Uhr, also zu einem Zeitpunkt hoher energetischer Belastung des Raumes herangezogen.

Die Abbildungen 4.13.05-4.13.14 zeigen insgesamt ein der modellierten Anlagentechnik entsprechendes und sehr ausgewogenes Raumklima. Die 5 Drallluftauslässe, verbunden mit der Luftabsaugung oberhalb der Tür generieren einen Frischluftsee, der dem beim Quellluftauslass ähnelt und somit eine hervorragende Versorgung des Aufenthaltsbereichs mit Frischluft garantiert. Dies zeigt sich sowohl in den hohen Werten des lokalen Luftaustauschindex als auch in niedrigen Werten der CO<sub>2</sub>-Verteilung im unteren Raumbereich.

Die operativen Temperaturen liegen dank der Regelung der Betonkernaktivierung im gesamten Aufenthaltsbereich deutlich unter den anvisierten 26 °C. Hierbei wird die höhere Lufttemperatur im Deckenbereich durch eine deutlich niedrigere Strahlungstemperatur (kühle Decke) ausgeglichen. Im Aufenthaltsbereich treten lediglich in der Nähe der Drallluftauslässe geringe Zugbelastungen auf, im Raum insgesamt stellt sich ein ruhiges und aus Sicht der thermischen Behaglichkeit sehr gut akzeptables Strömungsfeld ein.

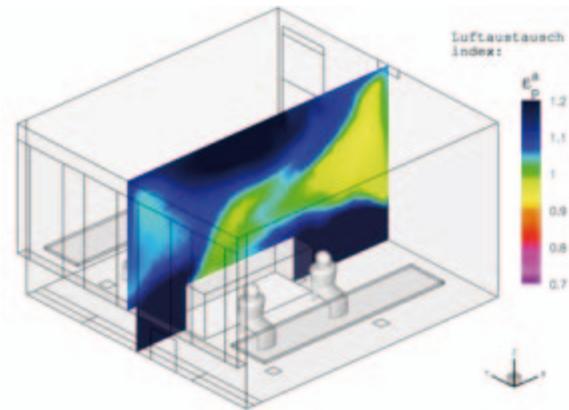


Abbildung 4.13.05: Luftaustauschindex – Vertikal-schnitt

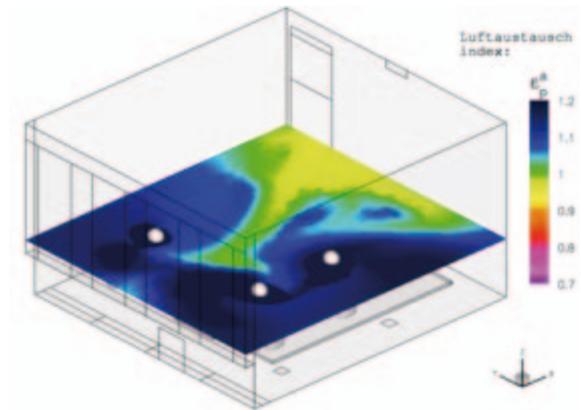


Abbildung 4.13.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1 \text{ m}$

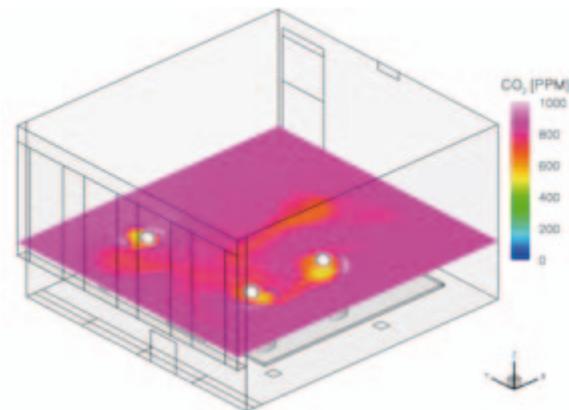


Abbildung 4.13.07:  $\text{CO}_2$ -Konzentration in ppm –  $z = 1,1 \text{ m}$

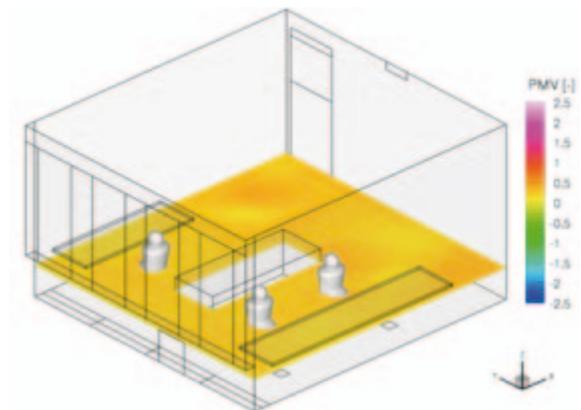


Abbildung 4.13.08: PMV-Index bei  $z = 0,6 \text{ m}$

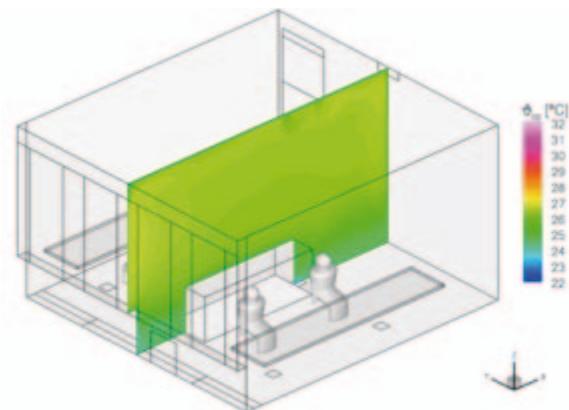


Abbildung 4.13.09: Operative Temperatur Vertikal-schnitt

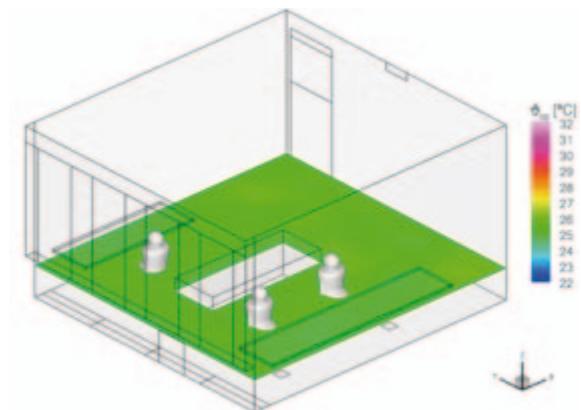


Abbildung 4.13.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6 \text{ m}$

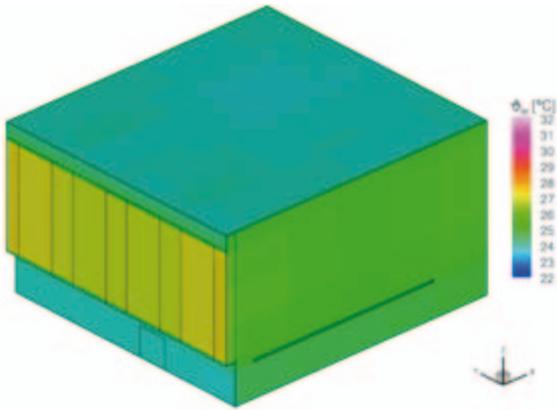


Abbildung 4.13.11: Wandtemperaturen mit Decke

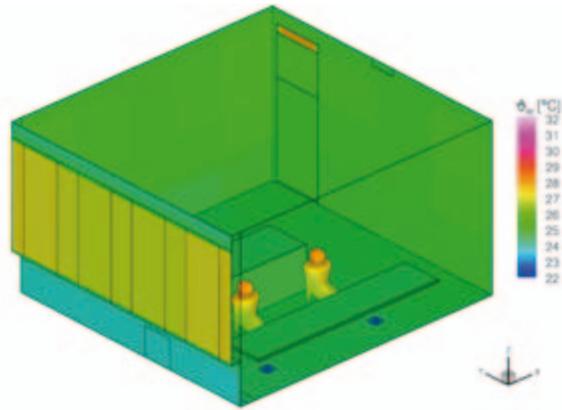


Abbildung 4.13.12: Wandtemperaturen mit Boden

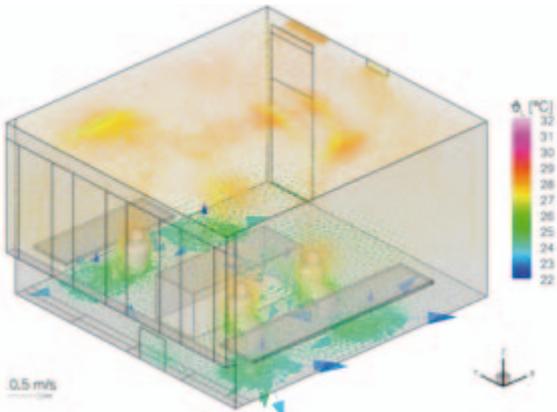


Abbildung 4.13.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

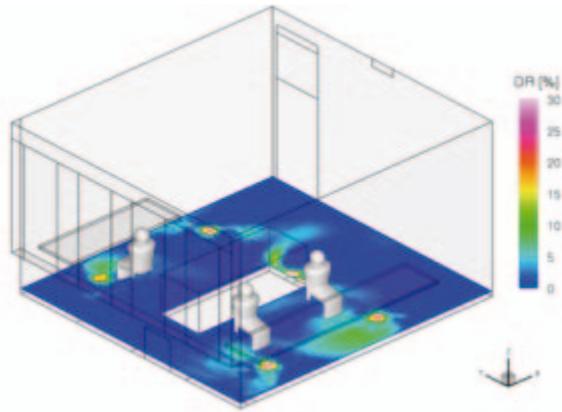


Abbildung 4.13.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.13.3. Fazit

Betonkernaktivierung und die Drall-Luftauslässe in Kombination ermöglichen hier eine sehr gute, mit Variante 4.6 (Quelllüftung und Betonkernaktivierung) vergleichbare Klimatisierung und Belüftung des Raumes unter sommerlichen Bedingungen. Im Bereich der Luftauslässe kommt es zu leichten Zugscheinungen, diese sehr lokalen Beeinträchtigungen wirken sich jedoch nicht auf das insgesamt behagliche Raumklima aus.

## 4.14. Variante PL5 F2A Winter – Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung

### 4.14.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau, thermoaktive Schicht in Fußboden und Decke (in der 28 cm Stahlbetonschicht)
- Heizleistung: maximal  $30 \text{ W/m}^2$
- Verlegedichte 95 %, über Faktor realisiert

Regelung/Betonkernaktivierung:

- Regelung mittels PI-Regler nach mittlerer Oberflächentemperatur der Decke.

Solltemperatur an der Decke:  $\vartheta_w = 24 \text{ °C}$

Lüftung:

- 5 Drallauslässe entsprechend Vorgabe IBO im Bodenbereich, Durchmesser 150 mm, Positionen entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von  $105 \text{ m}^3/\text{h}$ , gleichmäßig auf die Auslässe aufgeteilt
- Zulufttemperatur 2 K unterhalb der Sensortemperatur, gleitend

Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.14.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Auch unter winterlichen Bedingungen ist die hier modellierte Anlagenkombination in der Lage, die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit zu erfüllen. Lediglich zwischen 8 und 10 Uhr gibt es eine leichte Unterschreitung der geforderten Solltemperatur. Da die Temperatur im Raumsensortpunkt allerdings trotzdem noch über  $20 \text{ °C}$  liegt, ist nicht von einer Beeinträchtigung der NutzerInnen auszugehen. Hier zeigt sich, wie schon in Variante 4.7, wieder der große Vorteil der Betonkernaktivierung. Durch die in den Decken gespeicherte Energie kommt es zu einer wesentlich geringeren Auskühlung des Raumes am Wochenende. Im Mittel liegen die Temperaturen zu Beginn der Nutzungszeit um fast 5 K höher.

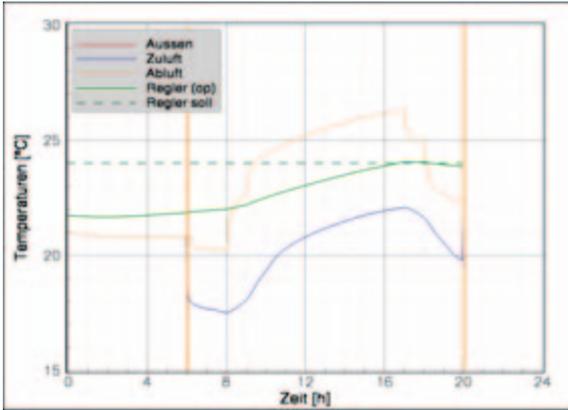


Abbildung 4.14.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

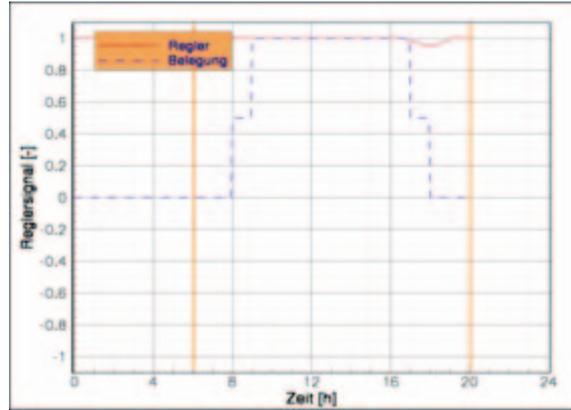


Abbildung 4.14.02: Reglersignal und Belegung

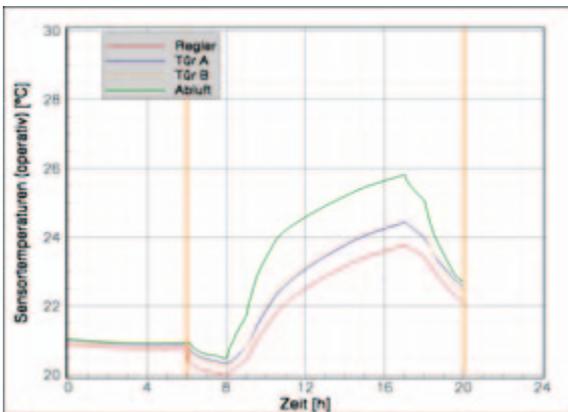


Abbildung 4.14.03: Sensortemperaturen

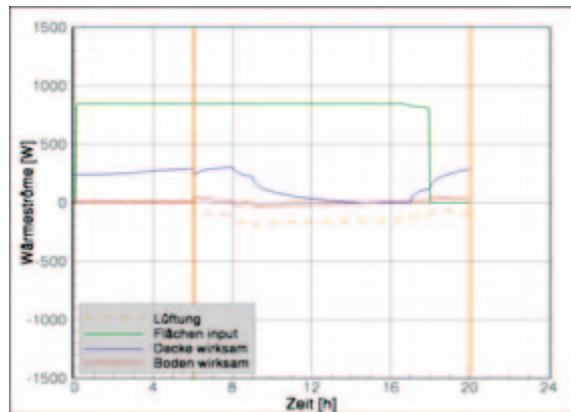


Abbildung 4.14.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.14.05-4.14.14 zeigen ebenso, wie in der sommerlichen Variante, ein sehr ausgeglichenes Raumklima. Sowohl aus Sicht des Luftaustausches als auch aus Sicht der thermischen Behaglichkeit gibt es keine Einschränkungen (hier beispielhaft für 10 Uhr). Die im Tagesverlauf auftretende leichte Überhitzung des Raumes ist eine Folge der inneren Lasten. Der Luftaustausch ist in diesem Falle noch besser als bei der Quelllüftung.

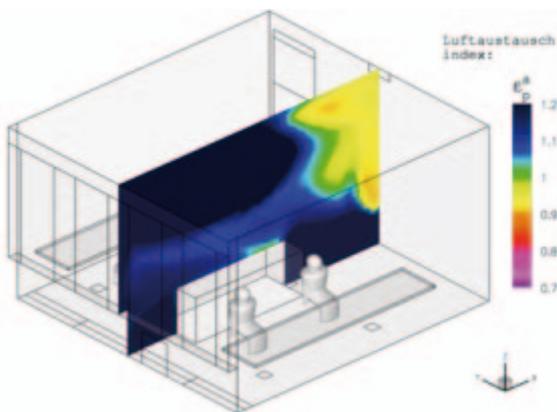


Abbildung 4.14.05: Luftaustauschindex – Vertikal-schnitt

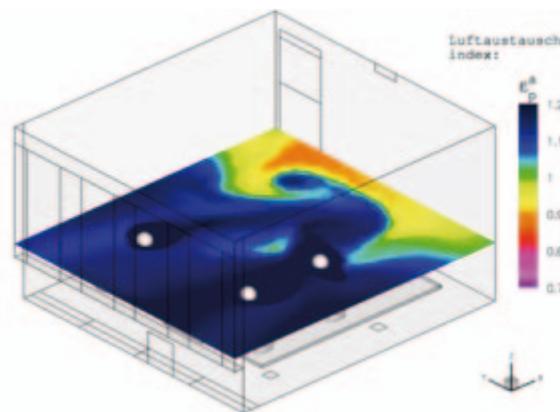


Abbildung 4.14.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1 \text{ m}$

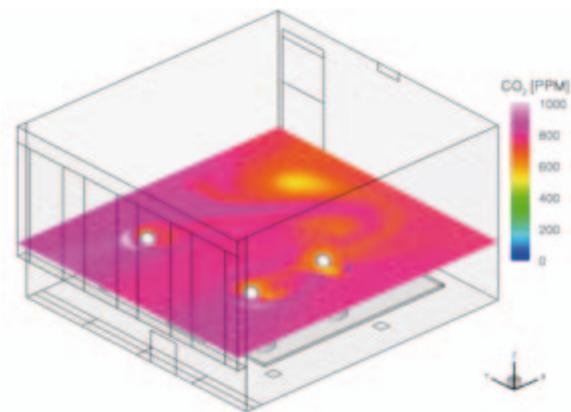


Abbildung 4.14.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm – z = 1,1 m

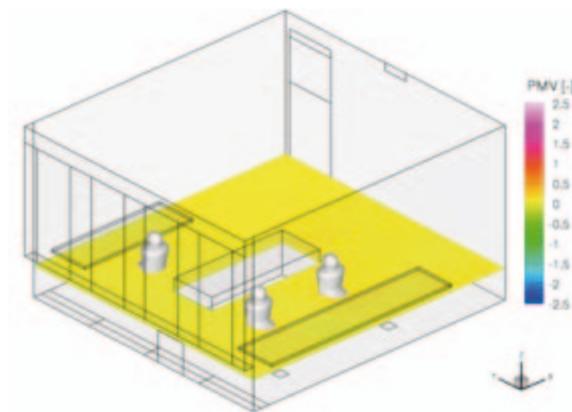


Abbildung 4.14.08: PMV-Index bei z = 0,6 m

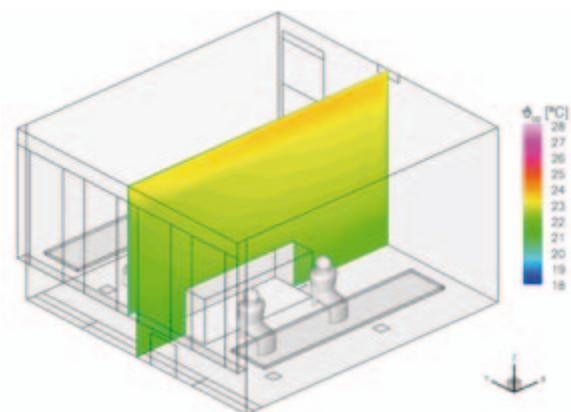


Abbildung 4.14.09: Operative Temperatur Vertikal-schnitt

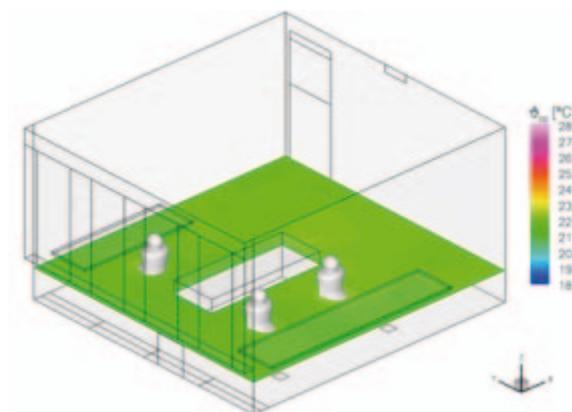


Abbildung 4.14.10: Operative Temperatur bei z = 0,6 m

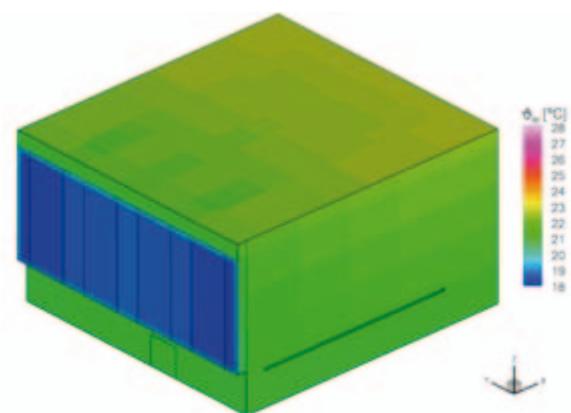


Abbildung 4.14.11: Wandtemperaturen mit Decke

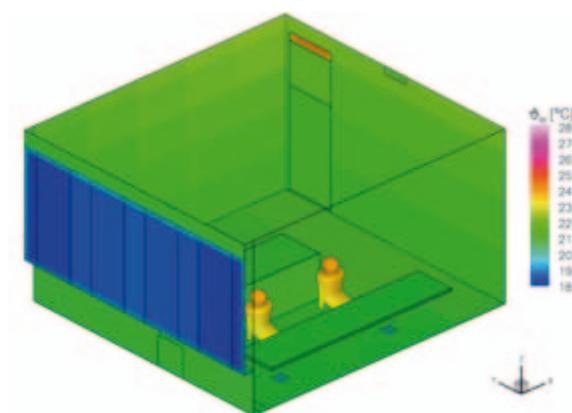


Abbildung 4.14.12: Wandtemperaturen mit Boden

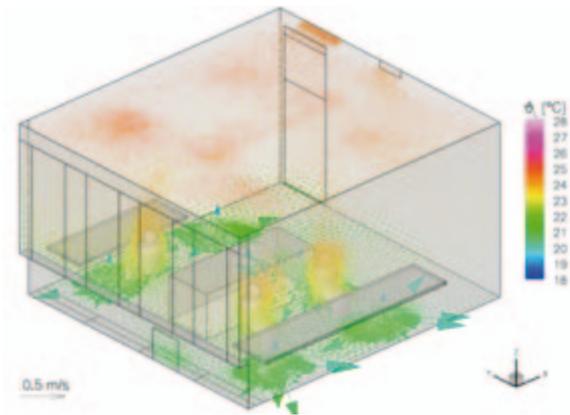


Abbildung 4.14.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

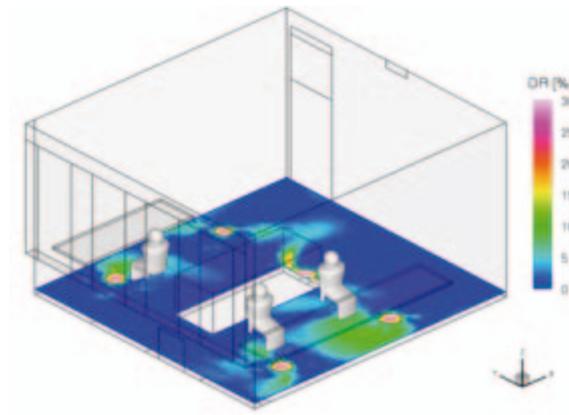


Abbildung 4.14.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.14.3. Fazit

Die Betonkernaktivierung in Kombination mit Dralluftauslässen im Boden ist auch unter winterlichen Verhältnissen sehr gut geeignet, die Anforderungen an Raumluftqualität und thermische Behaglichkeit zu erfüllen.

## 4.15. Variante PL2 F2A Sommer – Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung

### 4.15.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau, thermoaktive Schicht in Fußboden und Decke (in der 28 cm Stahlbetonschicht)
- Kühlleistung: maximal 40 W/m<sup>2</sup>
- Verlegedichte 95 %, über Faktor realisiert

Regelung/Betonkernaktivierung:

- Regelung mittels PI-Regler nach mittlerer Oberflächentemperatur der Decke

Solltemperatur an der Decke:  $\vartheta_w = 23 \text{ °C}$

Lüftung:

- 1 Lüftungsgitter mittig oben an der Innenwand entsprechend Vorgabe IBO, Abmessungen 325 x 125 mm, Position entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur 6 K unterhalb der Sensortemperatur, gleitend.

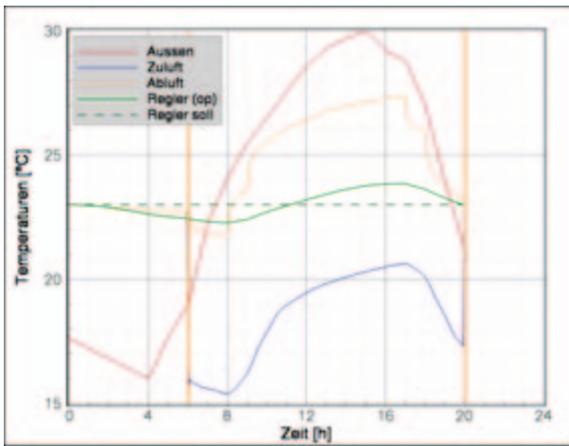
Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.15.2. Ergebnisse

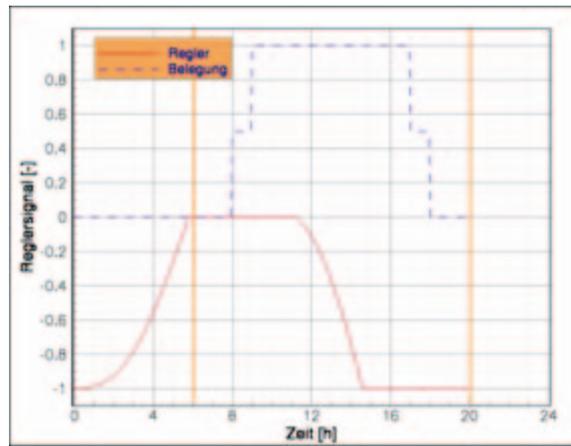
Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

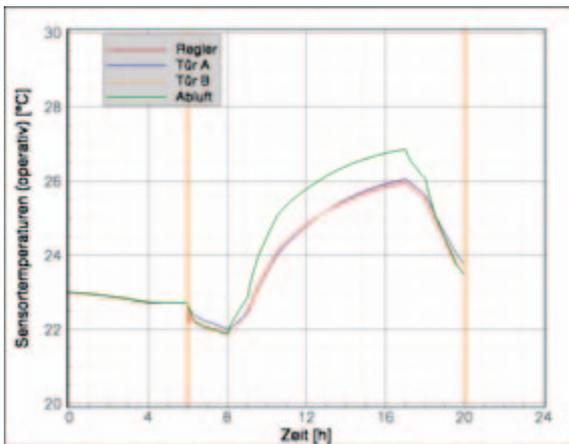
Das Lüftungsgitter und die Energieabgabe der Betonkernaktivierung ermöglichen trotz der hohen inneren Lasten auch in dieser Belüftungsvariante über die gesamte Nutzungszeit die Einhaltung der Solltemperatur von 26 °C. Die geforderte Deckentemperatur von 23 °C wird zwar überschritten, die installierte Kühlleistung reicht aber trotzdem aus. Anhand Abbildung 4.15.03 ist jedoch feststellbar, dass es aufgrund der Nutzung des Lüftungsgitters zu einer stärkeren Durchmischung der Raumluft, speziell im Aufenthaltsbereich kommt.



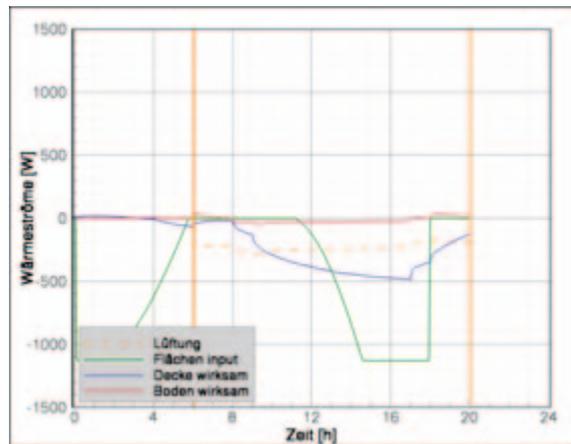
4.15.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag



4.15.02: Reglersignal und Belegung



4.15.03: Sensortemperaturen



4.15.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Ergebnisse der Simulation um 16 Uhr zeigen, dass dieses Anlagenkonzept ebenfalls geeignet ist, die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit und die Hygiene zu erfüllen. Aufgrund der Durchmischungsvorgänge im Bereich des Zuluftstrahls kommt es zwar, verglichen mit den Varianten 4.6 (mit Quelllüftung) und 4.13 (mit Drallauslässen), zu einer Verringerung des Luftaustauschs im Aufenthaltsbereich, der Abtransport von verbrauchter Luft ist jedoch immer noch hinreichend gewährleistet. Zudem ergeben sich Komforteinschränkungen infolge Zugbelastung im Bereich des abfallenden Zuluftstrahls. Im übrigen Raum stellen sich günstige klimatische Verhältnisse ein, aus Sicht des PMV-Index ist es allerdings etwas zu warm.

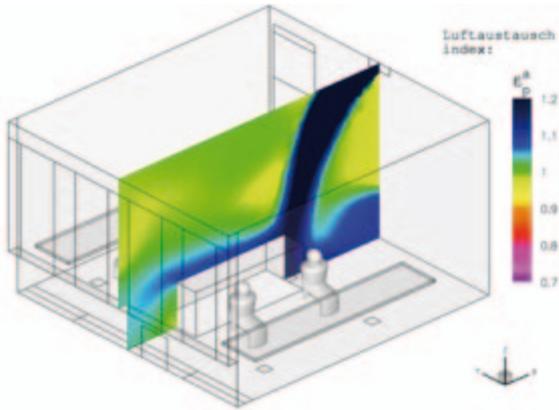


Abbildung 4.15.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

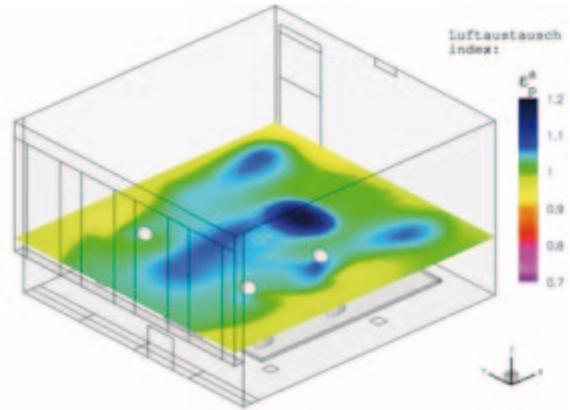


Abbildung 4.15.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1\text{ m}$

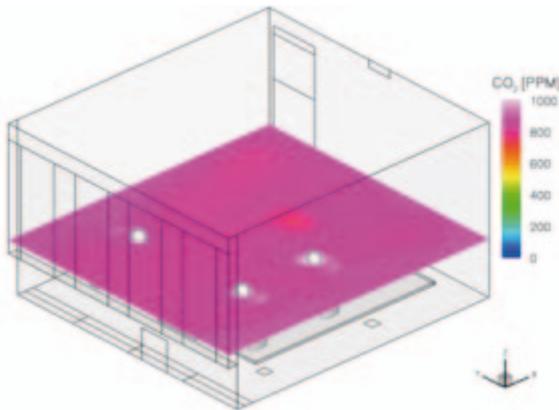


Abbildung 4.15.07:  $\text{CO}_2$ -Konzentration in ppm –  $z = 1,1\text{ m}$

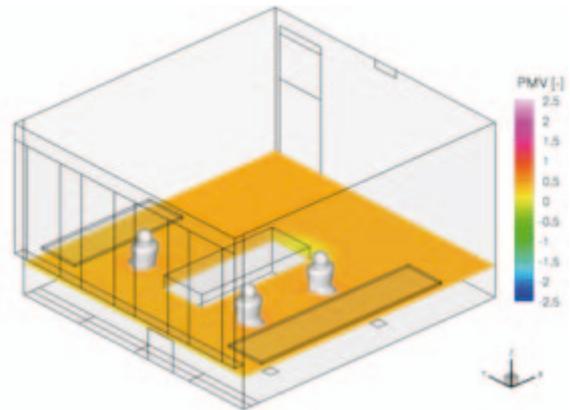


Abbildung 4.15.08: PMV-Index bei  $z = 0,6\text{ m}$

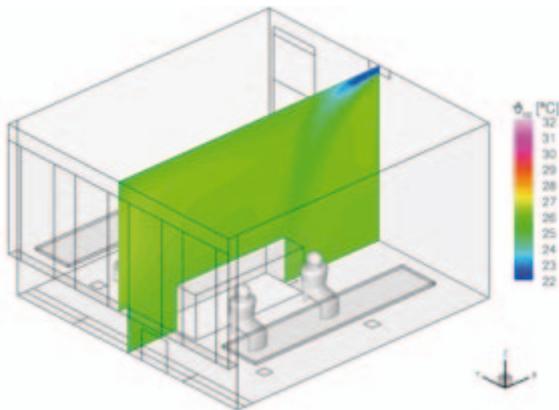


Abbildung 4.15.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

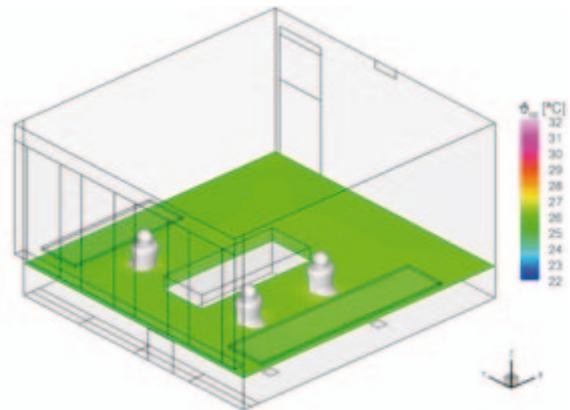


Abbildung 4.15.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6\text{ m}$

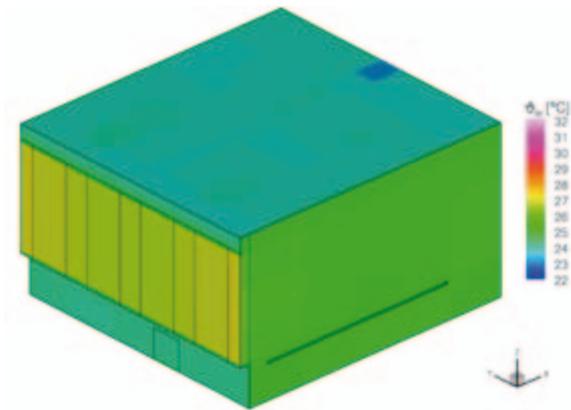


Abbildung 4.15.11: Wandtemperaturen mit Decke

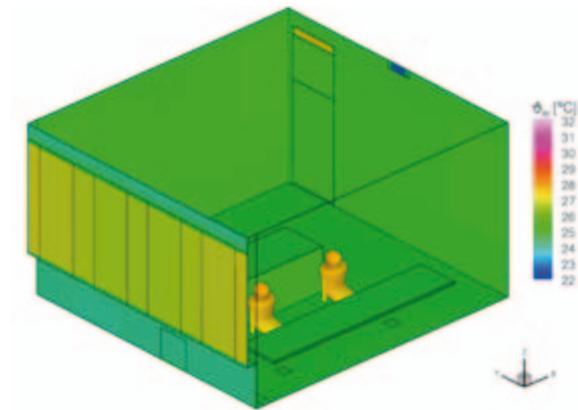


Abbildung 4.15.12: Wandtemperaturen mit Boden

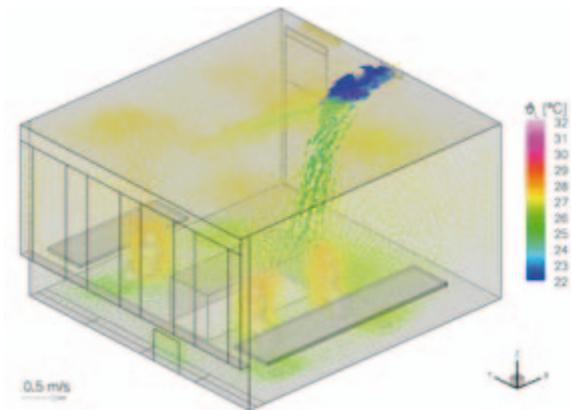


Abbildung 4.15.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

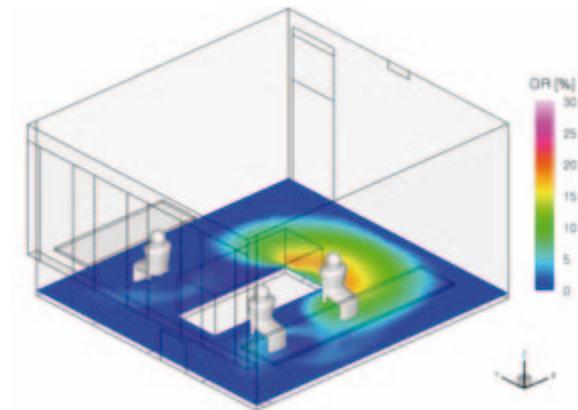


Abbildung 4.15.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.15.3. Fazit

Abgesehen von den hier auftretenden Zugbelastungen ist dieses Anlagenkonzept in der Lage, die Anforderungen an den Luftaustausch und die thermische Behaglichkeit zu erfüllen. Im direkten Vergleich mit den zwei Konzepten der Zuluft einbringung im Bodenbereich schneidet das hier umgesetzte Konzept unter sommerlichen Verhältnissen jedoch schlechter ab.

## 4.16. Variante PL2 F2A Winter – Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung

### 4.16.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau, thermoaktive Schicht in Fußboden und Decke (in der 28 cm Stahlbetonschicht)
- Heizleistung: maximal 30 W/m<sup>2</sup>
- Verlegedichte 95 %, über Faktor realisiert

Regelung/Betonkernaktivierung:

- Regelung mittels PI-Regler nach mittlerer Oberflächentemperatur der Decke

Solltemperatur an der Decke:  $\vartheta_w = 24 \text{ °C}$

Lüftung:

- 1 Lüftungsgitter mittig oben an der Innenwand entsprechend Vorgabe IBO, Abmessungen 325 x 125 mm, Position entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur isotherm, gleitend

Start der Anlagen um 06:00Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.16.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Auch unter winterlichen Bedingungen ist die hier modellierte Anlagenkombination in der Lage, die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit weitgehend zu erfüllen. Insgesamt verhält sich diese Kombination thermisch in etwa so, wie die anderen Lüftungskonzepte in Verbindung mit Betonkernaktivierung. Aufgrund der isotherm im Deckenbereich (anstelle der 2 K Untertemperatur in den anderen Lüftungssystemen) eingebrachten Zuluft kommt es allerdings zu einer noch stärkeren Überhitzung des Raumes. Die Temperaturen steigen hier auf Werte über 25 °C, liegen also 3 K über der geforderten Solltemperatur. Diese Überhitzung ist eine Folge der großen Trägheit der Betonkernaktivierung. Zudem kommt es ab etwa 12 Uhr zu einer Kühlfunktion der Decke, da die Raumtemperatur aufgrund der inneren Quellen die Wandtemperatur in diesem Bereich übersteigt.

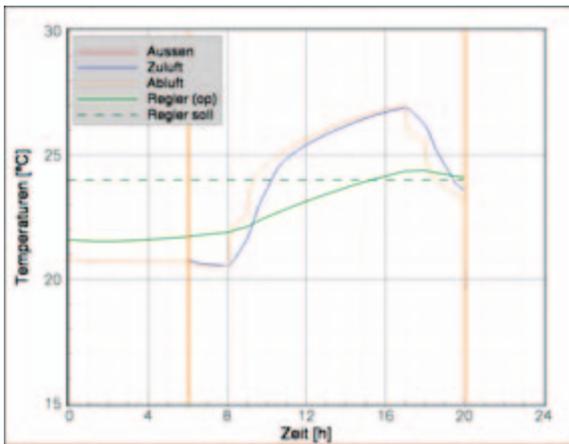


Abbildung 4.16.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

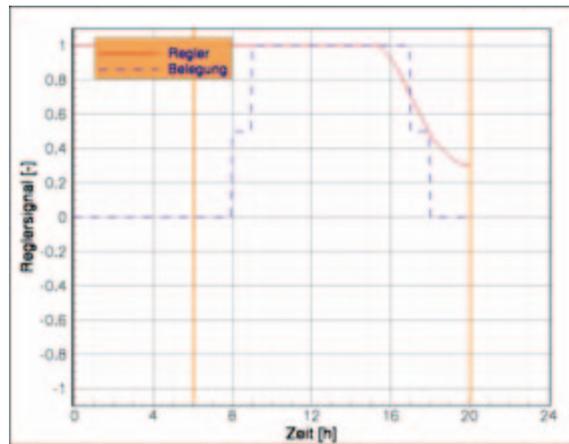


Abbildung 4.16.02: Reglersignal und Belegung

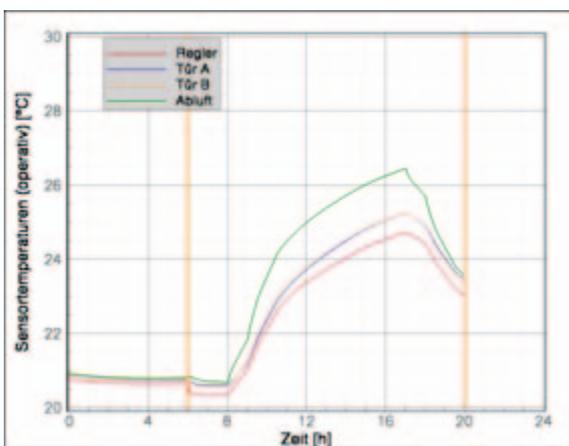


Abbildung 4.16.03: Sensortemperaturen

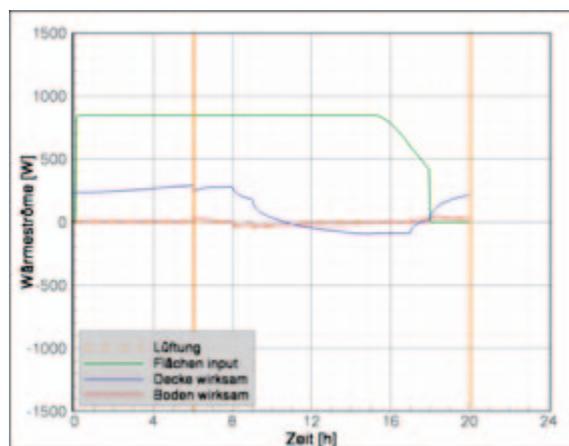


Abbildung 4.16.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.16.05-4.16.14 zeigen ein sehr ausgeglichenes Raumklima aus Sicht der thermischen Behaglichkeit. Es gibt weder Einschränkungen aus thermischer Sicht (hier beispielhaft für 10 Uhr), noch aus Sicht möglicher Zugbelastungen. Die im Tagesverlauf auftretende leichte Überhitzung des Raumes ist eine Folge der inneren Lasten.

Aus Sicht des Luftaustauschs ist die Anlagenkombination jedoch als eher ungünstig einzustufen. Die isotherm eingebrachte Zuluft bleibt aufgrund der warmen Decke und aufgrund der hohen thermischen Lasten weitgehend im oberen Raumbereich. Somit ergibt sich eine schlechtere Versorgung des Aufenthaltsbereichs mit Frischluft. Der Abtransport verbrauchter Luft ist jedoch immer noch in vertretbarem Rahmen (Abb. 4.16.07).

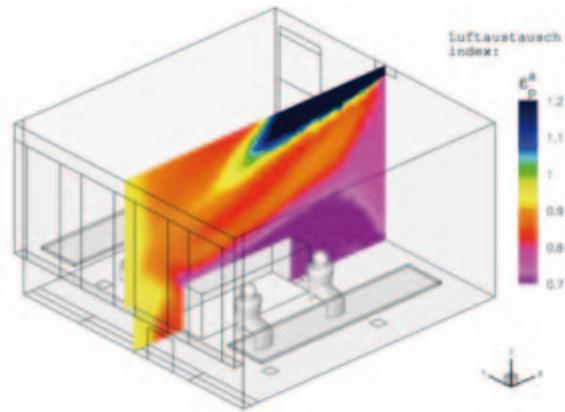


Abbildung 4.16.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

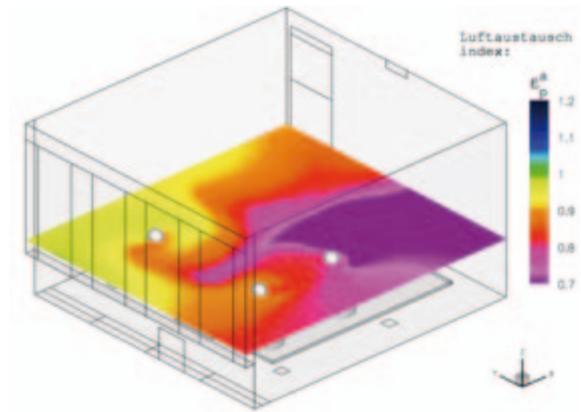


Abbildung 4.16.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1 \text{ m}$

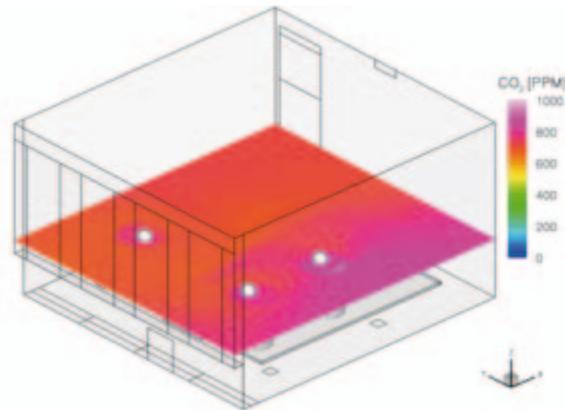


Abbildung 4.16.07:  $\text{CO}_2$ -Konzentration in ppm –  $z = 1,1 \text{ m}$

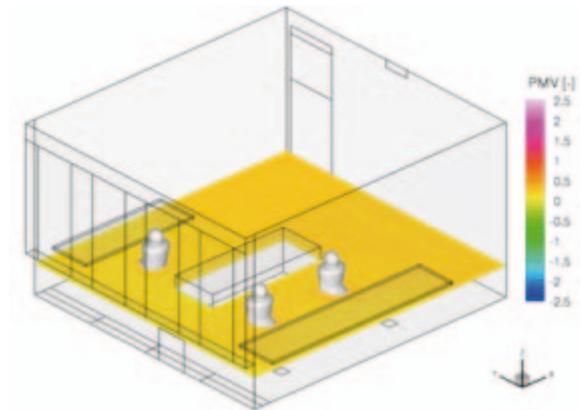


Abbildung 4.16.08: PMV-Index bei  $z = 0,6 \text{ m}$

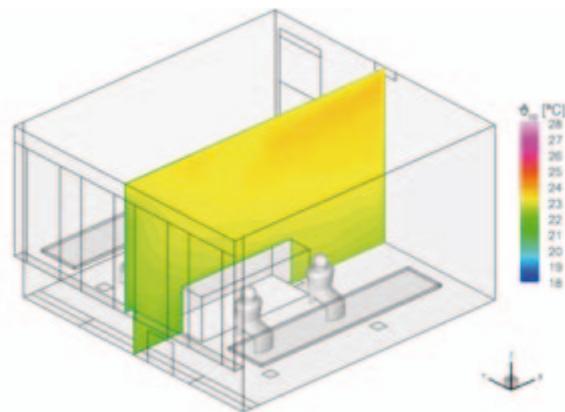


Abbildung 4.16.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

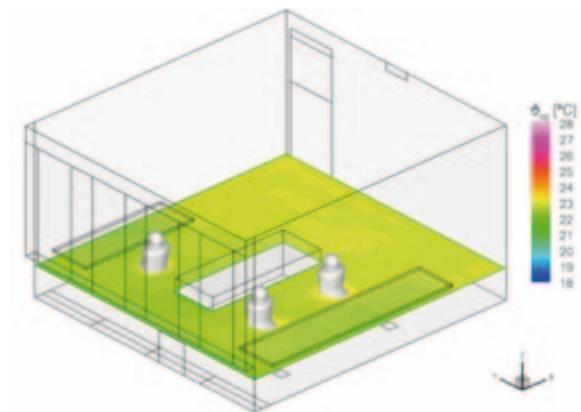


Abbildung 4.16.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6 \text{ m}$

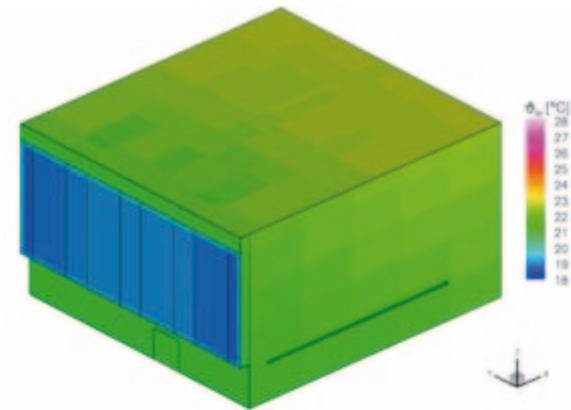


Abbildung 4.16.11: Wandtemperaturen mit Decke

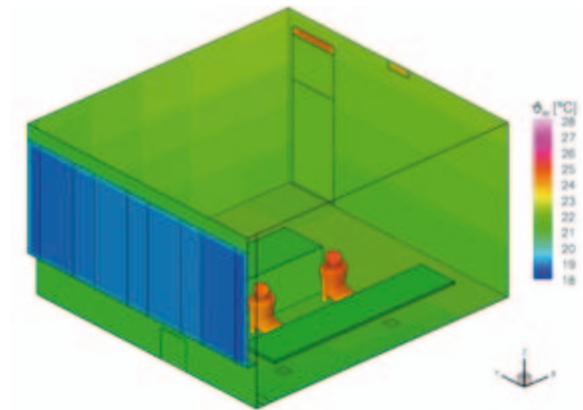


Abbildung 4.16.12: Wandtemperaturen mit Boden

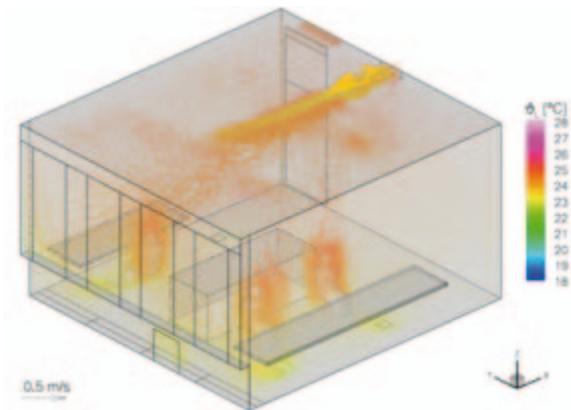


Abbildung 4.16.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

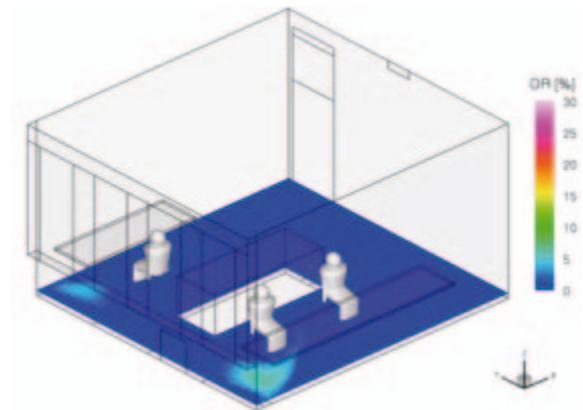


Abbildung 4.16.14: Zugluftisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.16.3. Fazit

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit unter winterlichen Bedingungen ist das vorliegende Anlagenkonzept geeignet, die entsprechenden Anforderungen zu erfüllen. Es stellt sich ein sehr gleichmäßiges, zugbelastungsfreies Raumklima ein.

Aus Sicht des Luftaustauschs ist das Konzept, die Zuluft isotherm im Deckenbereich einzubringen problematisch, da sich dort auch die Absaugung befindet und somit Kurzschlusseffekte auftreten, die eine Versorgung des Aufenthaltsbereichs mit Frischluft deutlich erschweren.

## 4.17. Variante PL4 F5A Sommer – Quelllüftung und Fußbodenkühlung

### 4.17.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Fußbodenkühlung, Trockenestrich, Decke analoger Aufbau, thermoaktive Schicht in Fußboden und Decke (als Kühlung für Raum darüber), 2.5 cm unterhalb des Estrichs
- Kühlleistung: maximal 30 W/m<sup>2</sup>
- Verlegedichte 90 %, über Faktor realisiert

Regelung/Fußbodenkühlung:

- Regelung mittels PI-Regler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ °C}$

Lüftung:

- Quellluftauslass entsprechend Vorgabe IBO unterhalb der Fensterfassade
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h,
- Zulufttemperatur 4 K unterhalb der Sensortemperatur, gleitend.

Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.17.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Im Falle der Fußbodenkühlung in Verbindung mit der Quelllüftung kommt es, wie auch schon in Variante 4.4 (mit Lüftungsgitter), fast über den gesamten Nutzungszeitraum zu einer leichten Überschreitung der Solltemperatur im Sensorpunkt. Die Kühlleistung der Fußbodenkühlung reicht in diesem Falle nicht aus, die hohen inneren Lasten zu kompensieren. Die Überschreitung fällt allerdings geringer aus als in Variante 4.4, da hier die kühle Zuluft bodennah und impulsarm in den Aufenthaltsbereich eingebracht wird. Somit kommt es zu einer stärkeren Temperaturschichtung im Raum und somit auch zu niedrigeren Temperaturen im Sensorbereich.

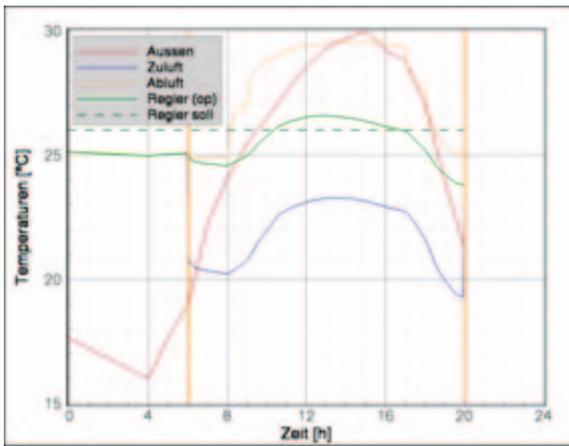


Abbildung 4.17.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

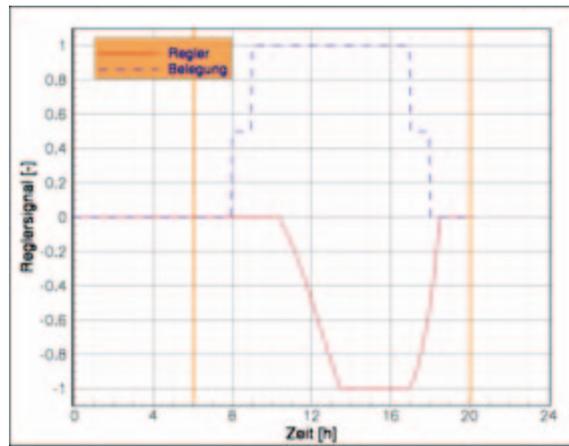


Abbildung 4.17.02: Reglersignal und Belegung

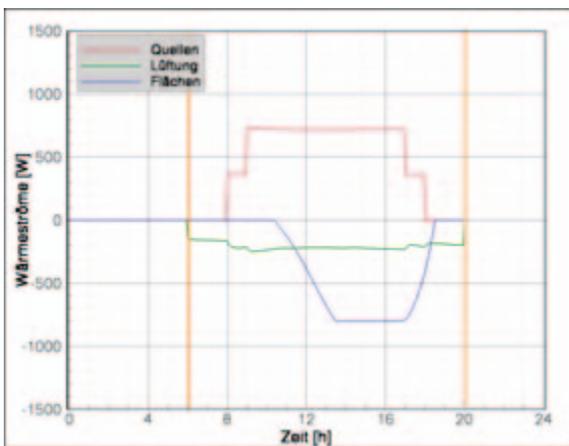


Abbildung 4.17.03: Wärmeströme - Input

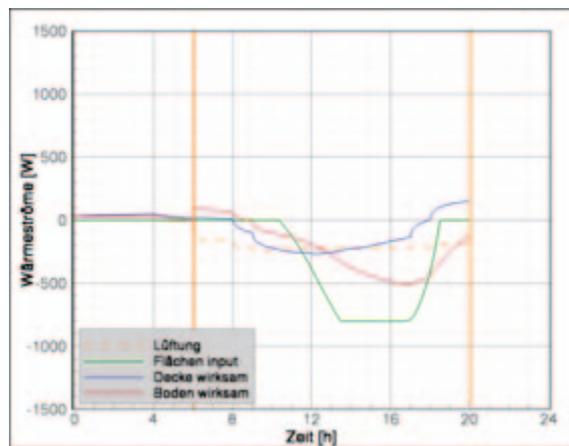


Abbildung 4.17.04: Wärmeströme raumwirksam

## Ausgewählte Zeitpunkte

Hier wurden beispielhaft die Resultate um 16 Uhr, also zu einem Zeitpunkt hoher thermischer Belastung des Raumes zur Bewertung der thermischen und Behaglichkeitsverhältnisse herangezogen, siehe Abb. 4.17.05-4.17.14.

Die Abbildungen 4.17.05-4.17.14 zeigen insgesamt das auch bei den anderen Varianten mit Quelllüftung auftretende, sehr ausgewogene Klima im untersuchten Büroraum. Aufgrund der Quelllüftung, verbunden mit der Luftabsaugung oberhalb der Tür kommt es zu einer hervorragenden Versorgung des Aufenthaltsbereichs mit Frischluft, was sich sowohl in hohen Werten des lokalen Luftaustauschindex als auch in niedrigen Werten der CO<sub>2</sub>-Verteilung widerspiegelt.

Die operativen Temperaturen liegen in weiten Bereichen des Raumes, jedoch ausschließlich in Höhe des Sensors, sehr nahe bei den anvisierten 26 °C. Hierbei wird die höhere Lufttemperatur im Deckenbereich durch eine deutlich niedrigere Strahlungstemperatur (Kühfußboden) ausgeglichen.

Im Aufenthaltsbereich treten lediglich in der Nähe des Quellluftauslasses geringe Zugbelastungen auf, im Raum insgesamt stellt sich ein ruhiges und aus Sicht der thermischen Behaglichkeit akzeptables Strömungsfeld ein.

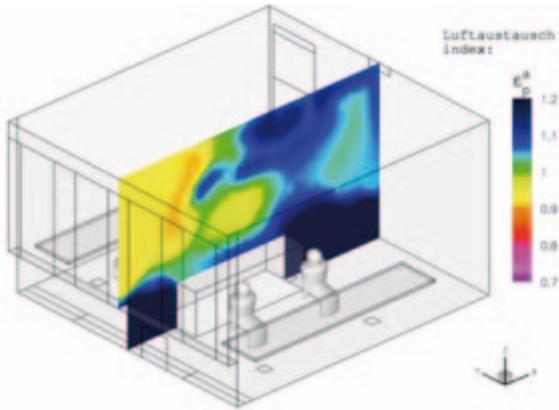


Abbildung 4.17.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

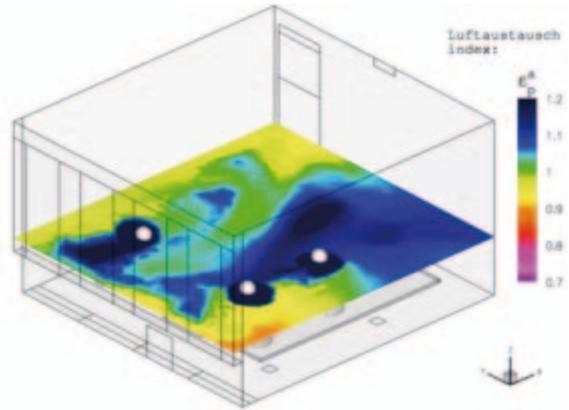


Abbildung 4.17.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1\text{ m}$

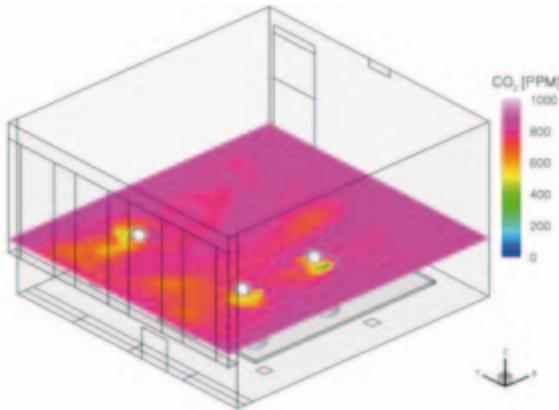


Abbildung 4.17.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm –  $z = 1,1\text{ m}$

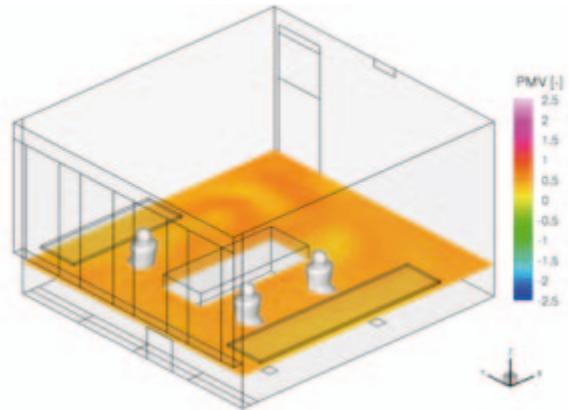


Abbildung 4.17.08: PMV-Index bei  $z = 0,6\text{ m}$

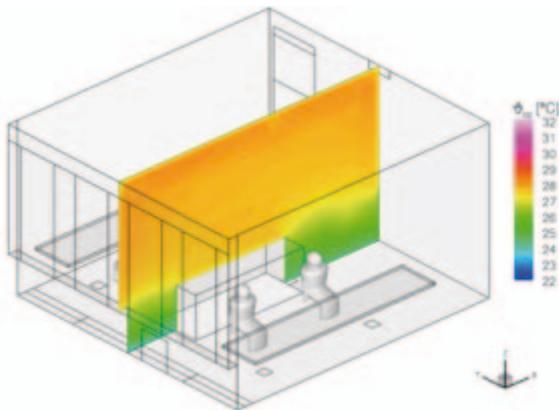


Abbildung 4.17.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

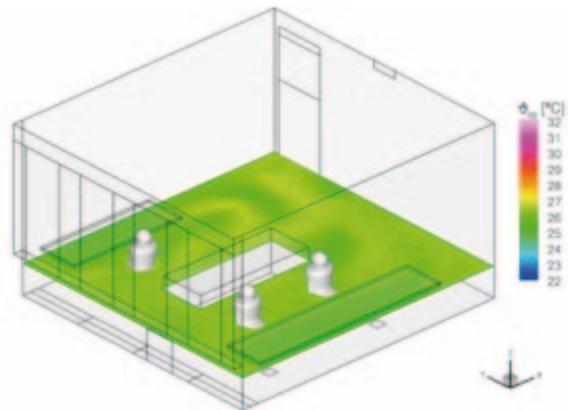


Abbildung 4.17.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6\text{ m}$

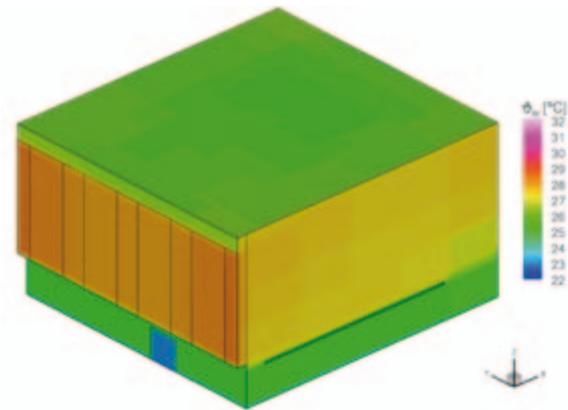


Abbildung 4.17.11: Wandtemperaturen mit Decke

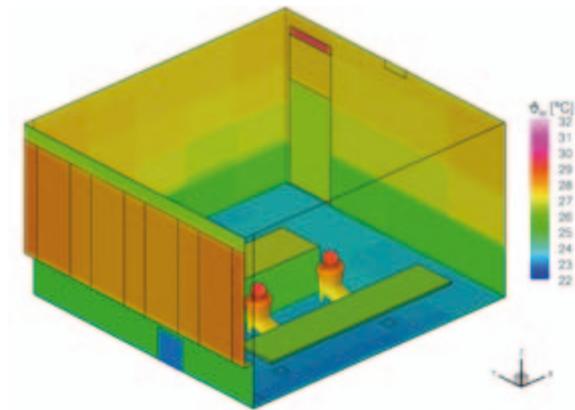


Abbildung 4.17.12: Wandtemperaturen mit Boden

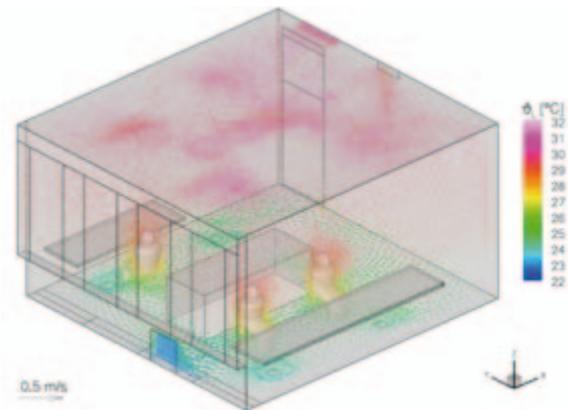


Abbildung 4.17.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

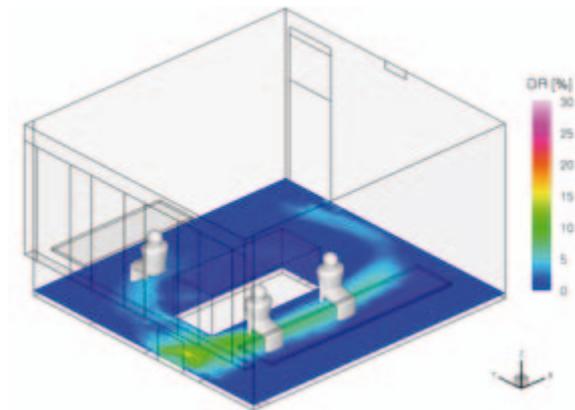


Abbildung 4.17.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.17.3. Fazit

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit ist diese Variante als etwas zu warm einzustufen. Aus Sicht des Luftaustauschs sowie eventuell auftretender Zugbelastungen gibt es aufgrund des ohnehin sehr vorteilhaften Quelllüftungskonzepts keinerlei Einschränkungen.

## 4.18. Variante PL4 F5A Winter – Quelllüftung und Fußbodenheizung

### 4.18.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Fußbodenheizung Trockenestrich, Decke analoger Aufbau, thermoaktive Schicht in Fußboden und Decke (als Heizung für Raum darüber)
- Heizleistung: maximal 50 W/m<sup>2</sup>
- Verlegedichte 90 %, über Faktor realisiert

Regelung/Fußbodenheizung:

- Regelung mittels PI-Regler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt.

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 22 \text{ °C}$

Lüftung:

- Quellluftauslass entsprechend Vorgabe IBO unterhalb der Fensterfassade
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h,
- Zulufttemperatur 2 K unterhalb der Sensortemperatur, gleitend

Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.18.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Unter winterlichen Bedingungen ist diese Variante sehr schnell in der Lage, die geforderte Solltemperatur von 22 °C zu erreichen, obwohl die eingebrachte Zuluft den Raum zusätzlich kühlt. Daran anschließend sind allein die inneren thermischen Quellen ausreichend, den Raum auf dem geforderten Temperaturniveau zu halten. Ab etwa 12 Uhr ist ein Betrieb der Fußbodenheizung nicht mehr erforderlich.

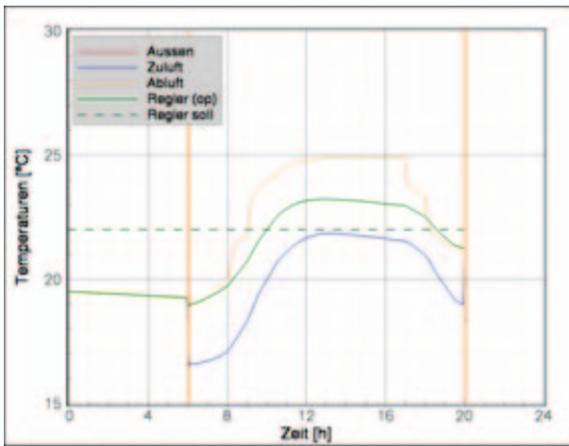


Abbildung 4.18.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

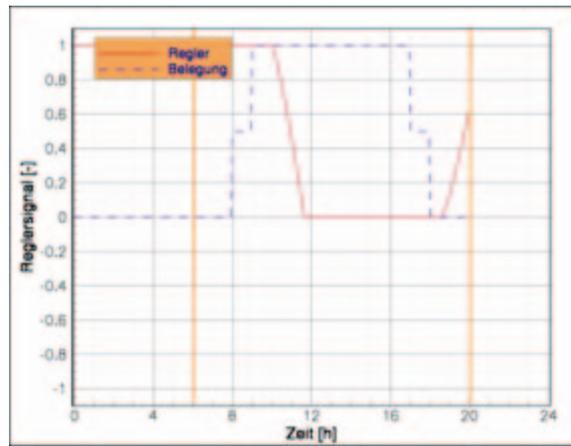


Abbildung 4.18.02: Reglersignal und Belegung

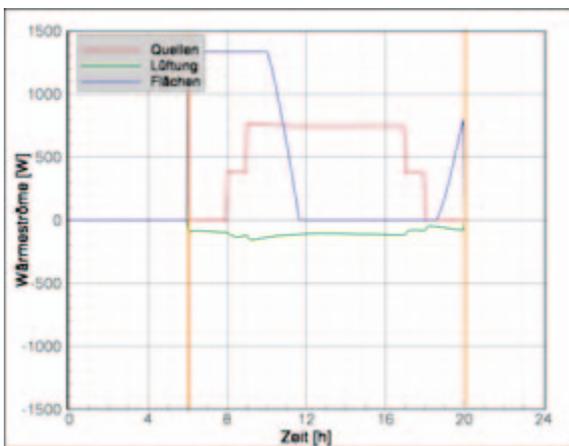


Abbildung 4.18.03: Wärmeströme - Input

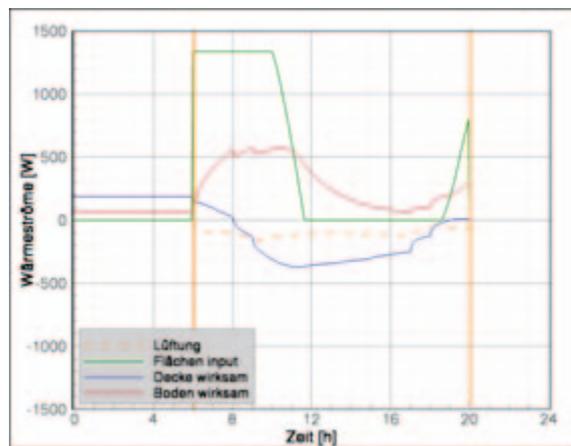


Abbildung 4.18.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.18.05-4.18.14 zeigen die Resultate der Simulation um 10 Uhr.

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit sowie des Luftaustauschs ist diese Variante als sehr günstig einzustufen. Es kommt zu einer relativ homogenen Verteilung der operativen Temperatur im Raum. Hierbei wird der Kaltluftsee durch die warme Bodenplatte kompensiert. Aufgrund der Fallströmung an der Fensterfassade kommt es jedoch zu einer Beschleunigung der eingebrachten Quellluft, wodurch einerseits diese sich stärker mit der übrigen Raumluft vermischt und andererseits deutliche Zugserscheinungen im Knöchelbereich zu erwarten sind.

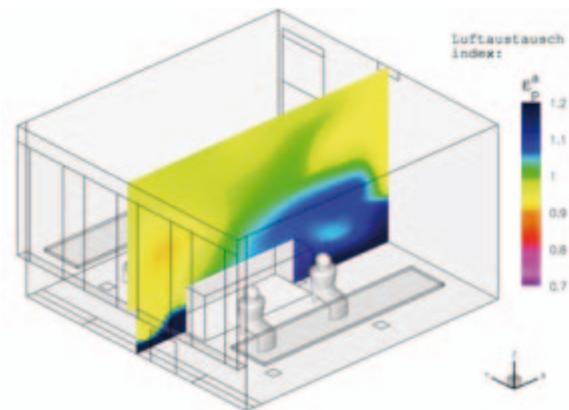


Abbildung 4.18.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

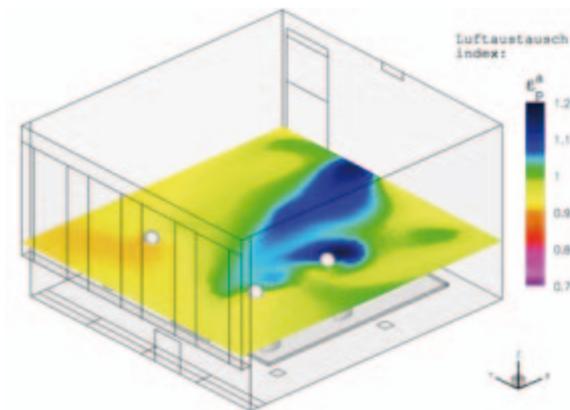


Abbildung 4.18.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1 \text{ m}$

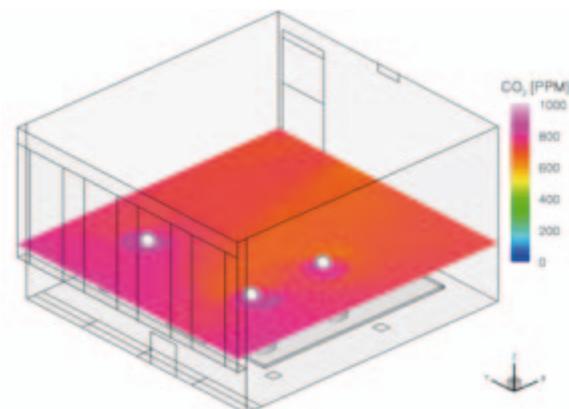


Abbildung 4.18.07:  $\text{CO}_2$ -Konzentration in ppm –  $z = 1,1 \text{ m}$

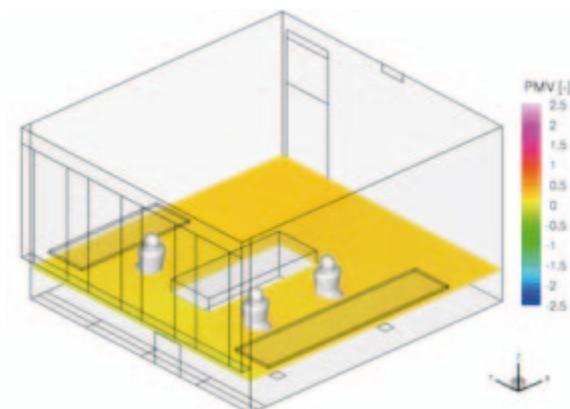


Abbildung 4.18.08: PMV-Index bei  $z = 0,6 \text{ m}$

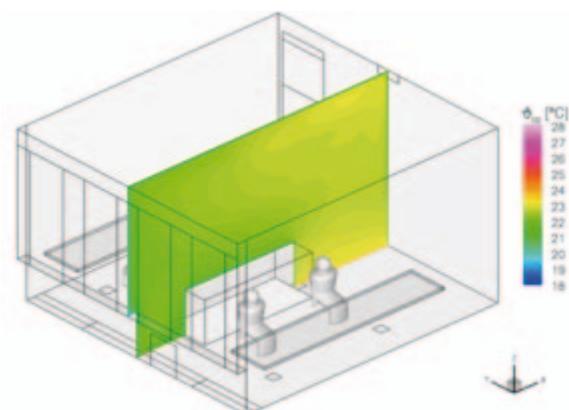


Abbildung 4.18.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

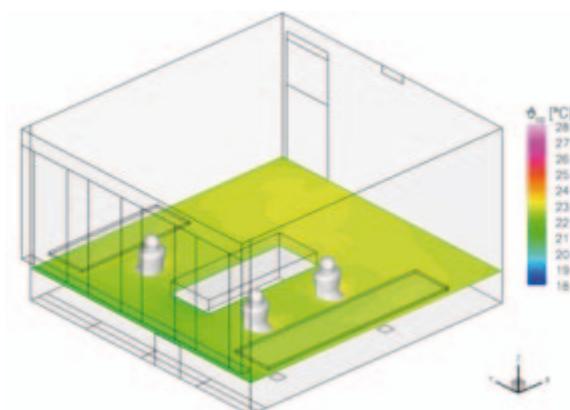


Abbildung 4.18.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6 \text{ m}$

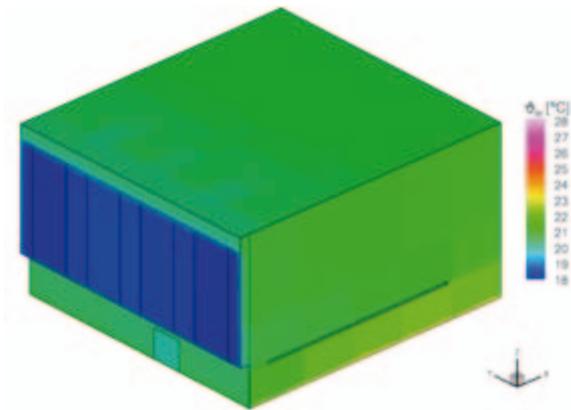


Abbildung 4.18.11: Wandtemperaturen mit Decke

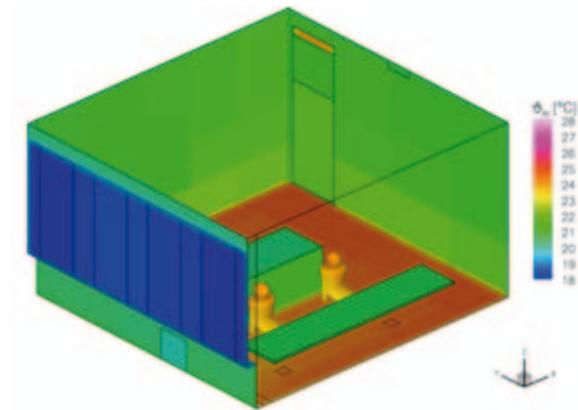


Abbildung 4.18.12: Wandtemperaturen mit Boden

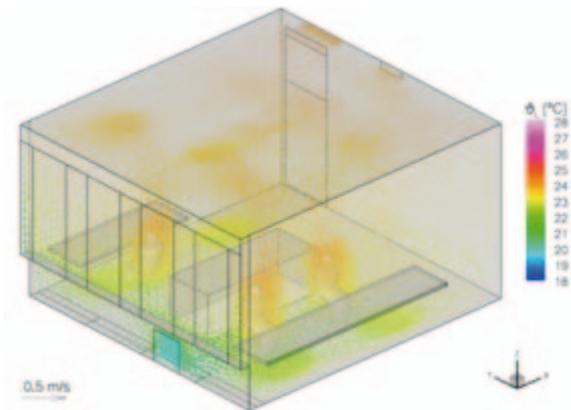


Abbildung 4.18.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

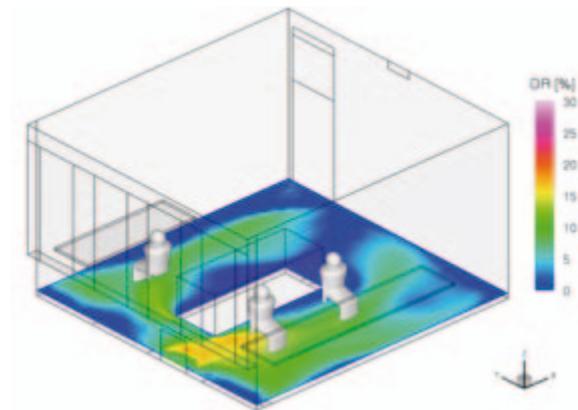


Abbildung 4.18.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.18.3. Fazit

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit sowie des Luftaustauschs ist diese Variante als günstig einzustufen. Die eintretende Quellluft wird jedoch durch das Zusammenwirken von herabströmender Luft an der Fensterfassade und Fußbodenheizung beschleunigt, wodurch es zu leichten Zugbelastungen im Aufenthaltsbereich kommt.

## 4.19. Variante PL2 L2 Sommer – Lüftungsgitter und Deckenfancoil

### 4.19.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau

#### Kühlung

- Deckenfancoil, Typ 42GWD 010:
- Gerät an der Decke in Raummitte, nur Umluftbetrieb, Zuluft an den 4 Seiten, Abluftansaugung an der Unterseite.
- Geräteabmessungen, LxB = 0.72 x 0.7 m (0.575 x 0.575 m),
- Kühlleistung max. 4.0 kW, Volumenstromregelung, Untertemperatur der Zuluft: 14 K bei höchster Stufe, absolut jedoch nicht unter 14 °C (Zuluftvolumenstrom min 470 m<sup>3</sup>/h, max 850 m<sup>3</sup>/h)

#### Regelung:

- Regelung mittels Zweipunktregler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt. Anlage läuft auf erster Stufe, Volumenstrom: 470 m<sup>3</sup>/h, Regelung dieser Stufe mittels Zweipunktregler: Einschaltpunkt 26 °C, Ausschaltpunkt 24 °C
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ °C}$

#### Lüftung:

- 1 Lüftungsgitter mittig oben an der Innenwand entsprechend Vorgabe IBO, Abmessungen 325 mm x 125 mm, Position entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur isotherm

### 4.19.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen für ausgewählte Zeitpunkte zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Im Zeitverlauf zeigt sich, dass die installierte Kühlleistung in der ersten Stufe des Deckengerätes völlig ausreicht, die thermischen Lasten des Raumes zu kompensieren, siehe Abbildung 4.19.1 und 4.19.2. Nach Einschalten des Gerätes kommt es sehr schnell und effektiv zur Abkühlung der Luft im gesamten Raum. Somit allerdings auch zu einem Takten der Anlage. Die Begrenzung der Kühlleistung (Abb 4.19.3 und

4.19.4) auf etwa 1500 W resultiert zum einen aus dem geringen Ventilatorvolumenstrom und zum anderen aus der Begrenzung der Untertemperatur auf minimal 14 °C.

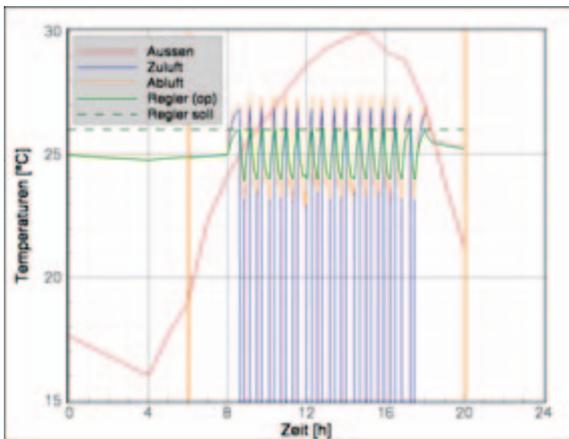


Abbildung 4.19.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

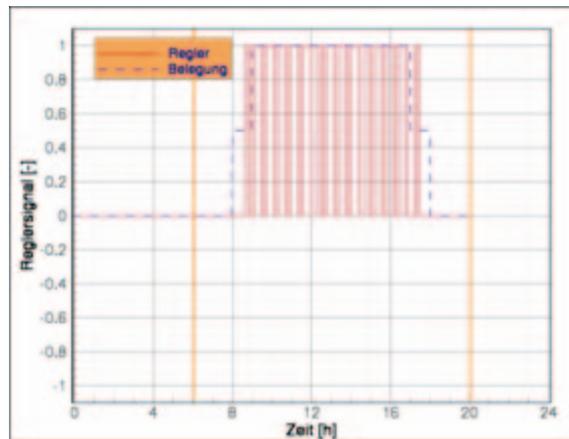


Abbildung 4.19.02: Reglersignal und Belegung

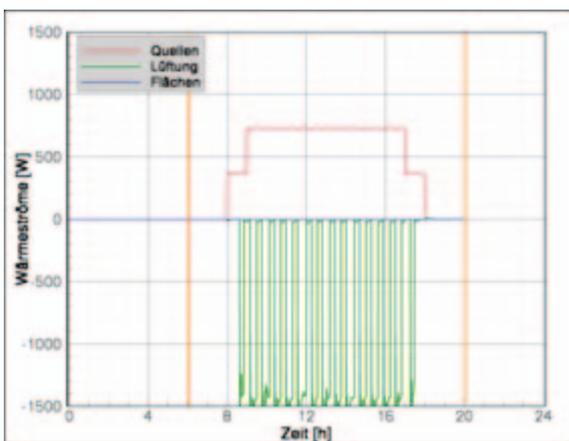


Abbildung 4.19.03: Wärmeströme - Input

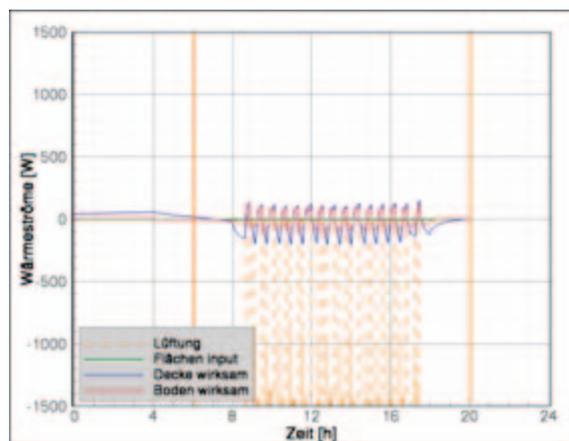


Abbildung 4.19.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.19.05-4.19.14 zeigen die Resultate der Simulation um 16 Uhr. Es ist deutlich erkennbar, dass sich aus Sicht des Luftaustauschs und der thermischen Behaglichkeit bei Anlagenbetrieb durchaus akzeptable bis sehr gute Verhältnisse einstellen. Die eintretende Zuluft wird durch den Deckenlüfter nach unten in den Aufenthaltsbereich abgelenkt und zudem gut durchmischt, wodurch sich die in Abbildung 4.19.5 und 4.19.6 sichtbaren hohen Werte des Luftaustauschindex ergeben.

Von deutlichem Nachteil sind jedoch die aufgrund der hohen Untertemperatur und des hohen Lüftungsvolumenstroms auftretenden relativ starken Zugbelastungen in den Bereichen, in denen die Kaltluft auf den Boden auftrifft.

Im Falle nicht arbeitender Deckenfancoils gibt es keinerlei Einschränkungen bezüglich Zugbelastung, siehe Abbildung 4.19.15, jedoch einen spürbar ungleichmäßigeren Luftaustausch, Abb. 4.19.16.

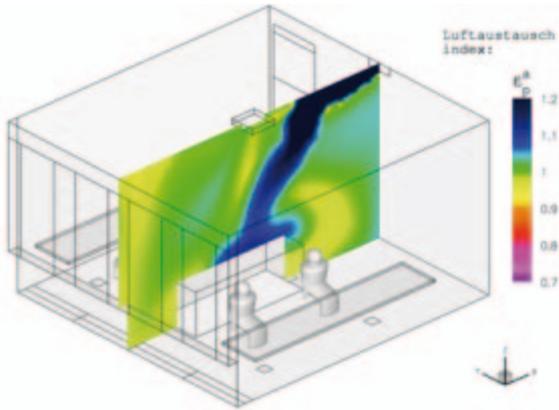


Abbildung 4.19.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

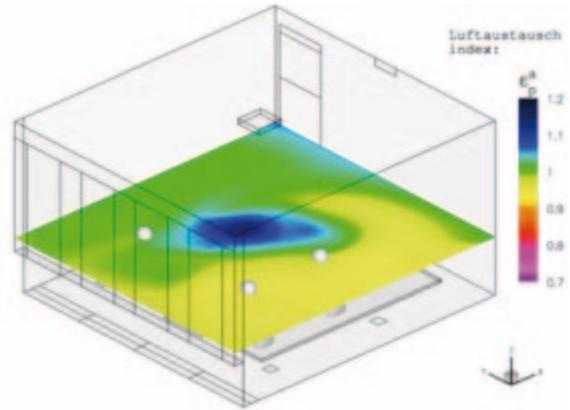


Abbildung 4.19.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1 \text{ m}$

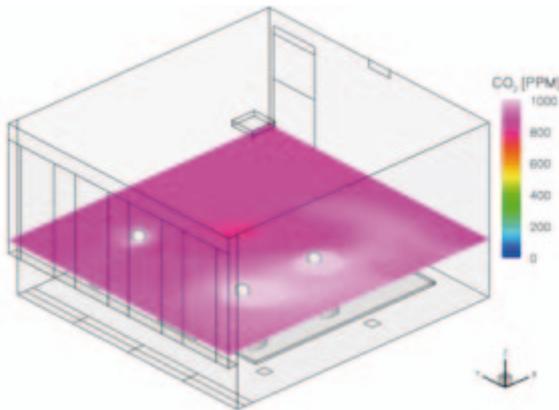


Abbildung 4.19.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm –  $z = 1,1 \text{ m}$

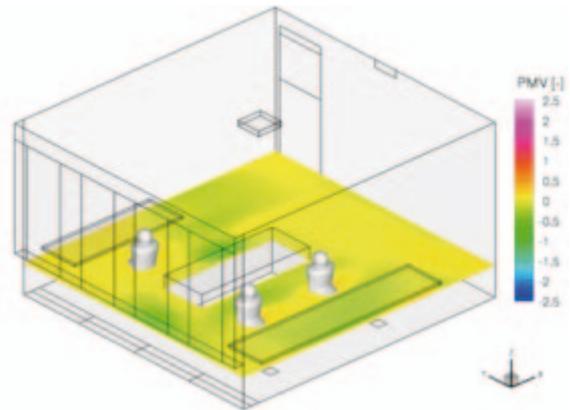


Abbildung 4.19.08: PMV-Index bei  $z = 0,6 \text{ m}$

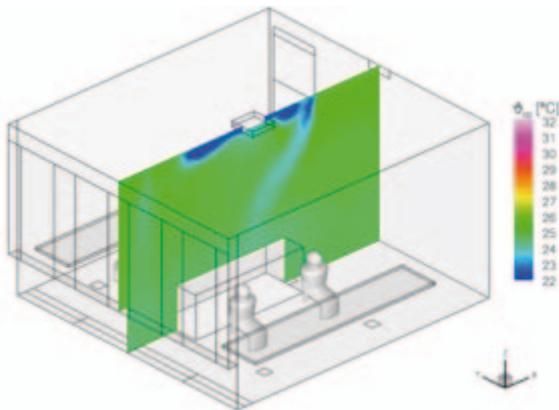


Abbildung 4.19.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

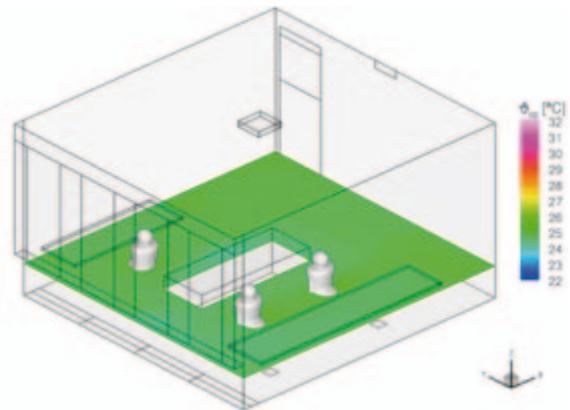


Abbildung 4.19.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6 \text{ m}$

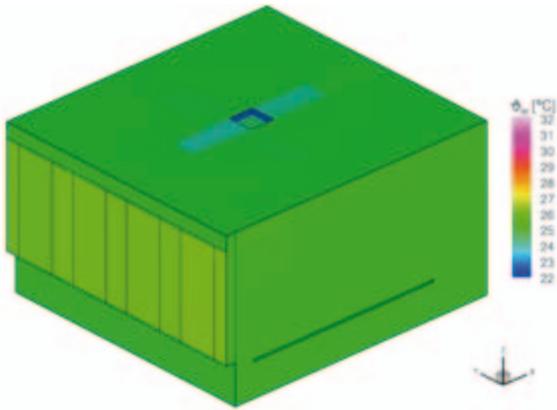


Abbildung 4.19.11: Wandtemperaturen mit Decke

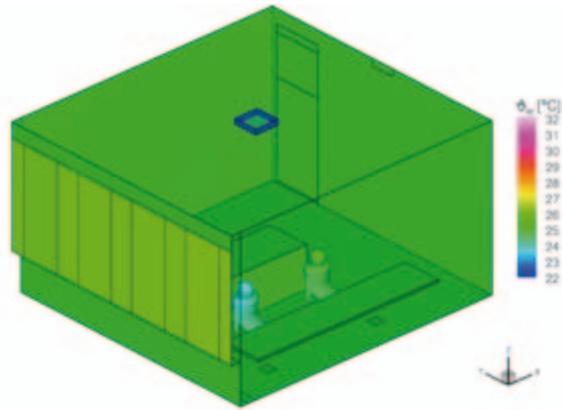


Abbildung 4.19.12: Wandtemperaturen mit Boden

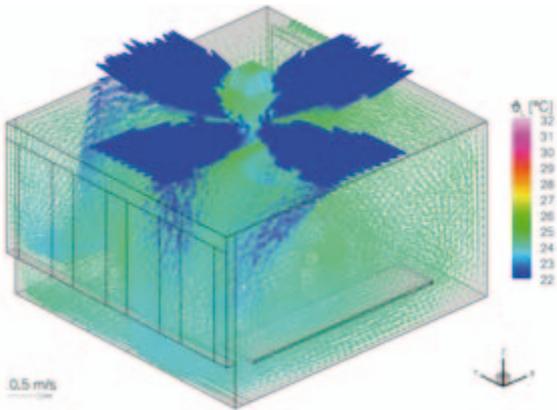


Abbildung 4.19.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

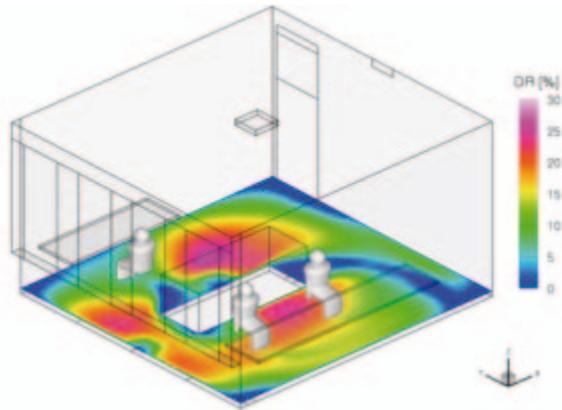


Abbildung 4.19.14: Zugluftisiko im Bodenbereich (0,1 m)

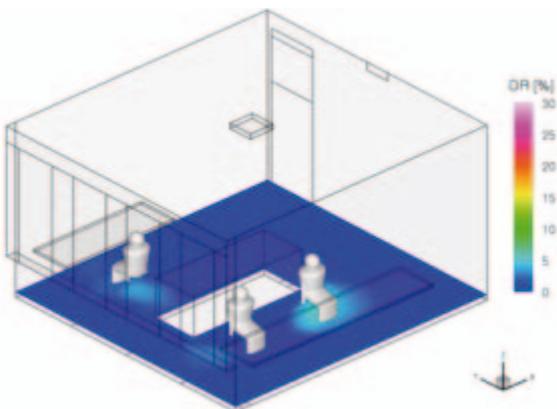


Abbildung 4.19.15: Zugluftisiko im Bodenbereich (0,1 m) Deckenfancoil nicht in Betrieb, 09 Uhr

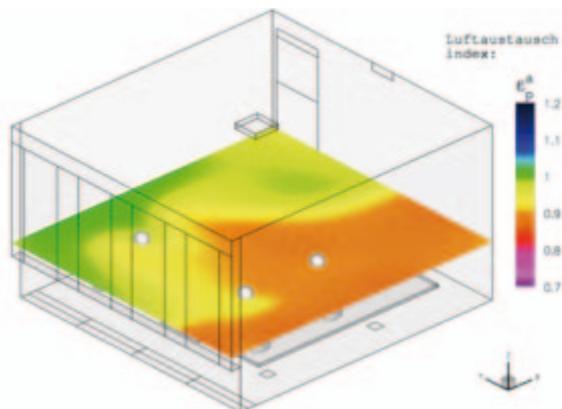


Abbildung 4.19.16: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1 \text{ m}$  – Deckenfancoil nicht in Betrieb, 09 Uhr

### 4.19.3. Fazit

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit sowie des Luftaustauschs ist diese Variante als akzeptabel einzustufen. Aus Sicht der Gefahr möglicher Zugbelastungen ist sie jedoch problematisch. Zudem ist die Einbringung der Zuluft isotherm im Deckenbereich ungünstig, da es hier einerseits direkt zur Interaktion mit dem Deckenfancoil kommt und da es andererseits im Falle nicht arbeitender Deckenfancoils zur Rezirkulation und Kurzschlusseffekten im oberen Raumbereich kommen kann. Dies hätte wiederum eine deutliche Verschlechterung des Luftaustauschs im Aufenthaltsbereich zur Folge.

## 4.20. Variante PL2 L2 Winter – Lüftungsgitter und Deckenfancoil

### 4.20.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke, somit Raumhöhe 3.3 m
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau

#### Heizung

- Deckenfancoil, Typ 42GWD 010:
- Gerät an der Decke in Raummitte, nur Umluftbetrieb, Zuluft an den 4 Seiten, Abluftansaugung an der Unterseite.
- Geräteabmessungen, LxB = 0.72 x 0.7 m (0.575 x 0.575 m),

Heizleistung max. 4.6 kW, Volumenstromregelung, Übertemperatur der Zuluft: 16 K bei höchster Stufe (Zuluftvolumenstrom min 470 m<sup>3</sup>/h, max 850 m<sup>3</sup>/h)

#### Regelung:

- Regelung mittels Zweipunktregler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt. Anlage läuft auf erster Stufe, Volumenstrom: 470 m<sup>3</sup>/h, Regelung dieser Stufe mittels Zweipunktregler: Einschaltpunkt 22 °C, Ausschaltpunkt 24 °C
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 22 \text{ °C}$

#### Lüftung:

- 1 Lüftungsgitter mittig oben an der Innenwand entsprechend Vorgabe IBO, Abmessungen 325 x 125 mm, Position entsprechend Skizze IBO
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur isotherm

### 4.20.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Im Zeitverlauf der Anlagenparameter (Abb. 4.20.01-4.20.04) ist deutlich erkennbar, dass eine Beheizung des Raumes lediglich außerhalb der Nutzungszeit erfolgen muss. Während der Nutzung reichen die

inneren Lasten in Verbindung mit der aufgeheizten Umfassungsstruktur nicht nur aus, die geforderten 22 °C am Sensorpunkt zu halten, es kommt zusätzlich zu einer leichten Überhitzung.

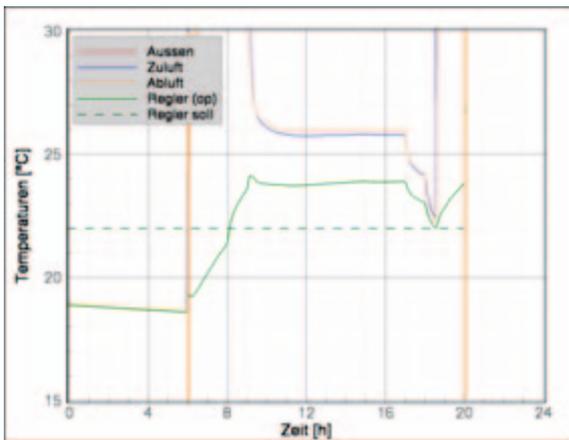


Abbildung 4.20.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

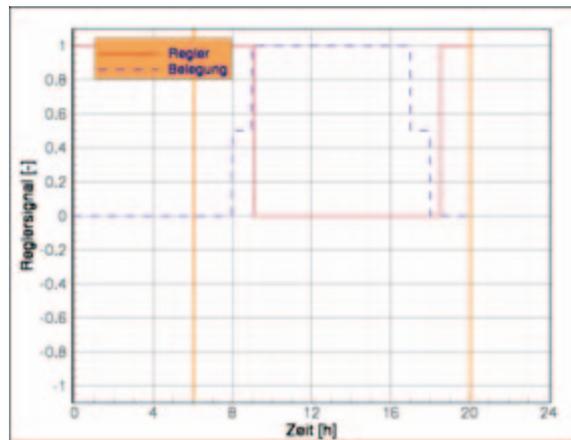


Abbildung 4.20.02: Reglersignal und Belegung

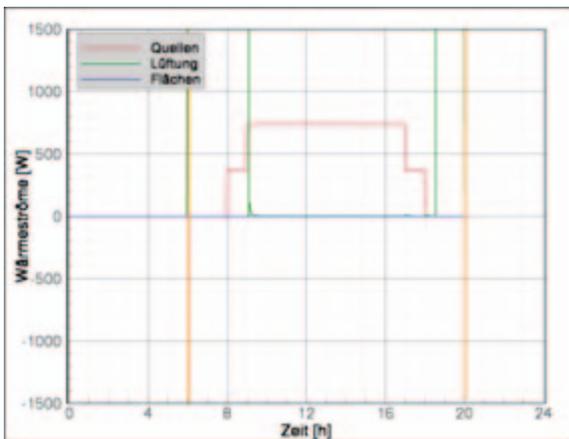


Abbildung 4.20.03: Wärmeströme - Input

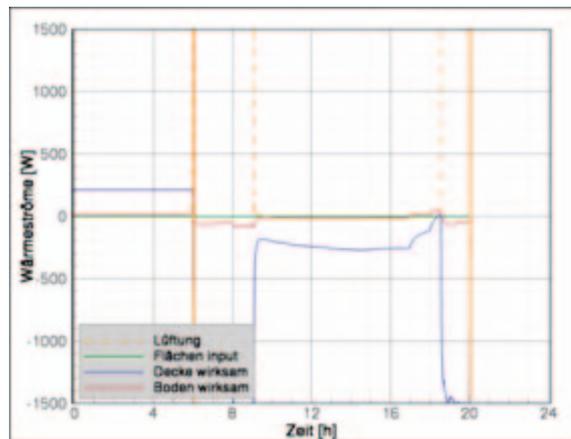


Abbildung 4.20.04: Wärmeströme raumwirksam

## Ausgewählte Zeitpunkte

Da unter winterlichen Bedingungen nur zu Beginn der Nutzungszeit eine Beheizung des Raumes über den Deckenfancoil erforderlich ist, wurden in den Abbildungen 4.20.05-4.20.14 die Resultate der Simulation um 9 Uhr, also bei Anlagenbetrieb dargestellt.

Anhand der Darstellungen erkennt man sehr deutlich, dass die sehr warme Zuluft zu einer äußerst starken Aufheizung des oberen Raumbereichs führt. Es bildet sich eine stabile Schichtung und ein Warmluftpolster aus. Da zudem die Luft oberhalb der Tür abgesaugt wird, kommt es zu einer sehr deutlichen Kurzschlussströmung in diesem Bereich und zu sehr schlechten Werten des Luftaustauschindex im Aufenthaltsbereich.

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit gibt es keine Einschränkungen, die geforderten 22 °C werden sehr schnell erreicht, und es kommt nicht zu Beeinträchtigungen infolge Zugbelastung.

Gleiches gilt für die Nutzungszeit, in der der Deckenfancoil nicht arbeitet. Hier führt die isotherme Grundlüftung über das Gitter jedoch zu einem Aufbrechen der Temperaturschichtung und zu einem deutlich besseren Luftaustausch in der Aufenthaltszone, siehe Abbildungen 4.20.15 und 4.20.16.

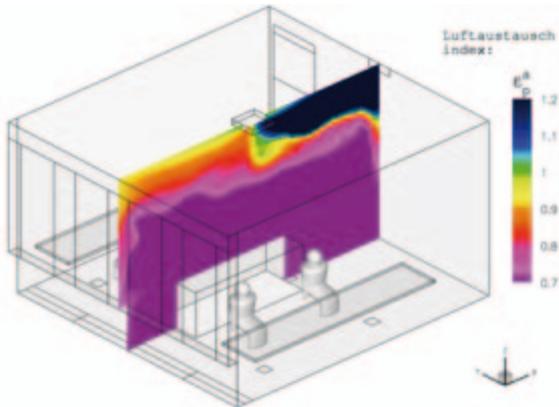


Abbildung 4.20.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

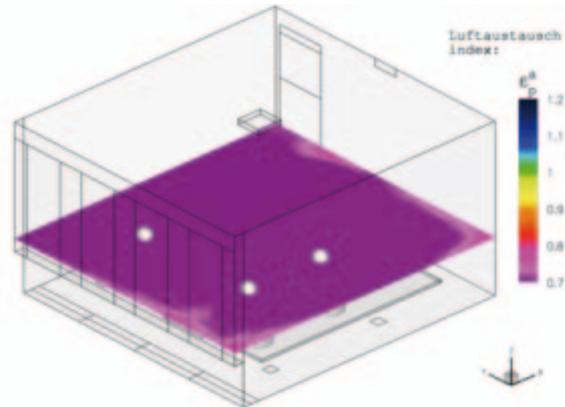


Abbildung 4.20.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1$  m

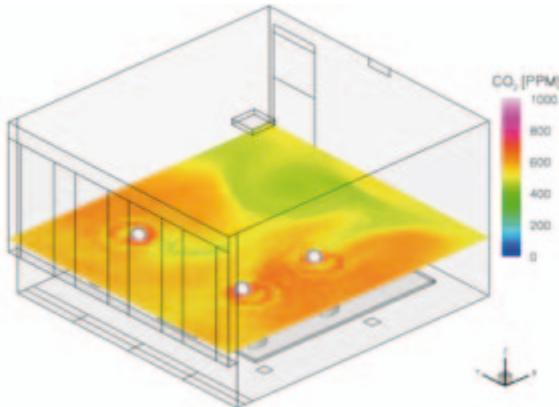


Abbildung 4.20.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm –  $z = 1,1$  m

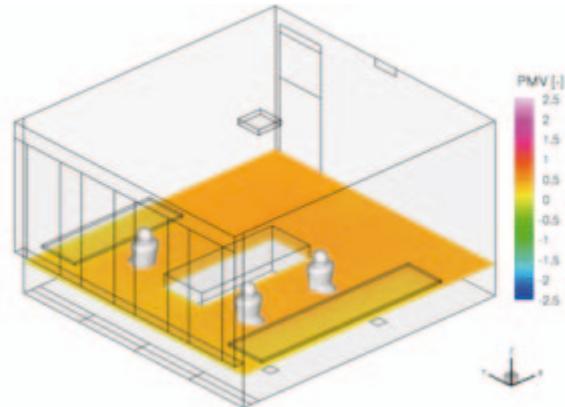


Abbildung 4.20.08: PMV-Index bei  $z = 0,6$  m

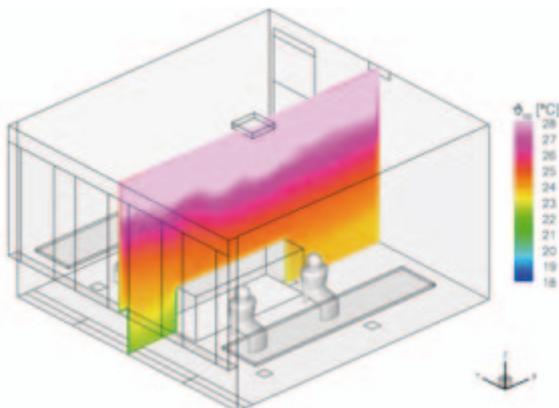


Abbildung 4.20.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

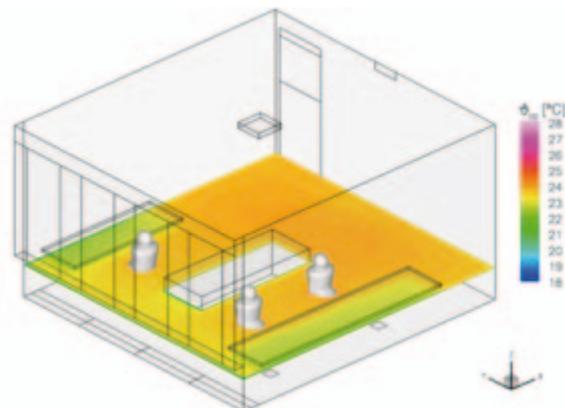


Abbildung 4.20.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6$  m

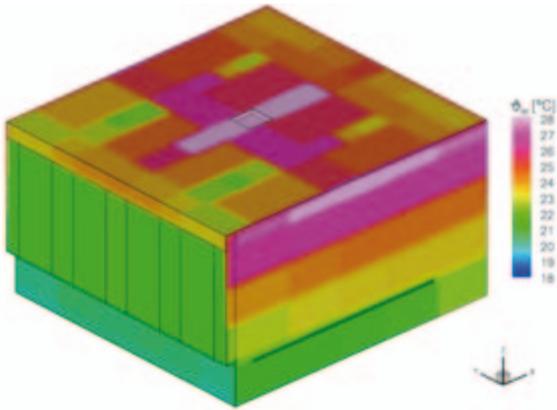


Abbildung 4.20.11: Wandtemperaturen mit Decke

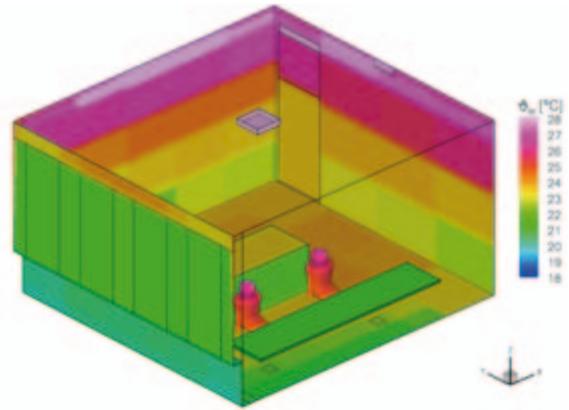


Abbildung 4.20.12: Wandtemperaturen mit Boden

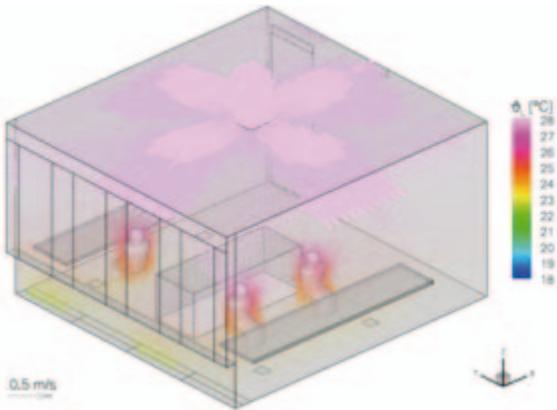


Abbildung 4.20.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

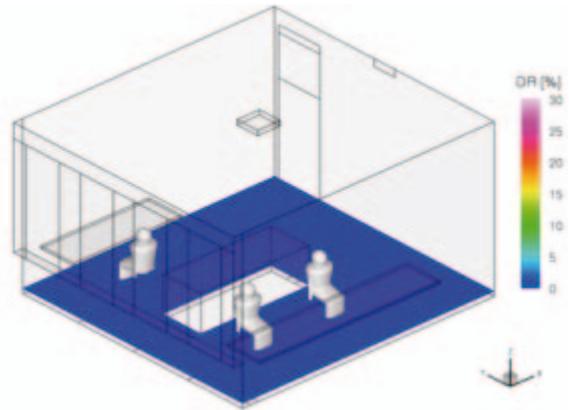


Abbildung 4.20.14: Zugluftisiko im Bodenbereich (0,1 m)

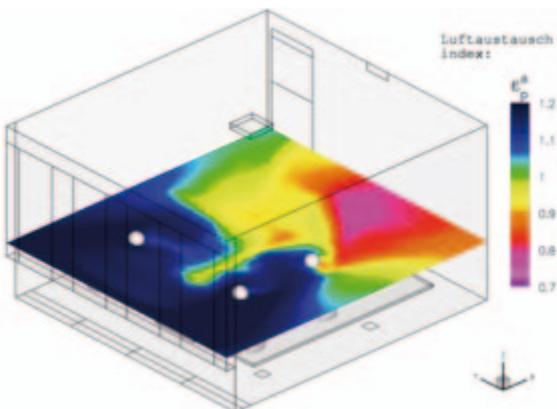


Abbildung 4.20.15: Luftaustauschindex  $z = 1,1$  m, Deckenfancoil nicht in Betrieb, 10 Uhr

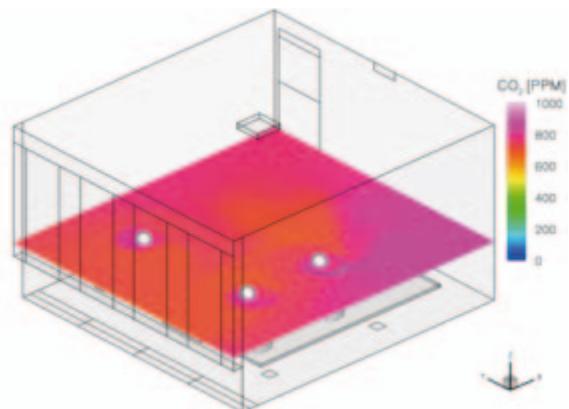


Abbildung 4.20.16 CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm,  $z = 1,1$  m, Deckenfancoil nicht in Betrieb, 10 Uhr

### 4.20.3. Fazit

Im Heizbetrieb führt die hier untersuchte Konstellation aufgrund der starken Temperaturschichtung und des Kurzschlusseffekts im Deckenbereich zu deutlichen Beeinträchtigungen des Luftaustauschs. Diese ist jedoch von untergeordneter Bedeutung, da eine Beheizung aufgrund der inneren Lasten während der Nutzungszeit nicht stattfindet.

Aus Sicht auftretender Zugbelastungen und der thermischen Behaglichkeit ergeben sich keine nennenswerten Einschränkungen.

## 4.21. Variante L3 Sommer – Deckeneinbaugerät mit Drallauslässen

### 4.21.1. Randbedingungen der Simulation

- Abgehängte Decke, Zuluft und Absaugung in Decke
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau

#### Kühlung

- Deckeneinbaugerät
- Gerät oberhalb der Zwischendecke, Betrieb mit Primärluftanteil, Zuluft an den 4 spezifizierten Drallauslässen PL1, Abluftansaugung über entsprechende Gitter in der Decke (Abstand 0.45/1.1 m von den Seitenflächen).
- Geräteabmessungen: Drallauslässe Trox VDW 300 x 8 Durchmesser 0.3 m, Positionen, x = 1.4/3.8 m, y = 1.2/4.1 m
- Kühlleistung max. 5.4 KW, Volumenstromregelung, Untertemperatur der Zuluft: 16 K bei höchster Stufe, absolut jedoch nicht unter 14 °C (Zuluftvolumenstrom min 535 m<sup>3</sup>/h, max 970 m<sup>3</sup>/h)

#### Regelung:

- Regelung mittels Zweipunktregler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt. Anlage läuft auf erster Stufe, Volumenstrom: 535 m<sup>3</sup>/h, Regelung dieser Stufe mittels Zweipunktregler: Einschaltpunkt 26 °C, Ausschaltpunkt 24 °C
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ °C}$

#### Lüftung:

- konstanter Volumenstrom von 105m<sup>3</sup>/h als Primärluftanteil über die Drallauslässe in der Decke
- Zulufttemperatur isotherm

### 4.21.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Im Zeitverlauf der Anlagenparameter, Abbildungen 4.21.01-04 zeigt sich, dass diese Anlagenkonstellation schon in der ersten Leistungsstufe in der Lage ist, die geforderte Raumtemperatur sicherzustellen. Aufgrund der hohen Volumenströme kommt es zu einem Takten der Anlage.

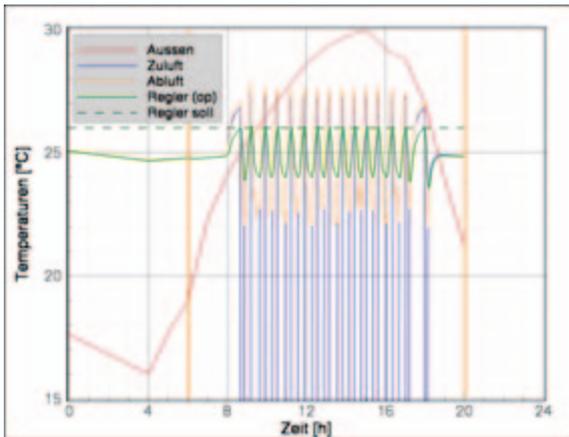


Abbildung 4.21.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

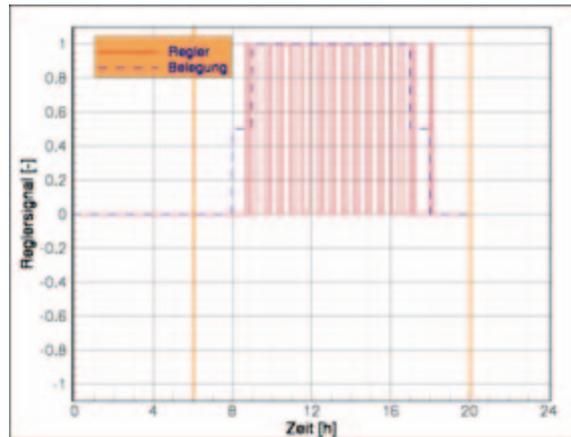


Abbildung 4.21.02: Reglersignal und Belegung

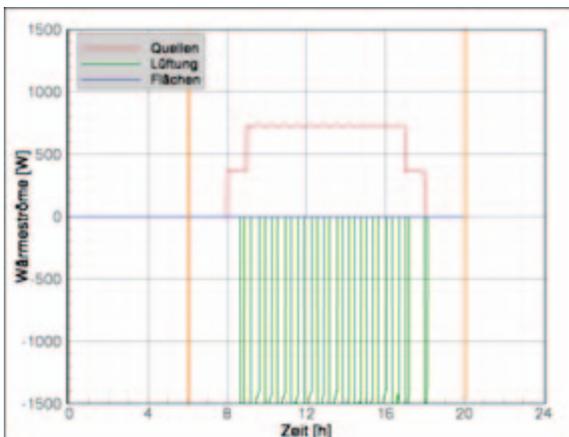


Abbildung 4.21.03: Wärmeströme - Input

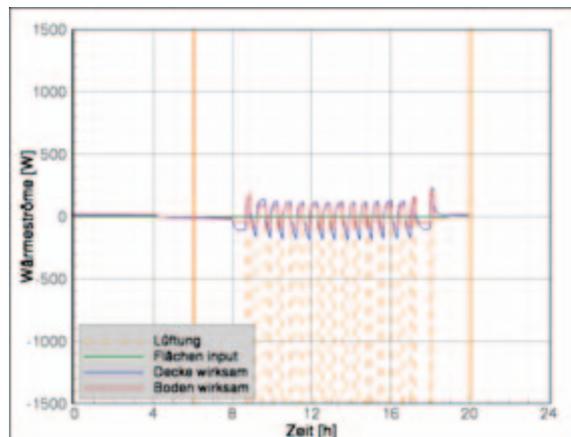


Abbildung 4.21.04: Wärmeströme raumwirksam

## Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.21.05-4.21.14 zeigen die Resultate der Simulation um 16 Uhr, also zu einem Zeitpunkt, an dem die Drallauslässe in Betrieb sind.

Anhand der Darstellungen erkennt man sehr gut die durch die Drallauslässe hervorgerufene, sehr gute Durchmischung der Raumluft, wodurch sich im Aufenthaltsbereich ein Luftaustauschindex nahe 1, also nahezu ideale Durchmischung ergibt.

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit gibt es wenig Einschränkungen. Lediglich die Zugbelastung im Knöchelbereich ist aufgrund der (bedingt durch die Interaktion der Drallauslässe und die niedrige Zulufttemperatur) auftretenden Fallströmungen an den Wänden an einigen Stellen deutlich zu hoch.

Im Falle reiner Primärlüftung treten derartige Probleme nicht auf, die Effektivität des Luftaustauschs sinkt jedoch infolge der dann auftretenden Kurzschlusseffekte im Deckenbereich deutlich, siehe Abb. 4.21.15 und 4.21.16.

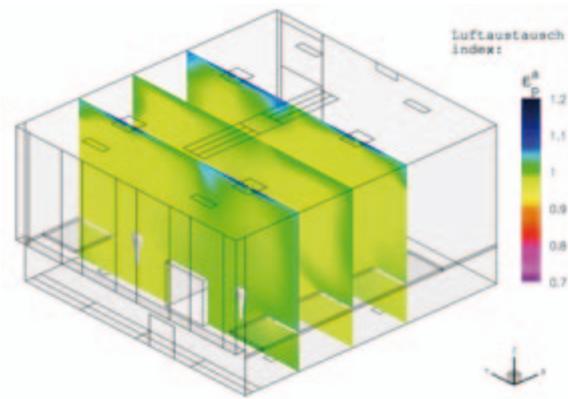


Abbildung 4.21.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitte

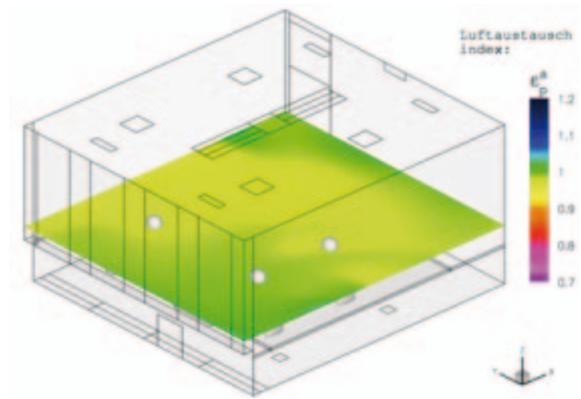


Abbildung 4.21.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1$  m

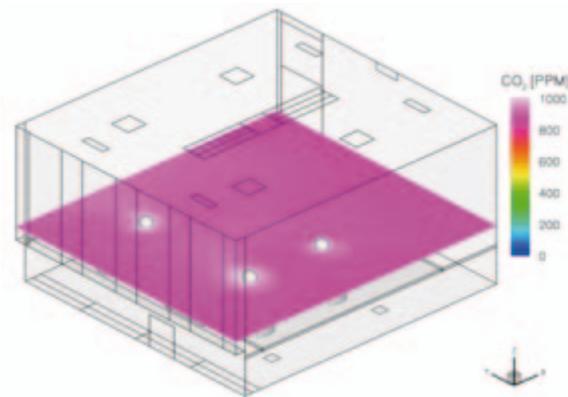


Abbildung 4.21.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm –  $z = 1,1$  m

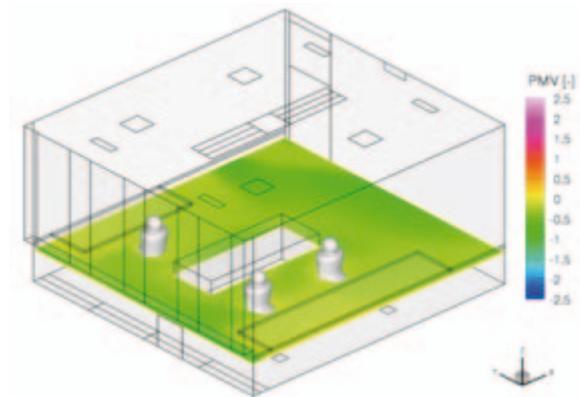


Abbildung 4.21.08: PMV-Index bei  $z = 0,6$  m

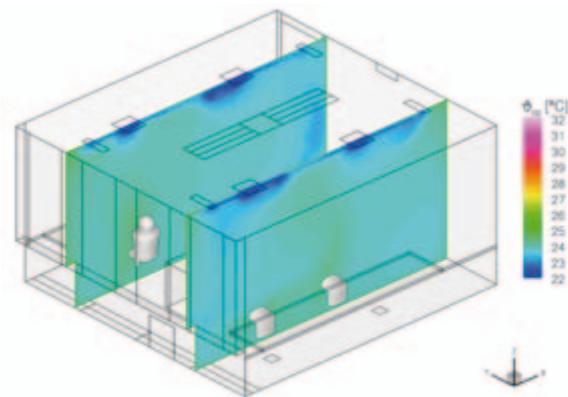


Abbildung 4.21.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

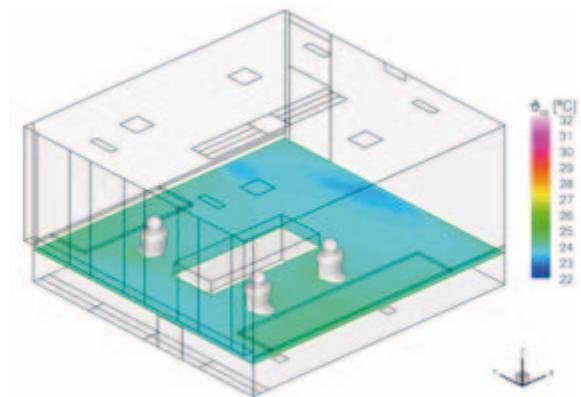


Abbildung 4.21.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6$  m

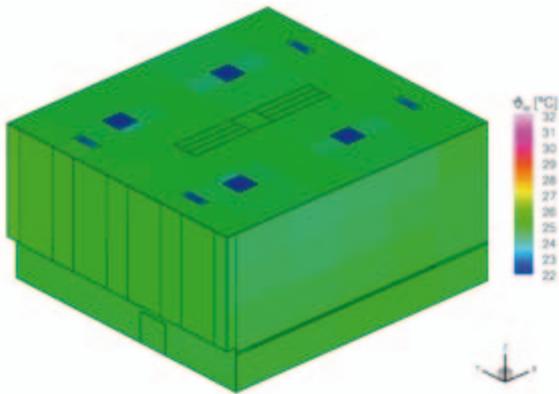


Abbildung 4.21.11: Wandtemperaturen mit Decke

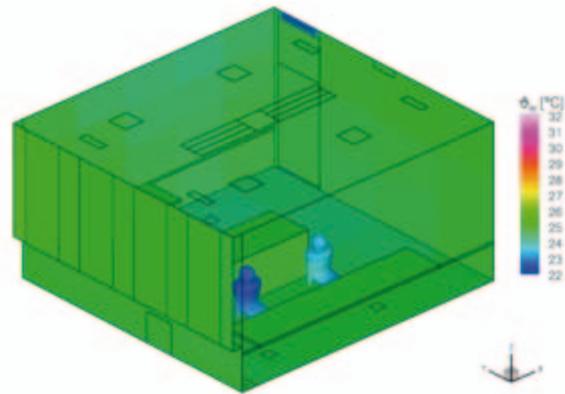


Abbildung 4.21.12: Wandtemperaturen mit Boden

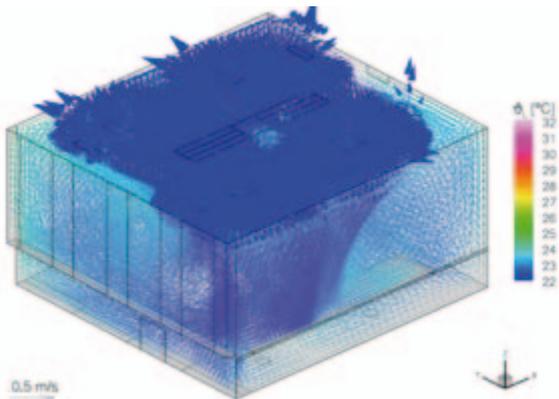


Abbildung 4.21.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

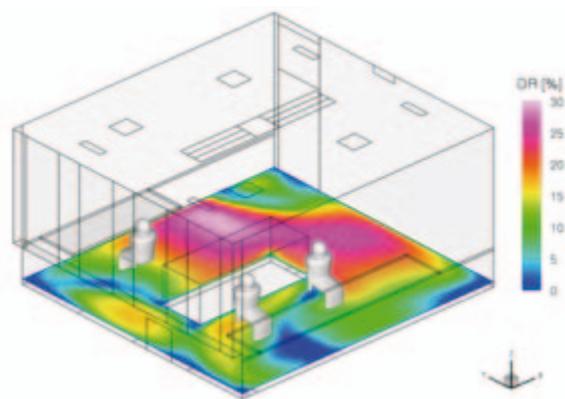


Abbildung 4.21.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

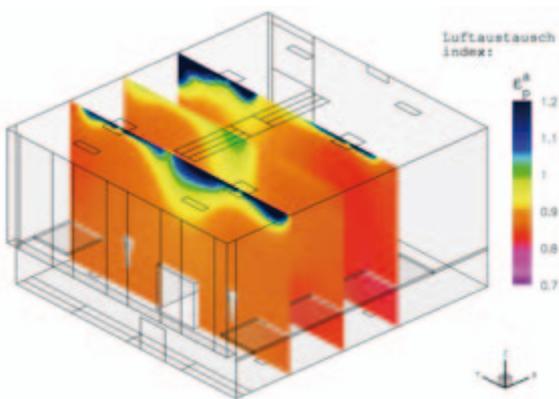


Abbildung 4.21.15: Luftaustauschindex, Vertikalschnitte nur Grundlüftung, 9 Uhr

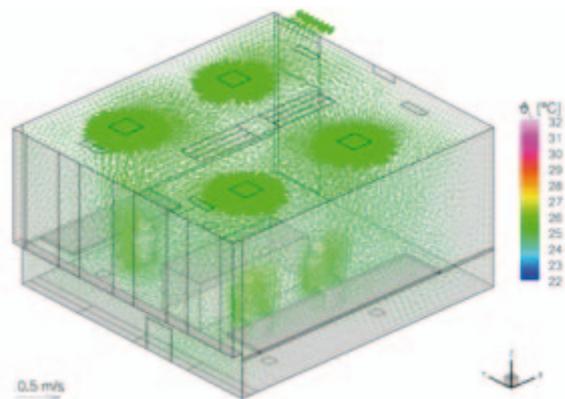


Abbildung 4.21.16: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt nur Grundlüftung, 9 Uhr

### 4.21.3. Fazit

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit sowie des Luftaustauschs ist diese Variante zunächst als akzeptabel zu beurteilen. Einige Fragen wirft allerdings das ausgewiesene Zugluftrisiko im Knöchelbereich auf. Auch wenn das Maximum des Zugluftrisikos zum ausgewerteten Zeitpunkt nicht unmittelbar den Bereich der sitzenden Personen betrifft, so ist diese potentielle Einschränkung der thermischen

Behaglichkeit als problematisch für diese Anlagenkonstellation zu betrachten. Ausgelöst wird das Phänomen durch das Zusammenwirken der Auftriebsströmung über den Personen und dem Absinken der kalten Zuluft aus den Drallauslässen im Deckenbereich.

## 4.22. Variante FL1 Sommer – Induktionskühlgerät (Kühlbalken)

### 4.22.1. Randbedingungen der Simulation

- Abgehängte Decke, Induktionskühlgerät integriert
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau

#### Kühlung

- Deckeneinbaugerät
- Gerät oberhalb der Zwischendecke, Betrieb mit Primärluft und durch Induktion
- Geräteabmessungen: 0.3 x 3.0 m, mittig, senkrecht zur Fensterfront Ausblasen an den Seiten, Ansaugen in der Mitte zwischen den Ausblassechlitzen
- Induktionsverhältnis: 3 (Zuluftvolumenstrom primär 105 m<sup>3</sup>/h, gesamt mit Induktion: 420 m<sup>3</sup>/h)
- Kühlleistung max. 1,135 kW, Temperatur der Primärluft: 16 °C, somit ergibt sich Zulufttemp. = (16 °C + 3 \* Ansaugtemperatur)/4 ohne Kühlung der angesaugten Luft bzw. Zulufttemp. = Ansaugtemperatur - 8K bei Kühlung der angesaugten Luft und somit voller Leistungsabgabe.

#### Regelung:

- Regelung mittels Zweipunktregler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt. Regelung der Kühlung der angesaugten Luft mittels Zweipunktregler: Einschaltpunkt 26 °C, Ausschaltpunkt 25 °C
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ °C}$

#### Lüftung:

- über Primärluftanteil des Kühlbalkens.
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur siehe oben.

### 4.22.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Im Zeitverlauf der Anlagenparameter, Abbildungen 4.21.01-04 erkennt man deutlich, dass diese Anlagenkonstellation in der Lage ist, die geforderte Raumtemperatur sicherzustellen. Da hier die Kühlleistung insgesamt geringer ist, als in den zuvor betrachteten Kühlgeräten, ist die Taktrate des Gerätes trotz des auf 25 °C nach oben korrigierten Ausschaltpunktes niedriger.

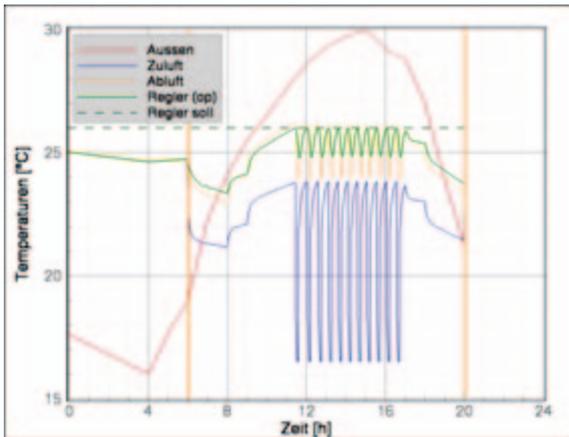


Abbildung 4.22.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

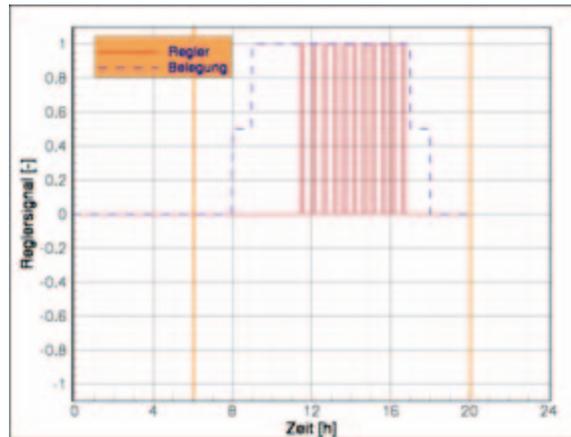


Abbildung 4.22.02: Reglersignal und Belegung

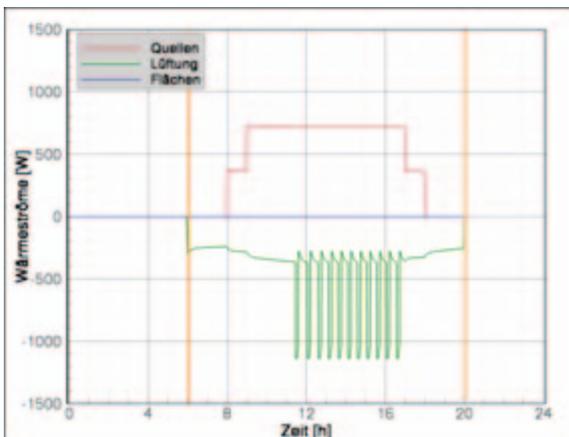


Abbildung 4.22.03: Wärmeströme - Input

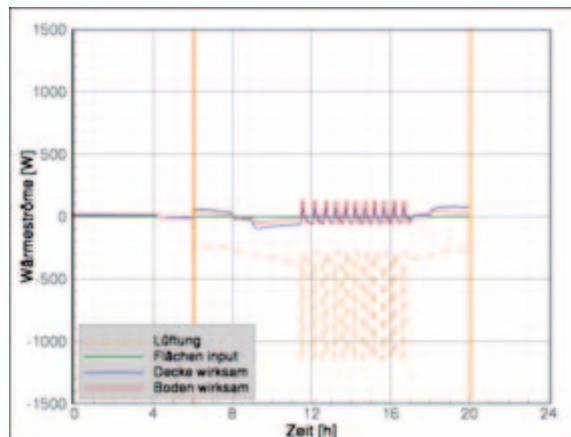


Abbildung 4.22.04: Wärmeströme raumwirksam

### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.22.05-4.22.14 zeigen die Resultate der Simulation im Kühlbetrieb, hier beispielhaft um 10 Uhr.

Man erkennt anhand der Darstellungen sehr deutlich, dass der installierte Kühlbalken sowohl aus Sicht des Luftaustauschs, als auch aus Sicht der thermischen Behaglichkeit sehr günstige Verhältnisse sicherstellt.

Die gekühlte Luft bewegt sich dank des relativ großen Eintrittsimpulses an der Decke entlang und fällt erst in der Nähe der Wände in den Aufenthaltsbereich ab. Dort führt die abfallende Kaltluft jedoch zu leichten Zugscheinungen im Knöchelbereich.

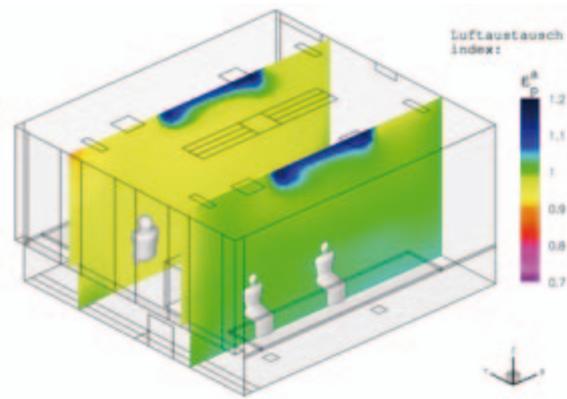


Abbildung 4.22.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

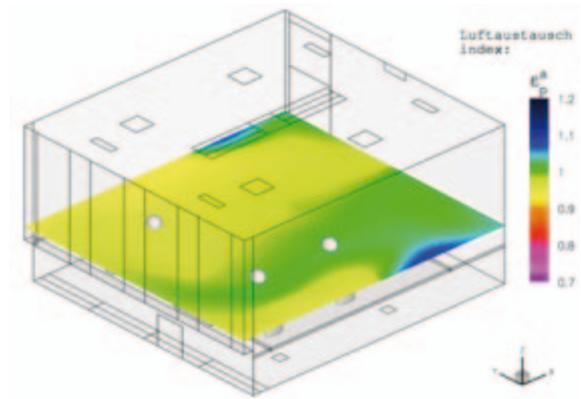


Abbildung 4.22.06: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1$  m

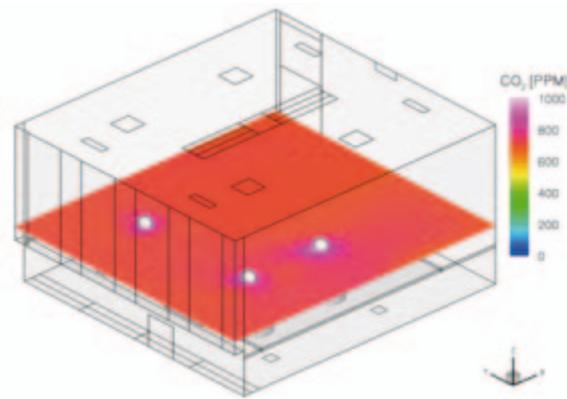


Abbildung 4.22.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm –  $z = 1,1$  m

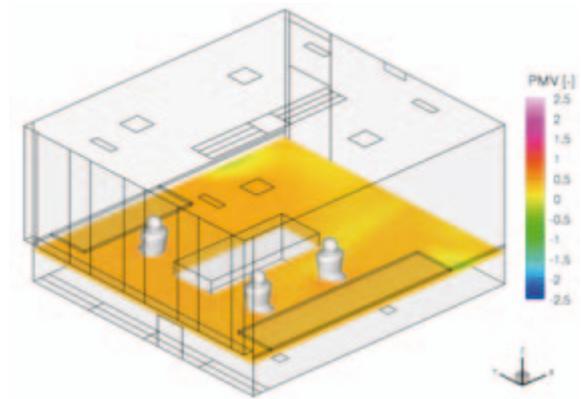


Abbildung 4.22.08: PMV-Index bei  $z = 0,6$  m

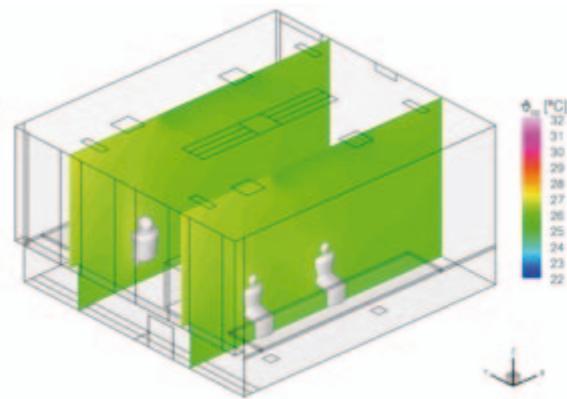


Abbildung 4.22.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt

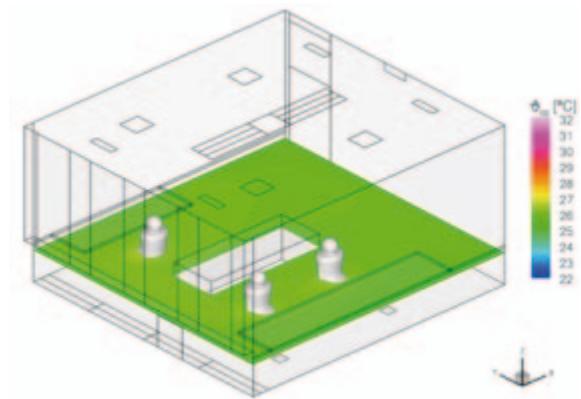


Abbildung 4.22.10: Operative Temperatur bei  $z = 0,6$  m

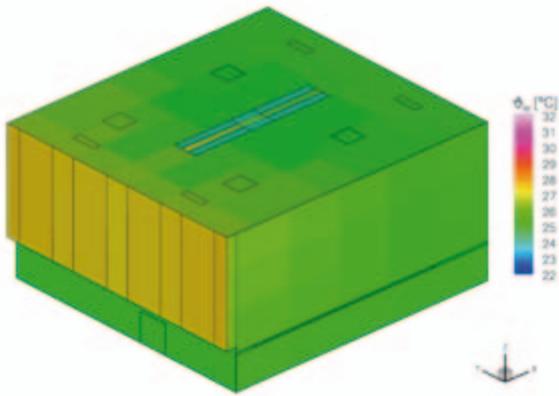


Abbildung 4.22.11: Wandtemperaturen mit Decke

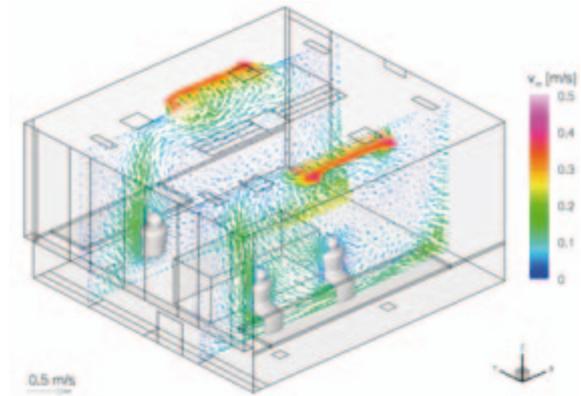


Abbildung 4.22.12: Strömungsfeld - Vertikalschnitte

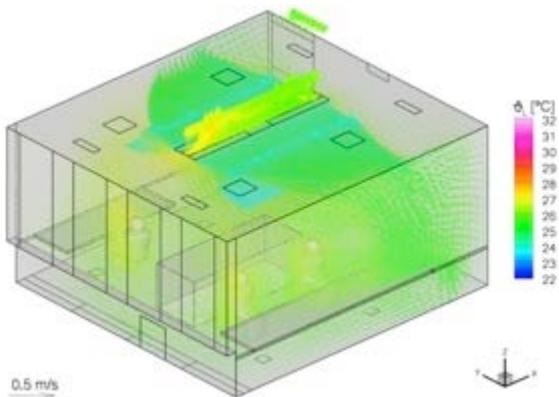


Abbildung 4.22.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

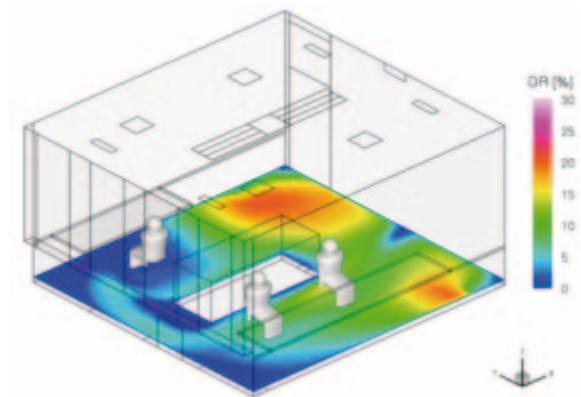


Abbildung 4.22.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.22.3. Fazit

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit sowie des Luftaustauschs ist diese Variante als sehr günstig und effektiv einzustufen. Es treten lediglich im Kühlbetrieb leichte Zugscheinungen in der Nähe der Wände auf.

## 4.23. Variante FL1 Winter – Induktionsheizgerät (Heizbalken)

### 4.23.1. Randbedingungen der Simulation

- Abgehängte Decke, Induktionsheizgerät integriert
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau

#### Kühlung

- Deckeneinbaugerät
- Gerät oberhalb der Zwischendecke, Betrieb mit Primärluft und durch Induktion
- Geräteabmessungen: 0,3 x 3.0 m, mittig, senkrecht zur Fensterfront Ausblasen an den Seiten, Ansaugen in der Mitte zwischen den Ausblassechlitzen
- Induktionsverhältnis: 3 (Zuluftvolumenstrom primär 105 m<sup>3</sup>/h, gesamt mit Induktion: 420 m<sup>3</sup>/h)
- Heizleistung max. 1,428 kW, Temperatur der Primärluft = Raumtemperatur, somit ergibt sich Zulufttemp. = Raumtemperatur ohne Beheizung der angesaugten Luft bzw. Zulufttemp. = Ansaugtemperatur + 10 K bei Beheizung der angesaugten Luft und somit voller Leistungsabgabe.

#### Regelung:

- Regelung mittels Zweipunktregler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt. Regelung der Heizung der angesaugten Luft mittels Zweipunktregler: Einschaltpunkt 22 °C, Ausschaltpunkt 23 °C
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt

Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 22 \text{ °C}$

#### Lüftung:

- über Primärluftanteil des Heizbalkens
- konstanter Volumenstrom von 105 m<sup>3</sup>/h
- Zulufttemperatur siehe oben

### 4.23.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Im Zeitverlauf der Anlagenparameter (Abb. 4.23.01-4.23.04) ist deutlich erkennbar, dass eine Beheizung des Raumes lediglich außerhalb der Nutzungszeit erfolgen muss. Während der Nutzung führen die inneren

Lasten in Verbindung mit der aufgeheizten Umfassungsstruktur zu einer deutlichen Überhitzung des Raumes.

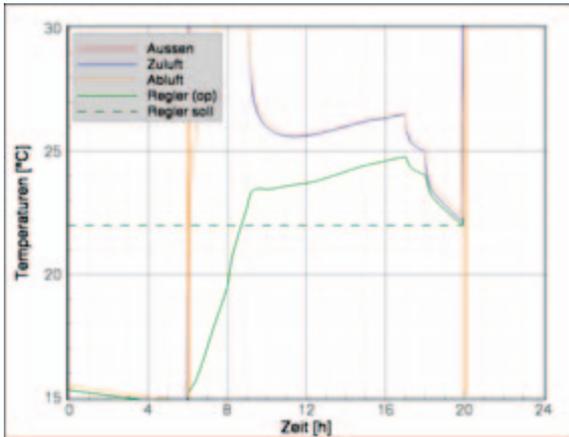


Abbildung 4.23.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

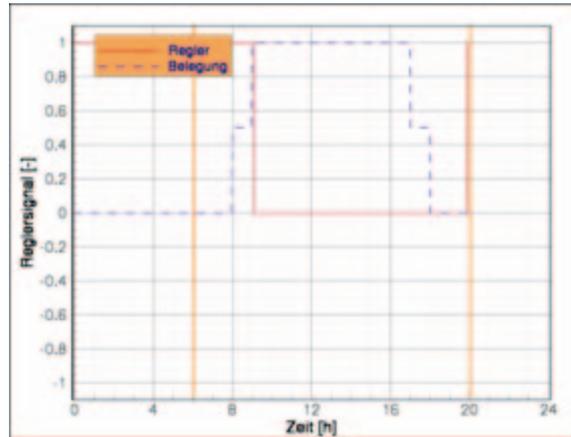


Abbildung 4.23.02: Reglersignal und Belegung

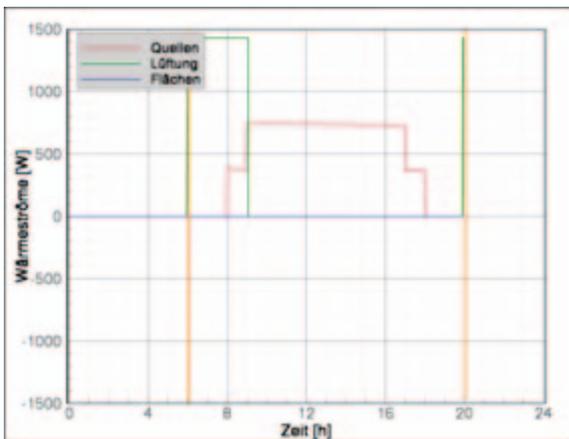


Abbildung 4.23.03: Wärmeströme - Input

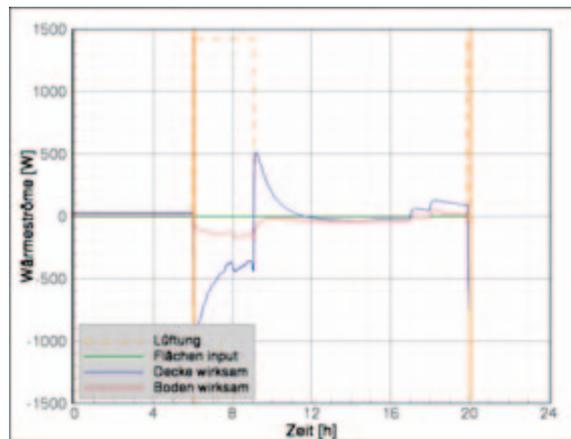


Abbildung 4.23.04: Wärmeströme raumwirksam

## Ausgewählte Zeitpunkte

Da der Kühl- bzw. Heizbalken fast über den gesamten Zeitraum der Nutzung im isothermen Lüftungsbetrieb arbeitet, zeigen die Abbildungen 4.23.07-4.23.16 auch die entsprechenden Resultate der Simulation, hier konkret für 10 Uhr. Lediglich in den Abbildungen 4.23.05 und 4.23.06 wurden Darstellungen des lokalen Luftaustauschindex und der Oberflächentemperaturen für den Heizbetrieb, also 9 Uhr hinzugenommen.

Anhand dieser zwei Darstellungen erkennt man die auch schon in Variante 20 (Lüftungsgitter und Deckenfancoil) festgestellten Probleme des Heizbetriebs. Es bildet sich eine sehr starke Temperaturschichtung aus, und es kommt zu einer im Deckenbereich begrenzten Kurzschlussströmung, was sich sehr ungünstig auf den Luftaustausch im Aufenthaltsbereich auswirkt.

Im Primärluftbetrieb (Abb. 4.23.07-4.23.16) treten derartige Effekte jedoch nicht mehr auf. Der Kühl- bzw. Heizbalken sorgt für eine gute Versorgung des Aufenthalts mit Frischluft und für relativ ausgewogene

thermische Verhältnisse im Raum. Anhand der Darstellungen 4.23.07 und 4.23.08 kann man sehr gut den Abfall der Zuluft an den Seitenwänden erkennen.

Aus thermischer Sicht ist die Variante als etwas zu warm einzustufen, Einschränkungen bezüglich Zugbelastung oder der Effektivität des Luftaustauschs gibt es keine.

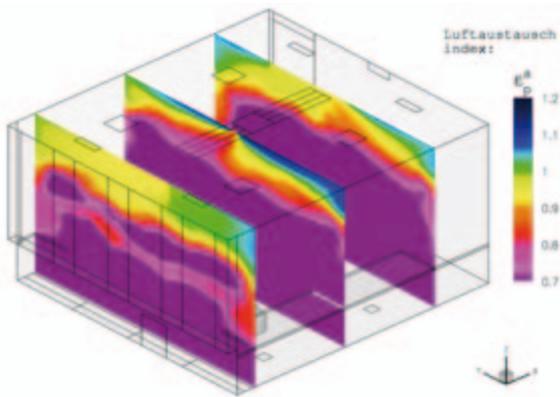


Abbildung 4.23.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt, Heizfall, 9 Uhr

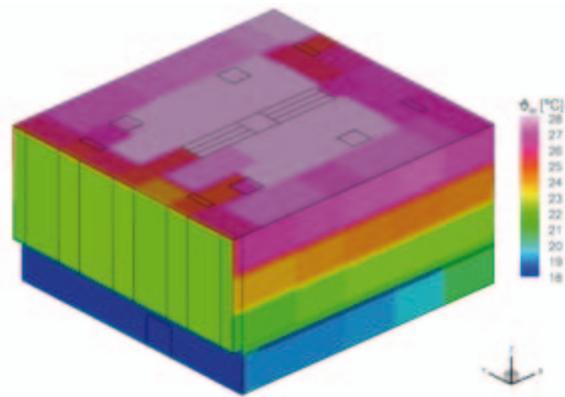


Abbildung 4.23.06: Wandtemperaturen mit Decke, Heizfall, 9 Uhr

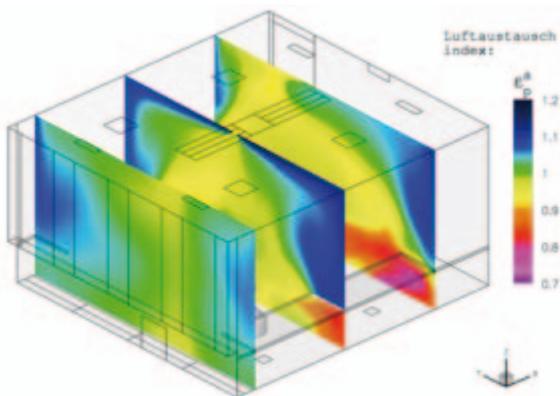


Abbildung 4.23.07: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt

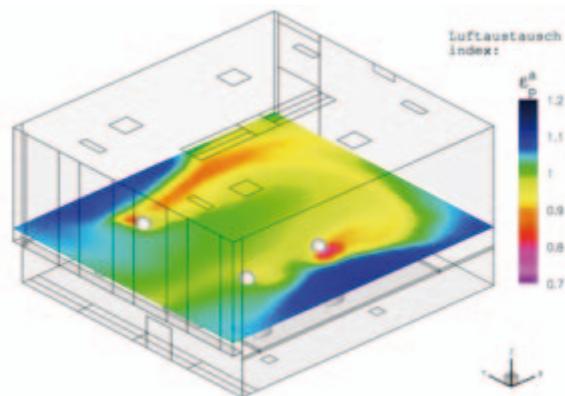


Abbildung 4.23.08: Luftaustauschindex bei  $z = 1,1$  m

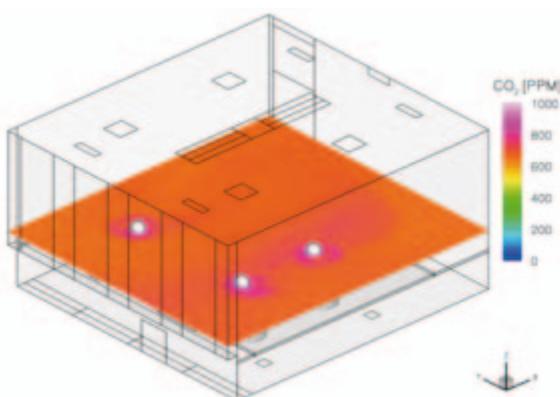


Abbildung 4.23.09: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm –  $z = 1,1$  m

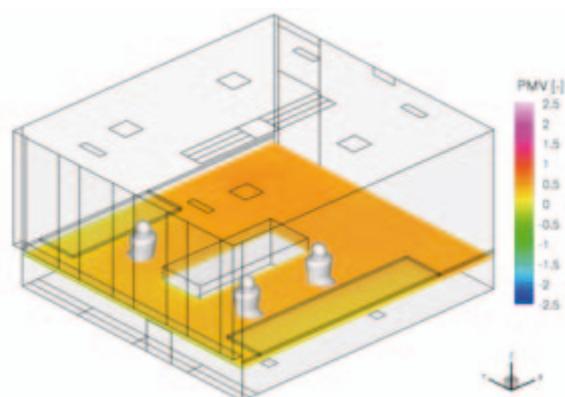


Abbildung 4.23.10: PMV-Index bei  $z = 0,6$  m

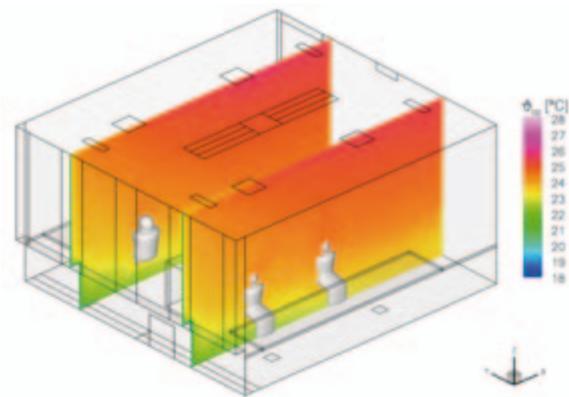


Abbildung 4.23.11: Operative Temperatur Vertikalschnitt

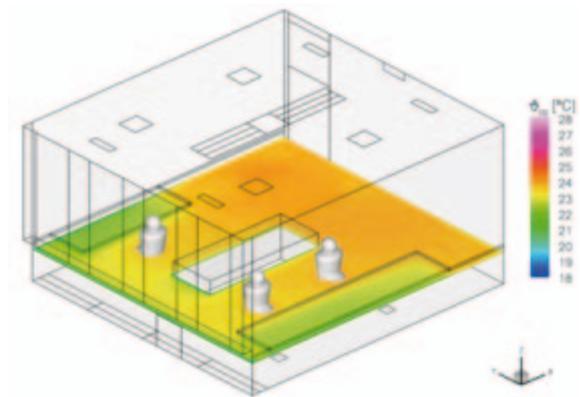


Abbildung 4.23.12: Operative Temperatur bei  $z = 0,6 \text{ m}$

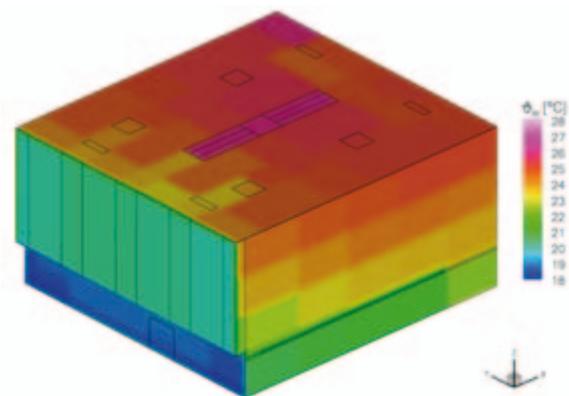


Abbildung 4.23.13: Wandtemperaturen mit Decke

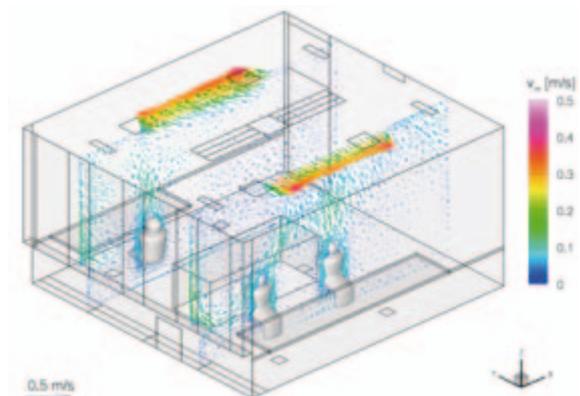


Abbildung 4.23.14: Strömungsfeld, Vertikalschnitte

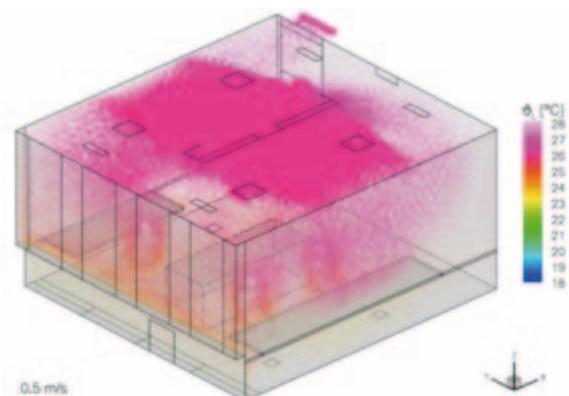


Abbildung 4.23.15: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt

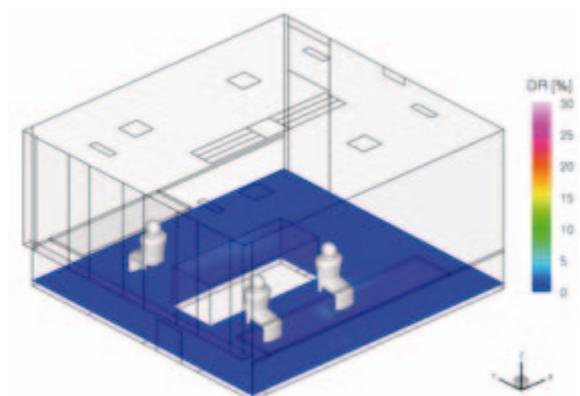


Abbildung 4.23.16: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.23.3. Fazit

Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit sowie des Luftaustauschs ist der Kühlbalken im Primärluftbetrieb sehr gut geeignet, ein ausgewogenes Raumklima zu garantieren. Im Heizbetrieb kommt es aufgrund der Positionen des Heizbalkens und der Abluftöffnung zu sehr großen Temperaturgradienten im Raum und zu lokalen Effekten wie Kurzschlussströmungen im Deckenbereich.

## 4.24. Variante PL4 F3 Sommer – Kühlsegel mit Quellluftauslass

### 4.24.1. Randbedingungen der Simulation

- Keine abgehängte Decke
- Boden als Hohlraumboden, Decke analoger Aufbau
- Kühlsegel realisiert über thermoaktive Schicht innerhalb des Segels
- Kühlleistung: maximal  $150 \text{ W/m}^2$
- Verlegedichte 50 %, mittig im Raum, Abmessungen:  $3.4 \times 4 \text{ m}$  (X x Y), Höhe bei 3.0 m

Regelung/Kühlsegel:

- Regelung des Kühlsegels mittels PI-Regler nach operativer Temperatur im Sensorpunkt
- Position des Sensors in 0.6 m Höhe mittig zwischen den 2 nebeneinander sitzenden Personen, somit ist Nutzereinfluss auf die Regelung berücksichtigt, Solltemperatur am Sensor:  $\vartheta_{op} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$

Lüftung:

- Quellluftauslass entsprechend Vorgabe IBO unterhalb der Fensterfassade
- konstanter Volumenstrom von  $105 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- Zulufttemperatur 4 K unterhalb der Sensortemperatur, gleitend.

Start der Anlagen um 06:00 Uhr, Ende um 20:00 Uhr

### 4.24.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen stehen sowohl als zeitliche Verläufe integraler Größen als auch als Felddarstellungen lokaler Größen an ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung.

#### Zeitverlauf

Aufgrund der hohen Wärmedämmung des Gebäudes und aufgrund der permanenten Versorgung des Raumes mit Frischluft kommt es lediglich zwischen 11 und 14 Uhr zu einer leichten Überschreitung der Solltemperatur im Sensorpunkt und somit erst ab 11 Uhr zur Aktivierung der Kühldecke, siehe Abb. 4.24.01 und Abb. 4.24.02. Die Überschreitung der Solltemperatur fällt in dieser Variante trotz der in Abb. 4.24.03 sichtbaren hohen inneren Lasten mit 0,2 K zwischen 11 und 14 Uhr sehr moderat aus. Das Kühlsegel ist sehr effizient in der Lage, die eingebrachte Kühlleistung dem Raum zuzuführen, siehe Abb. 4.24.04. Hier wurden die an der Oberfläche vom Kühlsegel und Boden raumwirksamen Wärmeströme dargestellt. „Decke wirksam“ ist dabei die raumseitig wirksame Kühlleistung des Segels (Konvektion und Strahlung über alle Teilflächen des Segels aufsummiert).

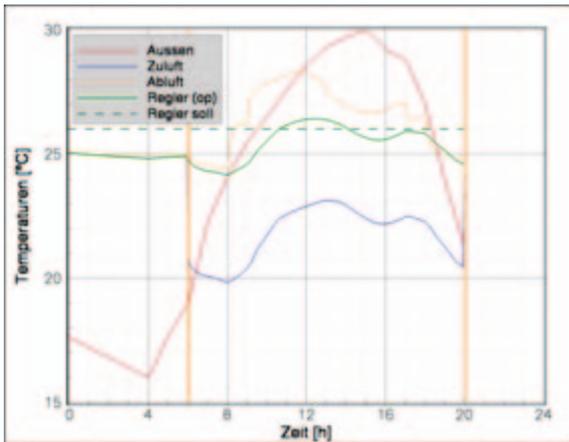


Abbildung 4.24.01: Temperaturverläufe am Kopplungstag

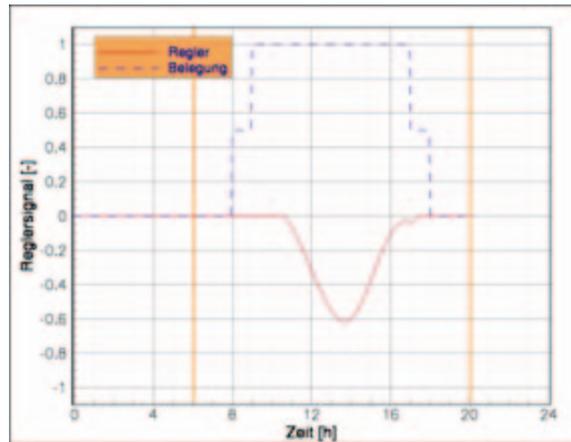


Abbildung 4.24.02: Reglersignal und Belegung

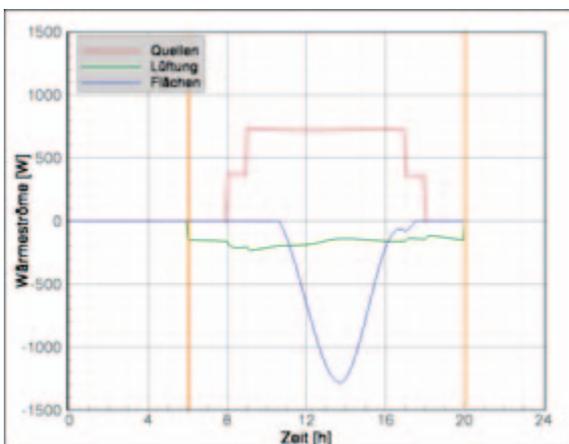


Abbildung 4.24.03: Wärmeströme – Input

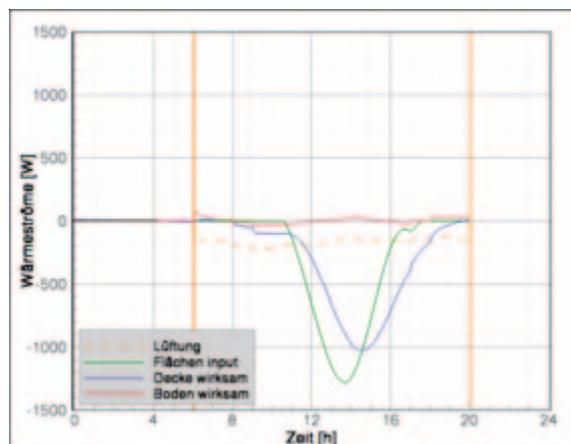


Abbildung 4.24.04: Wärmeströme raumwirksam

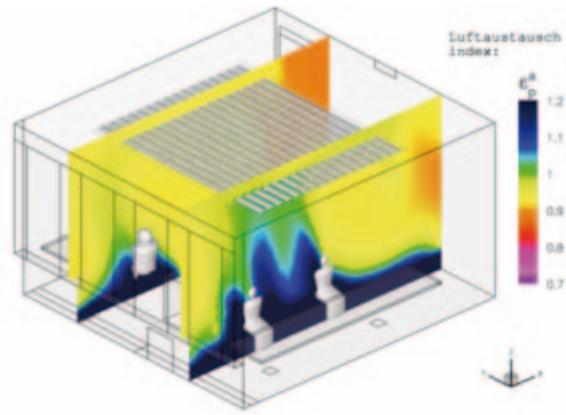
### Ausgewählte Zeitpunkte

Die Abbildungen 4.24.05-4.24.14 zeigen die Resultate der Simulation um 14 Uhr, also zum Zeitpunkt höchster Kühlleistung des Kühlsegels.

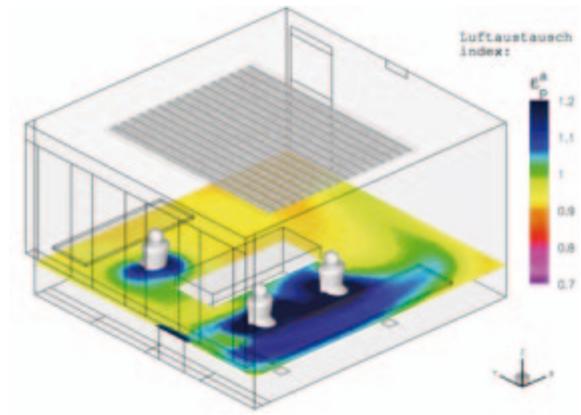
Die Abbildungen zeigen insgesamt ein sehr ausgewogenes Klima im untersuchten Büroraum zu diesem Zeitpunkt. Aufgrund der Quelllüftung, verbunden mit der Luftabsaugung oberhalb der Tür, kommt es zu einer hervorragenden Versorgung des Aufenthaltsbereichs mit Frischluft, was sich sowohl in hohen Werten des lokalen Luftaustauschindex als auch in niedrigen Werten der CO<sub>2</sub>-Verteilung widerspiegelt.

Die operativen Temperaturen liegen in weiten Bereichen des Raumes sehr nahe bei den anvisierten 26 °C. Hierbei wird die höhere Lufttemperatur im Deckenbereich durch eine deutlich niedrigere Strahlungstemperatur (Kühlsegel) ausgeglichen.

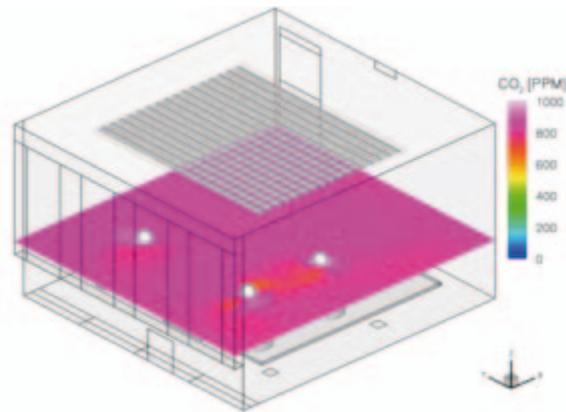
Im Aufenthaltsbereich treten lediglich in der Nähe des Quellluftauslasses und in Wandnähe (aufgrund abfallender Kaltluft) geringe Zugbelastungen auf, im Raum insgesamt stellt sich ein ruhiges und aus Sicht der thermischen Behaglichkeit sehr gutes Strömungsfeld ein.



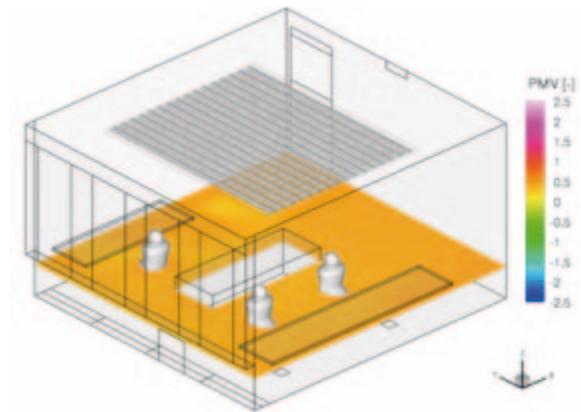
4.24.05: Luftaustauschindex - Vertikalschnitt



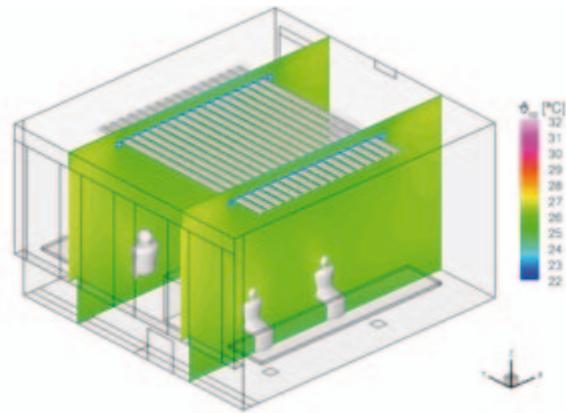
4.24.06: Luftaustauschindex bei z = 1,1 m



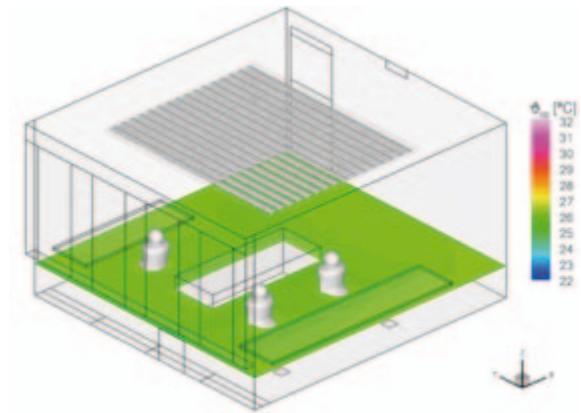
4.24.07: CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm – z = 1,1 m



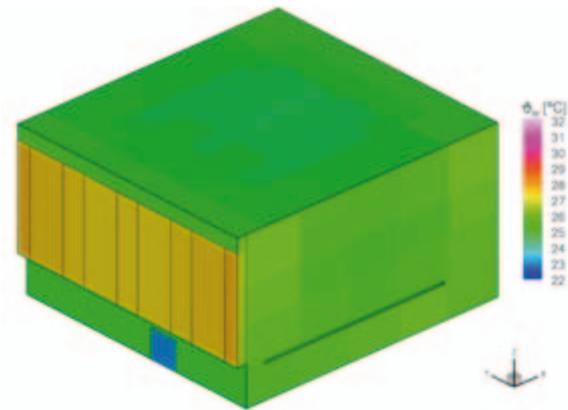
4.24.08: PMV-Index bei z = 0,6 m



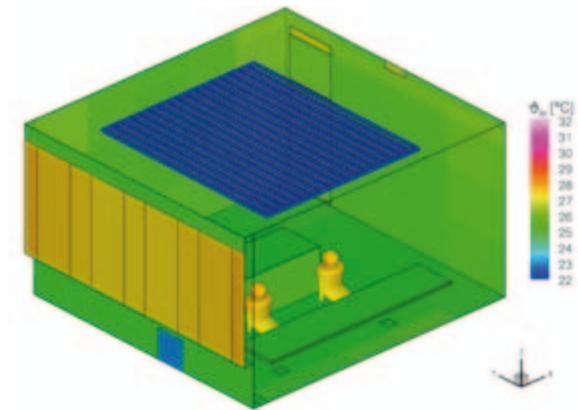
4.24.09: Operative Temperatur Vertikalschnitt



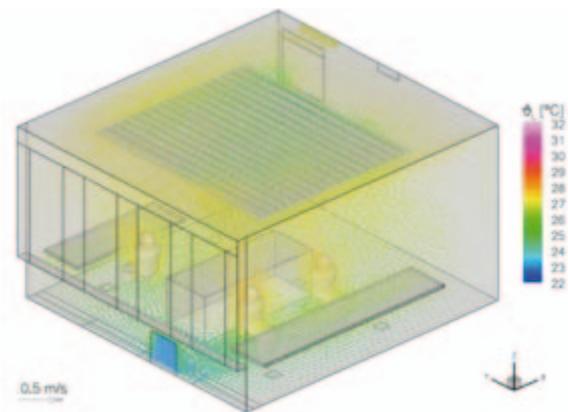
4.24.10: Operative Temperatur bei z = 0,6 m



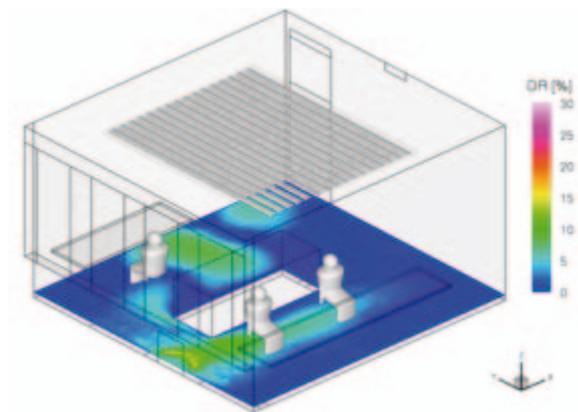
4.24.11: Wandtemperaturen mit Decke



4.24.12: Wandtemperaturen mit Boden



4.24.13: Strömungsfeld in Temperatur gefärbt



4.24.14: Zugluftrisiko im Bodenbereich (0,1 m)

### 4.24.3. Fazit

Diese Anlagenvariante ist für sommerliche Verhältnisse als sehr günstig anzusehen. Die Solltemperatur von 26 °C wird nur unwesentlich überschritten, und es herrscht ein sehr homogenes und behagliches Raumklima. Hierbei ist jedoch nochmals anzumerken, dass die 26 °C im PMV-Index schon als etwas zu warm eingestuft werden.

## 4.25 Einzelauswertung Kohlenstoffdioxidgehalte der Innenraumluft

### 4.25.1 Einleitung

Die Kohlenstoffdioxid-Gehalte der Innenaumlufte sind ein Gradmesser für die Belastung der Luft. Die vorstehende Auswertung bewertet also die Funktionsfähigkeit verschiedener Lüftungskonzepte unter standardisierten Bedingungen.

Zwei Typen lassen sich in unseren Ergebnissen unterscheiden, die den Lüftungskonzepten der Verdrängungslüftung und der Verdünnungslüftung (=Mischlüftung) entsprechen. Auch die Dysfunktion der Kurzschlussströmung kommt vor.

Herangezogen werden horizontale Schnitte in 110 cm Höhe sowie vertikale Schnitte, die die Köpfe der Personen im Raum berühren. Fallweise werden andere Schnitte verwendet, die Qualitätsklassen der Innraumluft zeigen. Außenluft hat einen Kohlenstoffdioxidgehalt von 385 ppm. Für die Simulationen wurden 300 ppm für die Zuluft angenommen. Die beste Qualitätsklasse für Innenraumluft RAL 1<sup>20</sup> fordert CO<sub>2</sub>-Konzentration < 800 ppm. RAL 2 reicht bis 1000 ppm, dem Pettenkofer-Wert.

### 4.25.2 Verdrängungslüftung

Beispiele für Verdrängungslüftung sind alle Varianten mit Quelllüftung oder Drallauslassdüsen im Boden. Das sind die Varianten 1, 2, 3, 6, 7, 13, 14, 17 – mit interessanten Ausnahmen oder Einschränkungen: Varianten 14, 18, 24, die weiter unten besprochen werden.

Bei diesen Varianten entsteht durch die Zufuhr kühler Luft in Bodennähe ein Frischluftsee, der an warmen Geräten und vor allem an Menschen konvektiv aufsteigt und die Personen mit Frischluft versorgt. Dies sieht man gut in den Vertikalschnitten der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Ebene der sitzenden Personen. In den Horizontalschnitten der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Höhe der Köpfe der sitzenden Personen (110 cm) zeigt sich in der unmittelbaren Umgebung der Köpfe der Personen eine *niedrigere* CO<sub>2</sub>-Konzentration, als in der weiteren Umgebung. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der unmittelbaren Umgebung der Köpfe bleibt den ganzen Tag über im Bereich des RAL- oder IDA-Qualitätsstufe 1, während die weitere Umgebung im Tagesverlauf bis 16 Uhr in die Qualitätsstufe 2 übergeht.

Die oben erwähnten Ausnahmen:

Variante 14 zeigt Drallauslässe im Boden mit Betonkernaktivierung der Decke im Winter. Die Fallströmung an der kühlen Fensterscheibe vermischt die Frischluft aus den Bodendüsen mit CO<sub>2</sub>-reicher Luft aus dem deckennahen Raumbereich. Die fensternahen Arbeitsplätze, besonders der türseitige, wo sich der Luftabzug befindet, sind am Nachmittag nicht mehr mit Luft der besten Qualitätsklasse versorgt. Auch bei den anderen Winterbeispielen (Varianten 3, 7) ist das, abgeschwächt, zu sehen. Noch verstärkt aber bei Variante 18 (Quelllüftung mit Fußbodenheizung). Dies ist das einzige Beispiel einer Quelllüftung, bei dem in der unmittelbaren Umgebung der Köpfe eine *höhere* CO<sub>2</sub>-Konzentration herrscht, als in der weiteren Umgebung. Auch hier ist die Fallströmung an der kühlen Fensterfläche als Ursache von bodennaher Luftmischung zu vermuten. Verstärkt wird der Effekt von der Fußbodenheizung, die eine instabile warme

---

<sup>20</sup> Gemäß der VDI 6022:2006. Die RAL Klassen 1-4 entsprechen den Qualitätsklassen IDA 1-4 der ÖNORM EN 13779

Luftschicht erzeugt. Diese steigt mit erhöhter Geschwindigkeit an den Personen auf und verstärkt so die Fallströmung an der Fensterscheibe.

Variante 24 mit Quelllüftung und einem Kühlsegel. Das Kühlsegel unterscheidet sich von anderen Kühldecken durch begrenzte Abmessungen: im Gegensatz zur den übrigen Kühldecken hat es nicht nur eine Unter-, sondern auch eine Oberseite und seitliche Kanten. Die flächenspezifische Kühlleistung ist doppelt bis viermal so hoch wie bei den anderen Kühldecken. Von dem Kühlsegel gleiten seitlich und hinten Kaltluftströmungen in den Raum hinab, während weiter innen thermischer Auftrieb an den Personen stattfindet. Diese höhere Dynamik ist vielleicht verantwortlich dafür, dass bei dieser Variante in der unmittelbaren Umgebung der Köpfe eine *höhere* CO<sub>2</sub>-Konzentration herrscht, während etwas Richtung Fenster verschoben, die typischen Inseln *geringere* CO<sub>2</sub>-Konzentration zu sehen sind, die für Verdrängungslüftung typisch zu sein scheinen.

### 4.25.3 Mischlüftung

Der zweite Typus ist den Mischlüftungsvarianten zuzuordnen. Dazu gehören die Varianten 4, 5, 8 bis 12, 15, 16, 19 bis 23. Bei diesen Varianten wird die Zuluft von der Fensterbrüstung (Var. 10, 11, 12), von der Decke aus (Var. 21, 22, 23) oder von einem Lüftungsgitter an der Rückwand des Raumes aus (Varianten 4, 5, 8, 9, 15, 16, 19, 20) eingeblasen.

Die Heizung oder Kühlung wird von Decken- oder Fußbodenflächen (Var. 4, 5, 15, 16), meist aber von Konvektoren eingebracht, die sich wiederum in der Fensterbrüstung (Var. 8, 9, 10, 11, 12) oder an der Decke (Var. 19, 20, 21, 22, 23) befinden.

Gemeinsames Merkmal bei dieser Vielfalt an Konfigurationen: hier sind die Umgebungen der Köpfe Inseln *höherer* CO<sub>2</sub>-Konzentration, die aus der Atmung der Personen resultiert. Schon morgens (10 Uhr) kann der unmittelbaren Umgebung der Köpfe nur die IDA-Qualitätsklasse 2 zugeordnet werden. Bis nachmittags weiten sich diese Inseln erhöhter CO-Konzentrationen auf große Teile des Raumes aus. Manchmal wird nachmittags die Grenze zur Klasse 3 überschritten (Var. 10, 11, 18, 19).

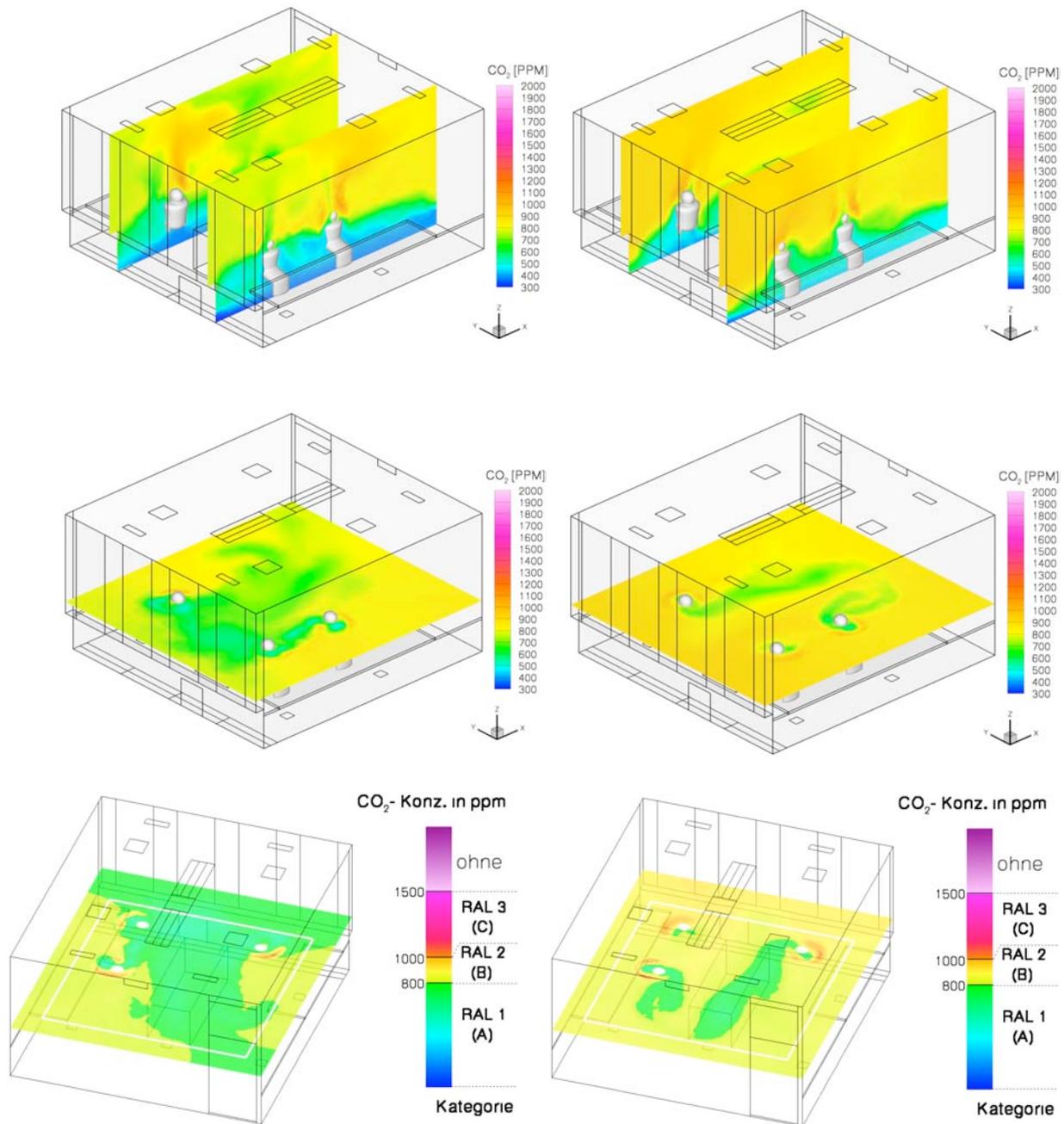
In einem Fall wird schon morgens die Grenze zur Klasse 3 überschritten (Variante 8, Lüftungsgitter und Ventilator-konvektoren, Sommer). In diesem Fall kommt es zu Kurzschlussströmungen: die Zuluft wird wieder abgesaugt, ohne in die Tiefe des Raumes vorgedrungen zu sein.

In fast allen Varianten, die wir untersucht haben, gelingt es bei den gewählten Zuluftvolumen von 105 m<sup>3</sup>/h nicht, die Kohlenstoffdioxid-Belastung der Innenraumluft während des Bürotages konstant zu halten.

Ausnahmen sind die Varianten 12 mit einem Komfortbrüstungsgerät im Sommer sowie die Varianten 22 und 23 mit Induktionskühl- und -heizbalken an der Decke. Diese Varianten schaffen eine Konstante CO<sub>2</sub>-Konzentration über den ganzen Tag, freilich auf dem Niveau der IDA Qualitätsklasse 2, wie alle Mischlüftungen.

Zu den energetischen Implikationen der Lüftungsintensität siehe Kapitel Thermische Simulationen.

#### 4.25.4 Übersicht über die Simulationsvarianten

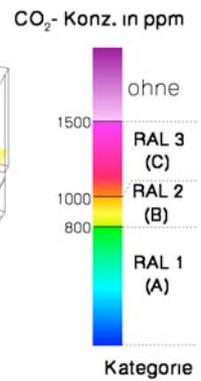
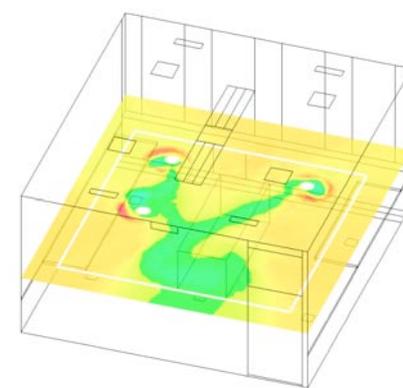
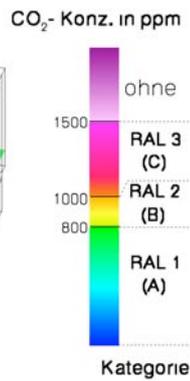
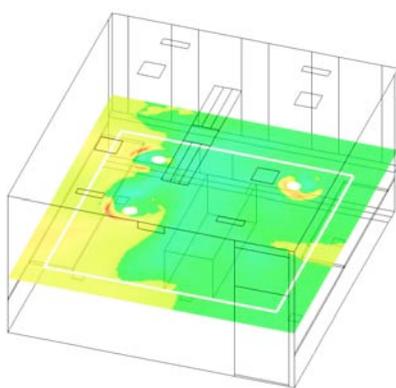
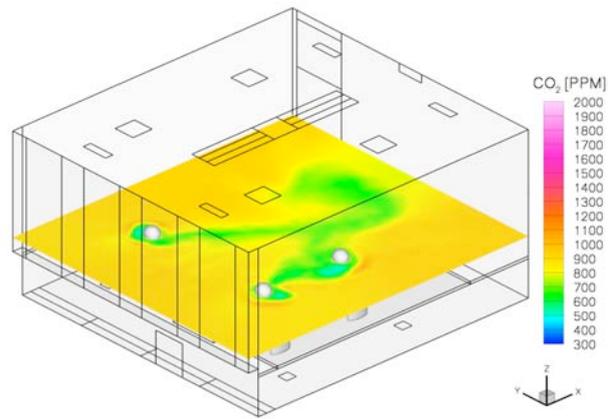
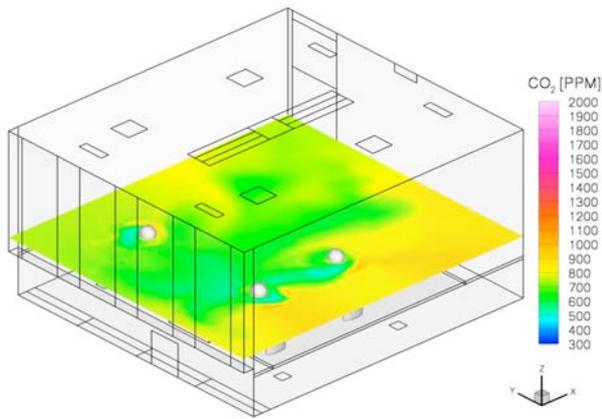
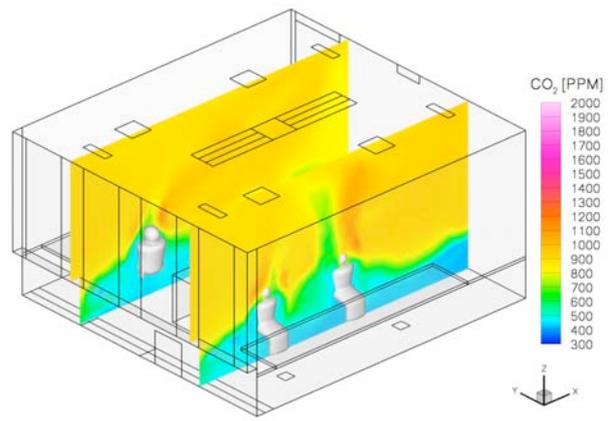
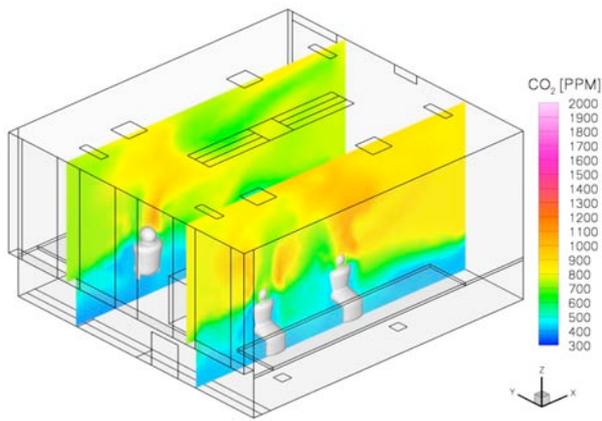


Var. 1: PL4 F1D Sommer: Quelllüftung und Putzkühldecke mit Kapillarrohrrmatte. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Die bodennahe Zuluftversorgung nach dem Prinzip der Verdrängungslüftung erzeugt einen kontinuierlichen CO<sub>2</sub>-Anstieg im Raum vom Boden zur Decke (die Farbcodierung suggeriert Stufen, die nicht existieren). Im Tagesverlauf reicht die Lüftung nicht aus, um die CO<sub>2</sub>-Belastung im Raum konstant zu halten, es kommt zu einem Anstieg.

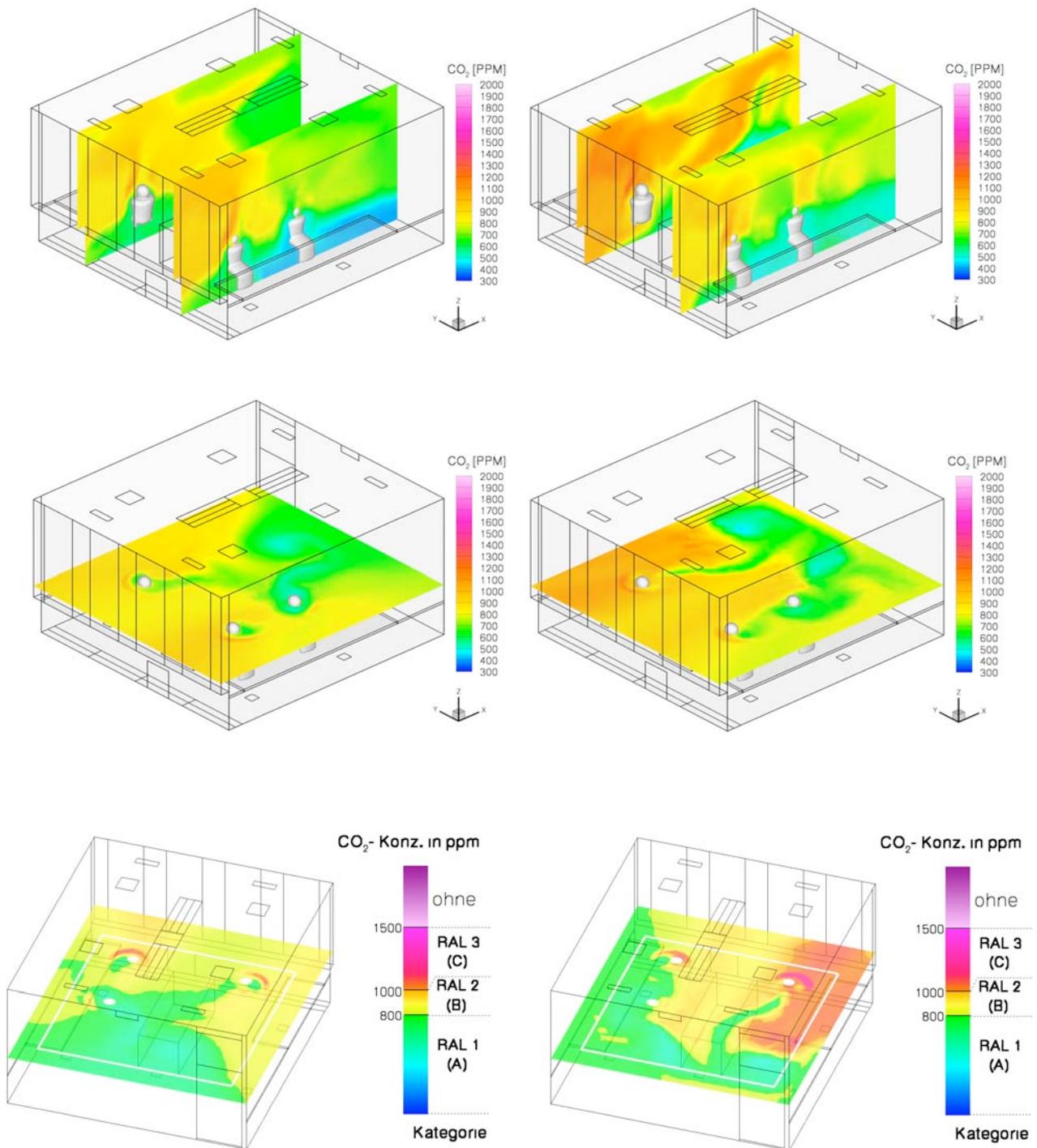
Die unmittelbare Umgebung der Köpfe weist eine *geringere* CO<sub>2</sub>-Konzentration, als die fernere Umgebung. Sie bleibt den ganzen Tag über in der besten Qualitätsklasse.

Dieses Bild trifft auch für alle weiteren Konfigurationen mit Quelllüftung oder Drallluft-Bodendüsen zu.



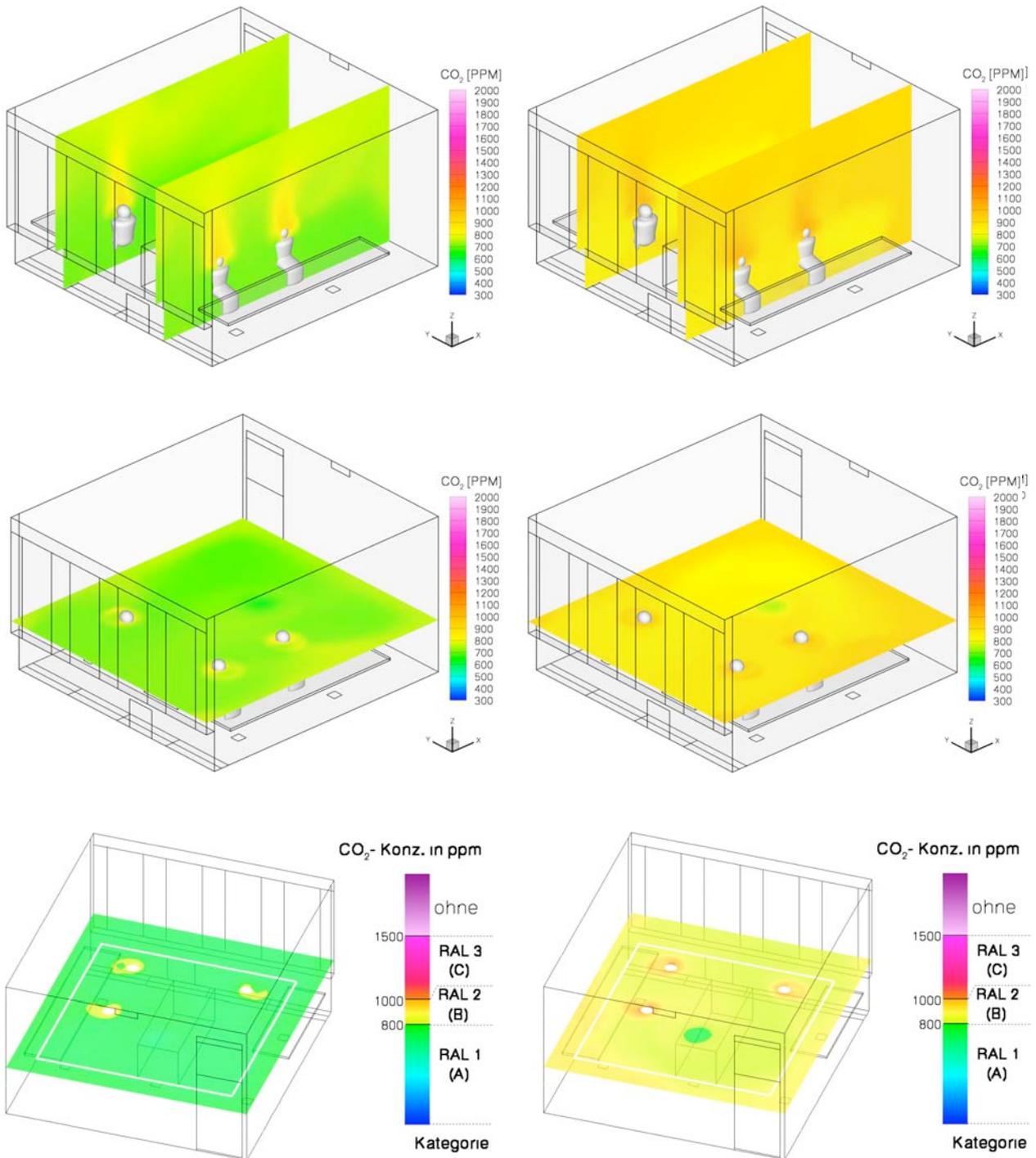
Var. 2: PL5 F1D Sommer: Drallauslässe im Boden und Putzkühldecke mit Kapillarrohrmatte. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 1



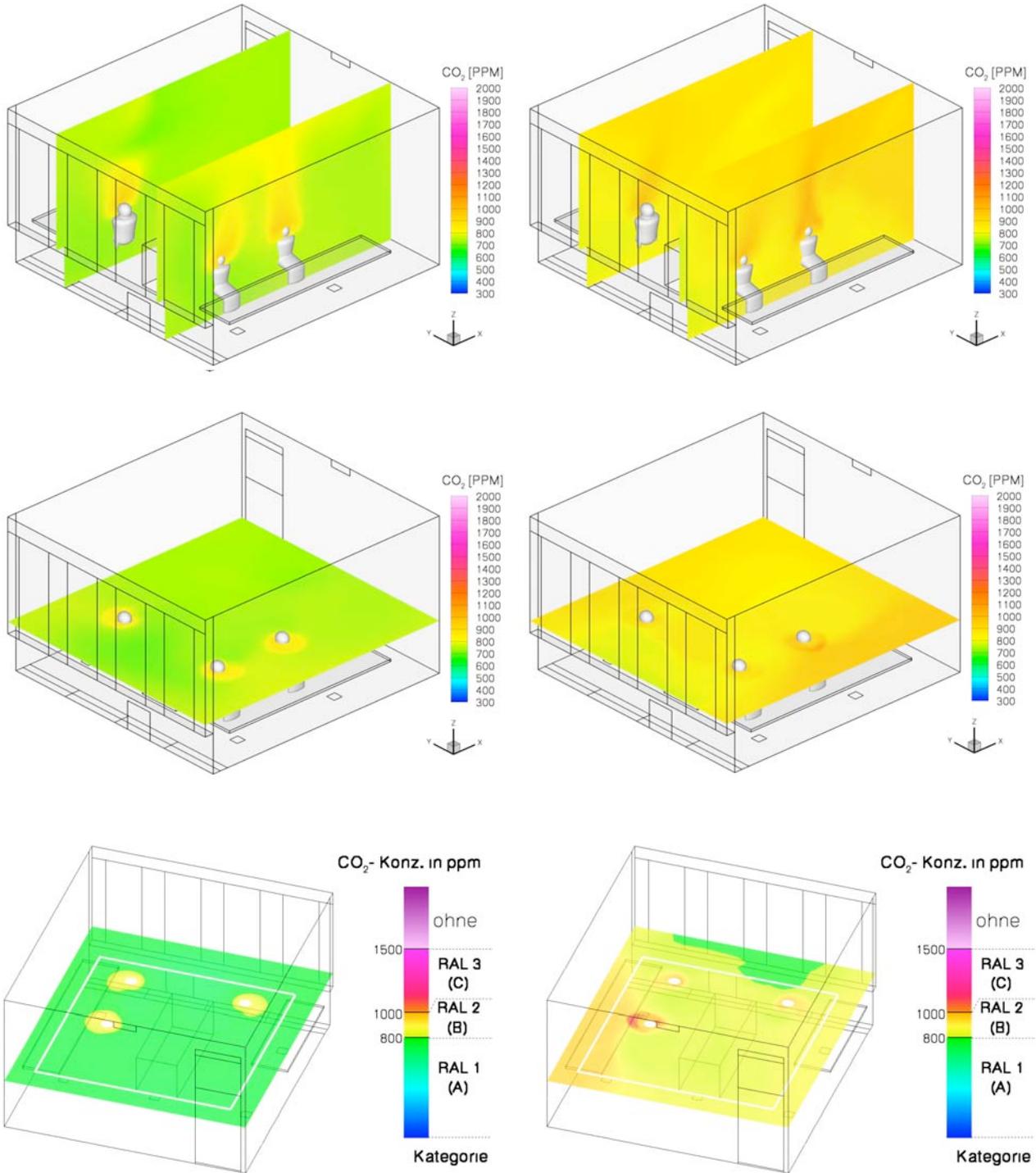
Var. 3: PL5 F1D Winter: Drallauslässe im Boden und Putzheizdecke mit Kapillarrohrmatte. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 1. Es bildet sich aber auf der Türseite eine Zone mit höherer CO<sub>2</sub>-Konzentration aus. Der Arbeitsplatz auf dieser Seite ist davon betroffen (Klasse C).



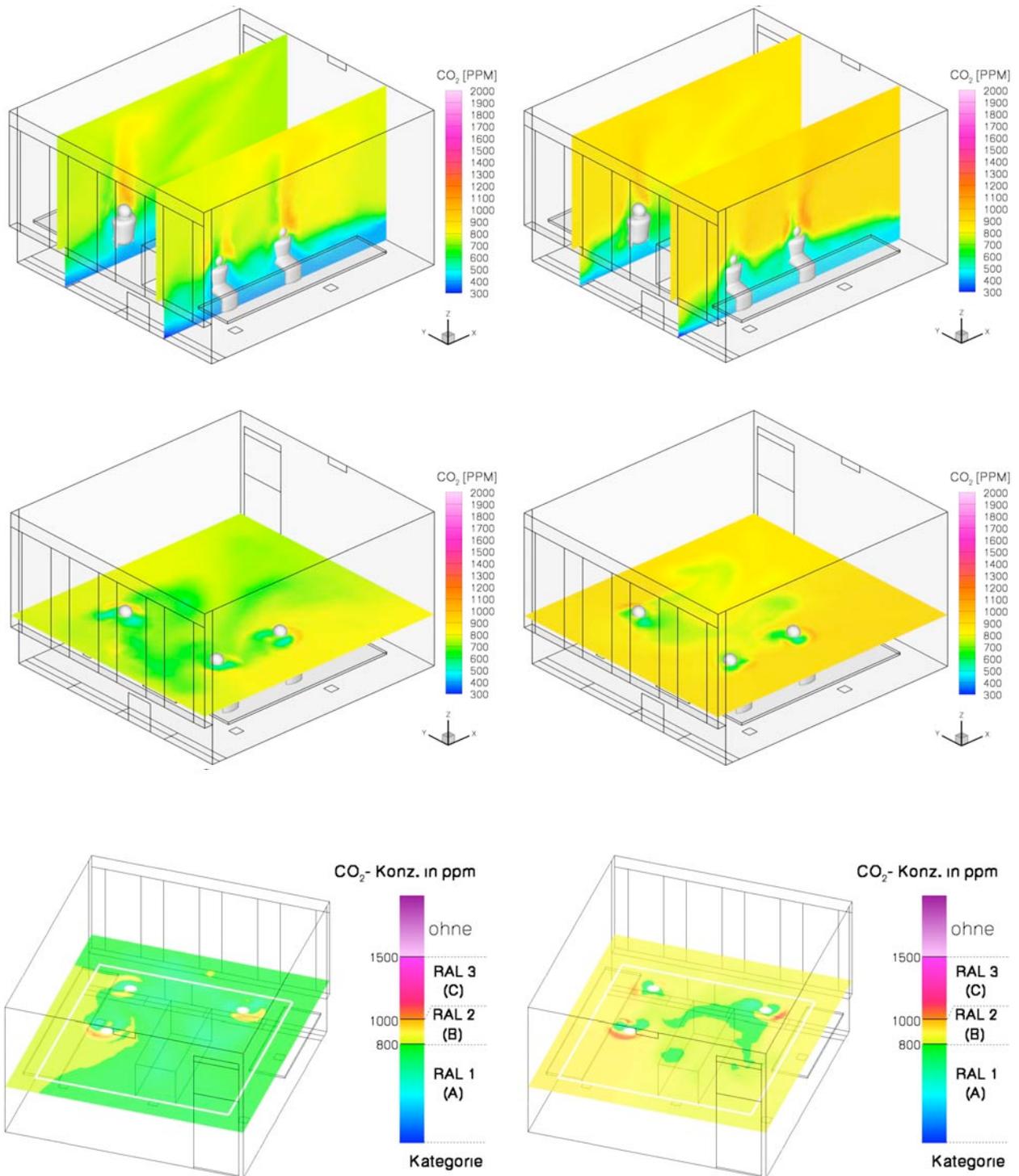
Var. 4: PL2 F5A Sommer: Lüftungsgitter und Fußbodenkühlung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Auch hier reicht die Lüftung nicht aus um den CO<sub>2</sub>-Gehalt über den Tag konstant zu halten. Aber hier sind die Umgebungen der Köpfe Inseln *höherer* CO<sub>2</sub>-Konzentration. Schon morgens kann der unmittelbaren Umgebung der Personen nur die Klasse B zugeordnet werden. Nachmittags wird die Grenze zur Klasse C überschritten. Dies trifft auf alle Varianten mit Zuluft einbringung von oben (Luftgitter) zu.



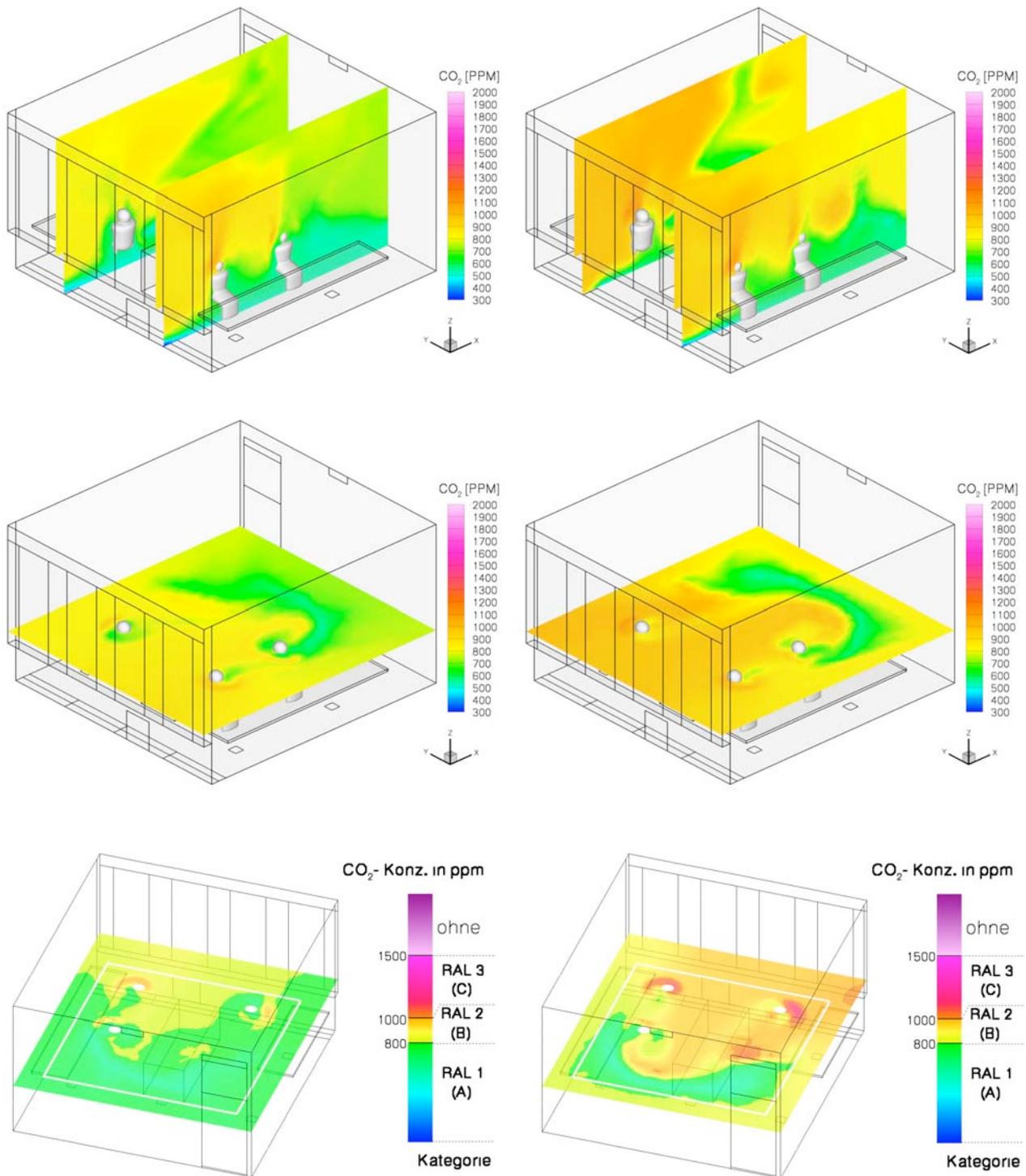
Var. 5: PL2 F5A Winter: Lüftungsgitter und Fußbodenheizung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 4



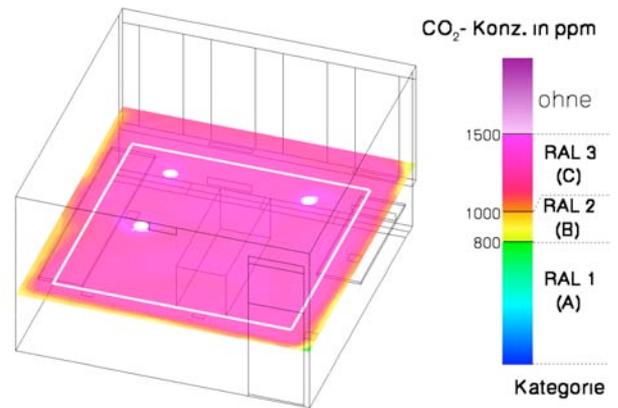
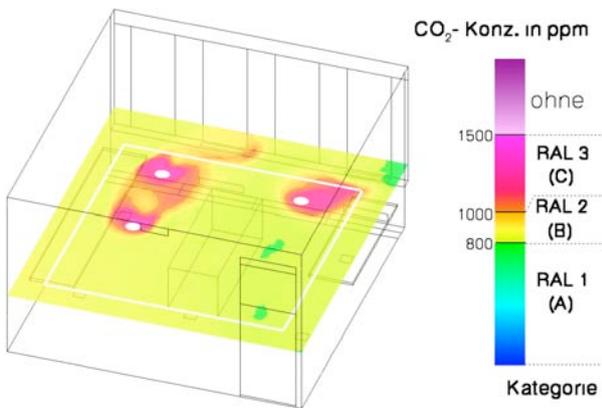
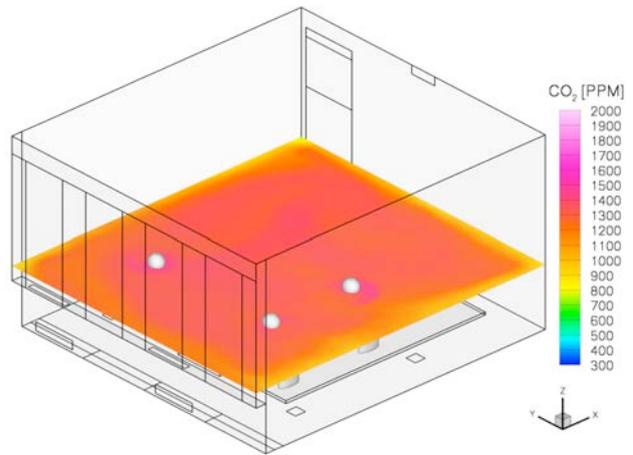
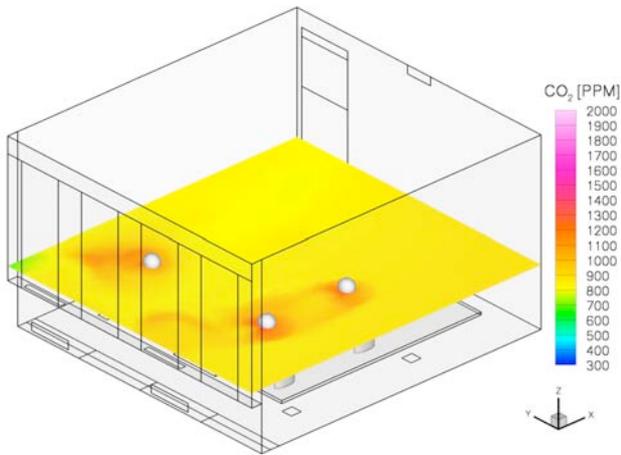
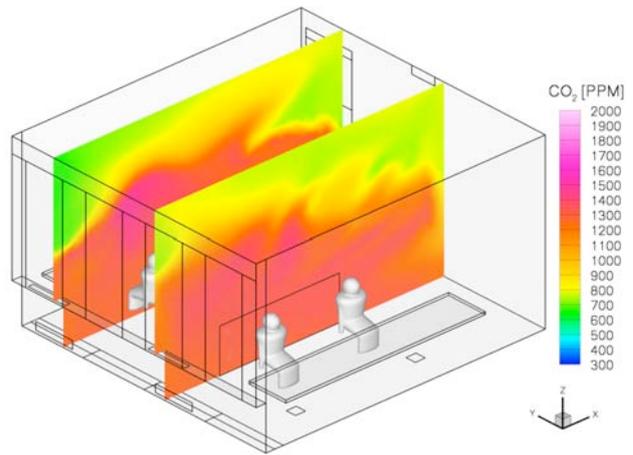
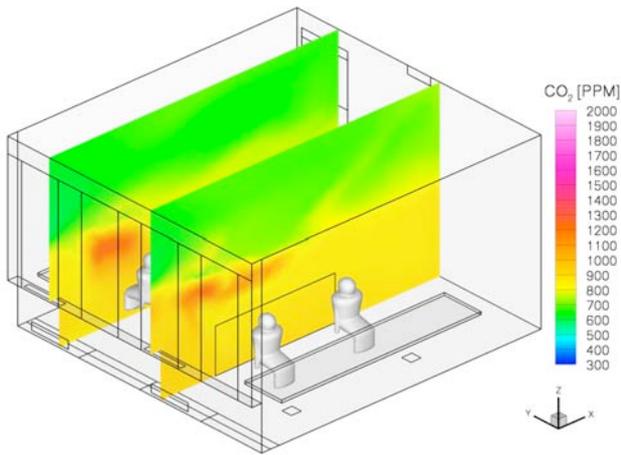
Var. 6: PL4 F2A Sommer: Quelllüftung und Betonkernaktivierung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 1



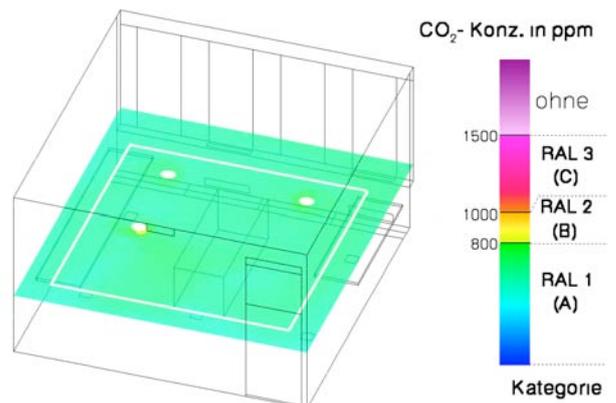
Var. 7: PL4 F2A Winter: Quelllüftung und Betonkernaktivierung 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten).

Wie Variante 1. Der türseitige Arbeitsplatz ist auch nachmittags der Klasse A zuzuordnen.

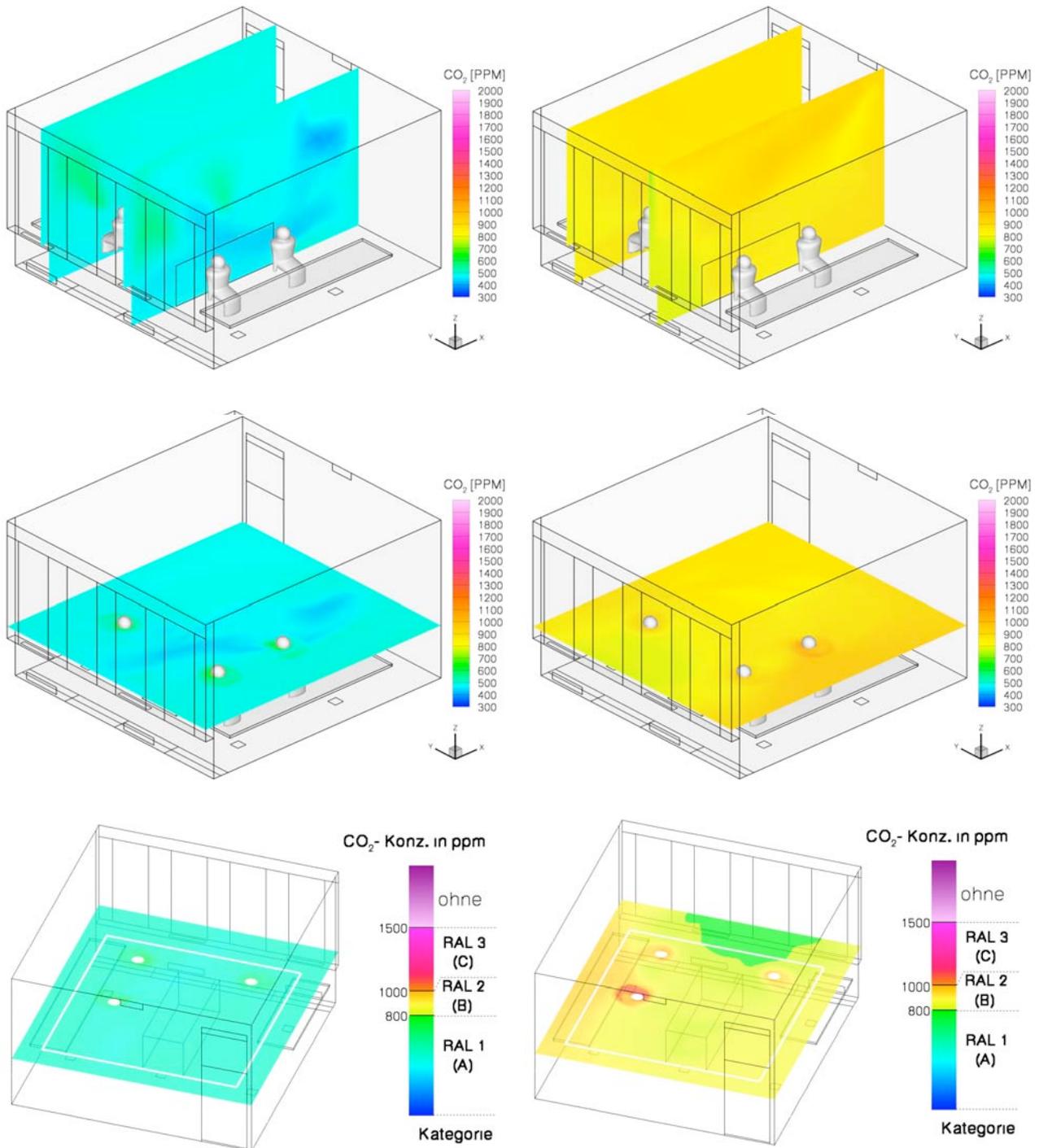


Var. 8: PL2 L1A Sommer: Lüftungsgitter und Ventilator-konvektoren. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte), RAL-Klassen (unten). Zum Vergleich: 9 Uhr (ganz unten)

Der Zuluftstrom bleibt deckennah, bei Konvektorbetrieb (hier: 10 Uhr) ebenso, wie bei reinem Zuluftbetrieb, die während des Tages im Halbstundenrhythmus abwechseln. Schon um 9 Uhr ist der Raum der Klasse A, die Umgebungen der Köpfe aber bereits der Klasse B

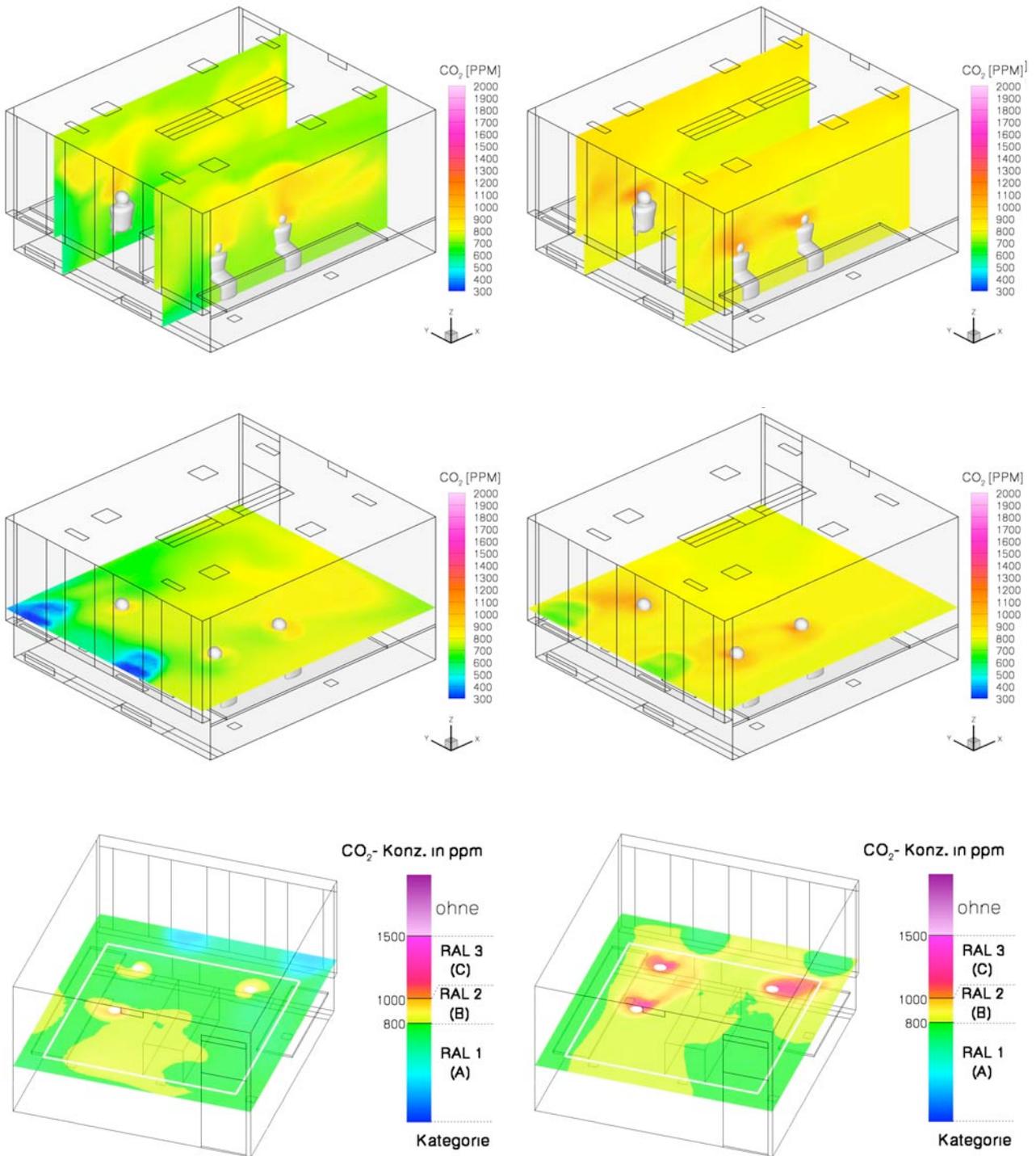


zuzuordnen. Sie sind Inseln *erhöhter* CO<sub>2</sub>-Konzentration! Im Laufe des Tages wechseln die Umgebungen der Köpfe und schließlich der ganze Raum in die Klasse C.



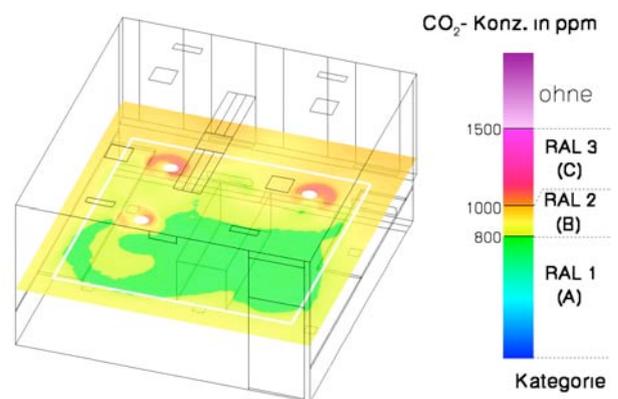
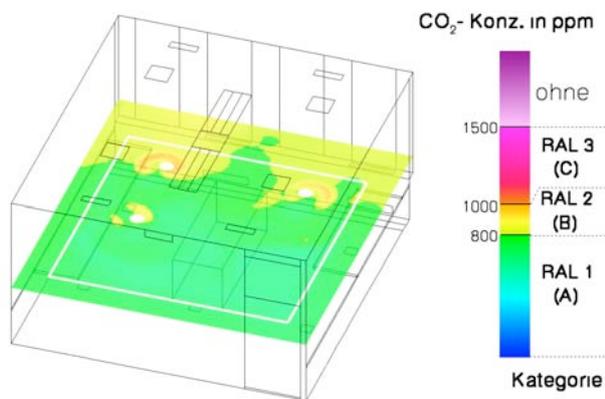
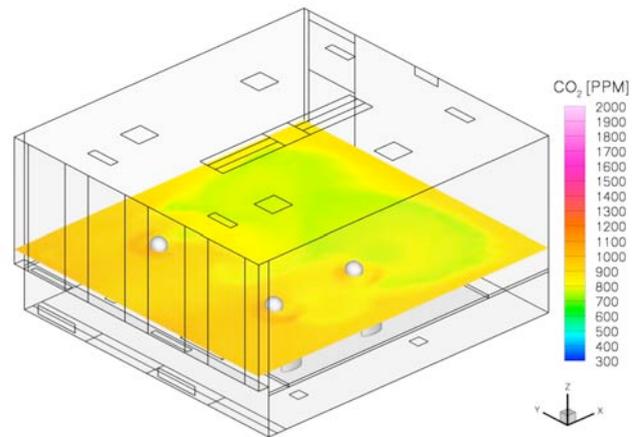
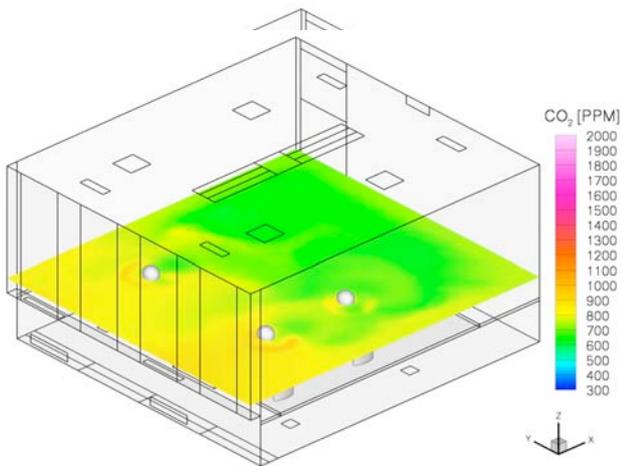
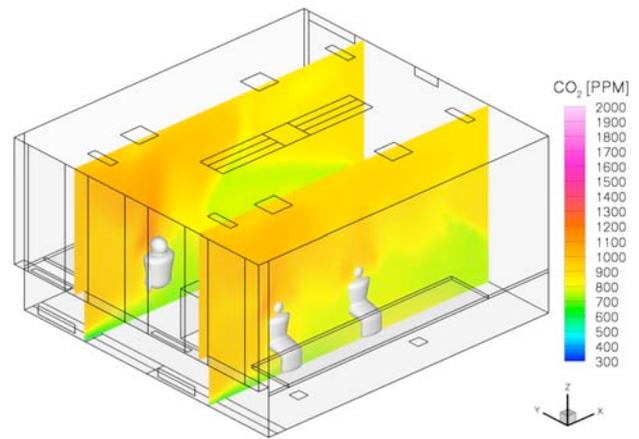
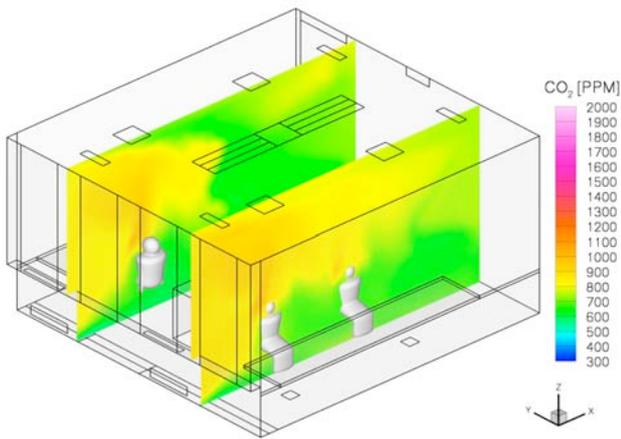
Var. 9: PL2 L1A Winter: Lüftungsgitter und Ventilatorconvektoren.9 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 4, der die Variante 9 auch weitgehend entspricht. Die Konvektoren sind während des Tages nicht in Betrieb. Die Fallströmung entlang der kühleren Fensterscheiben leitet Zuluft von der Decke hinunter. Der Raum wechselt im Laufe des Tages von der Klasse A zur Klasse B.

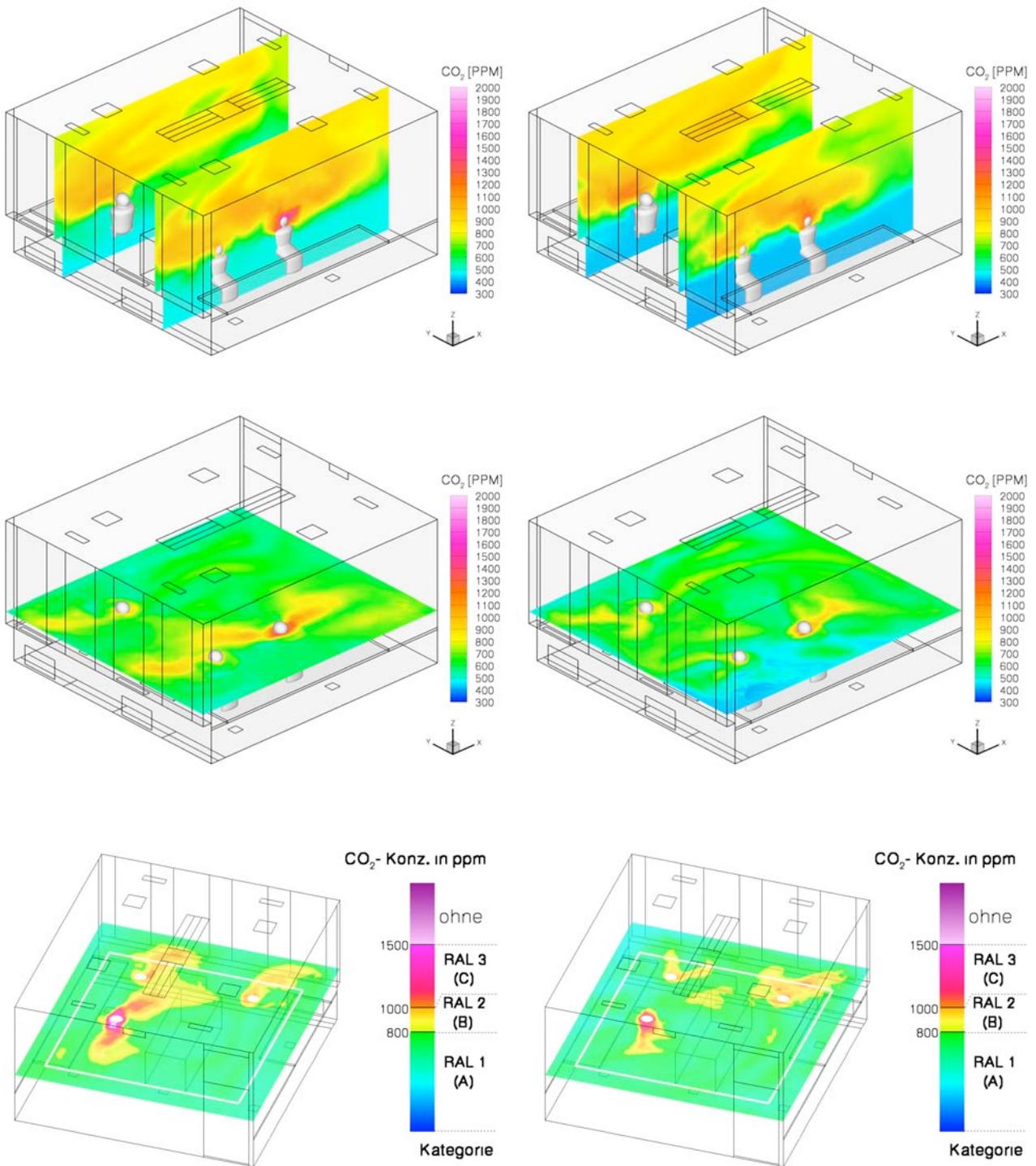


Var. 10: L1A Sommer: Ventilatorconvektoren mit Primärluftanteil. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Die Umgebungen der Köpfe sind hier besonders deutlich Inseln *erhöhter* CO<sub>2</sub>-Konzentration.

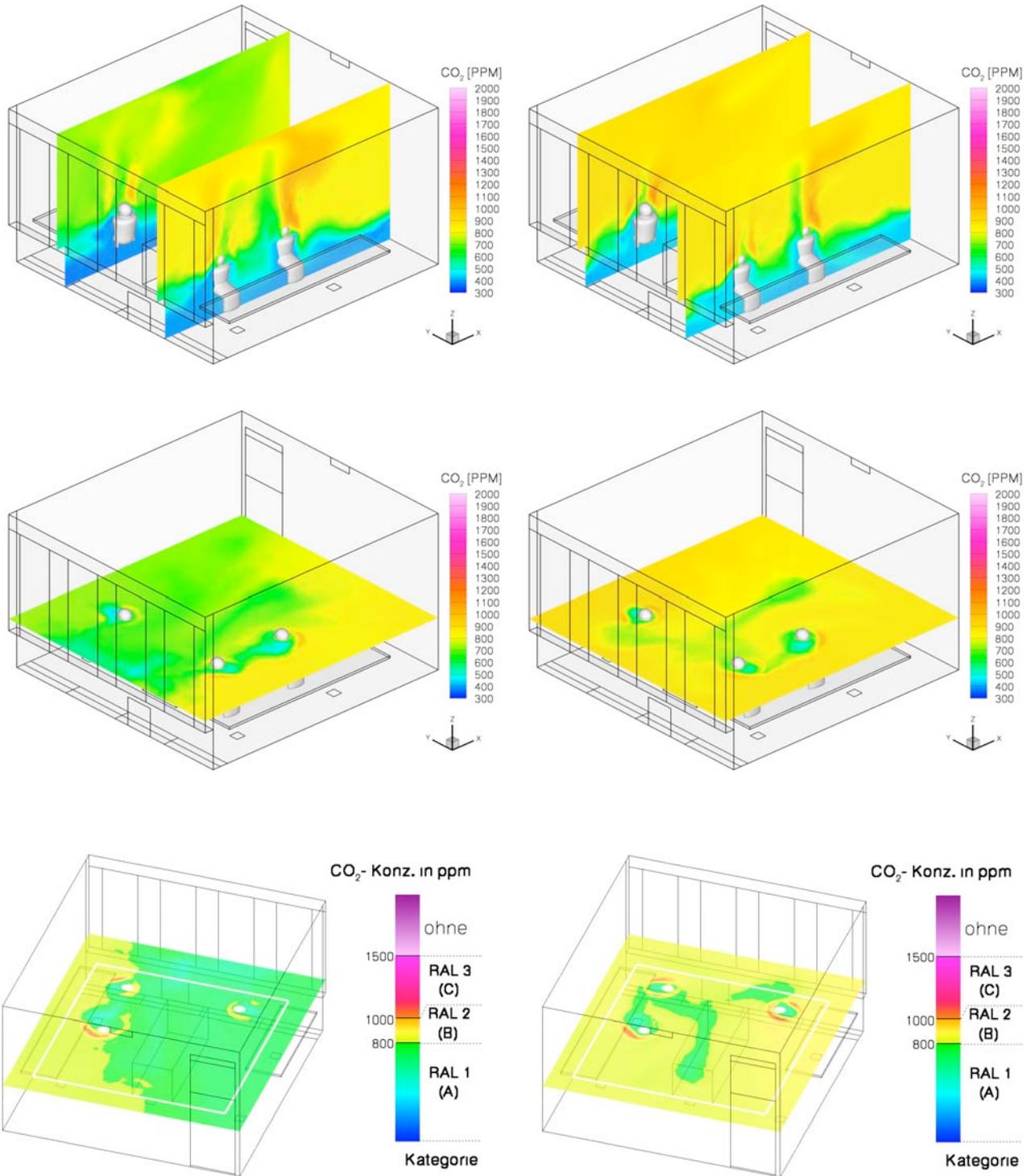


Var. 11: L1A Winter: Ventilator-konvektoren mit Primärluftanteil. CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten) 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)



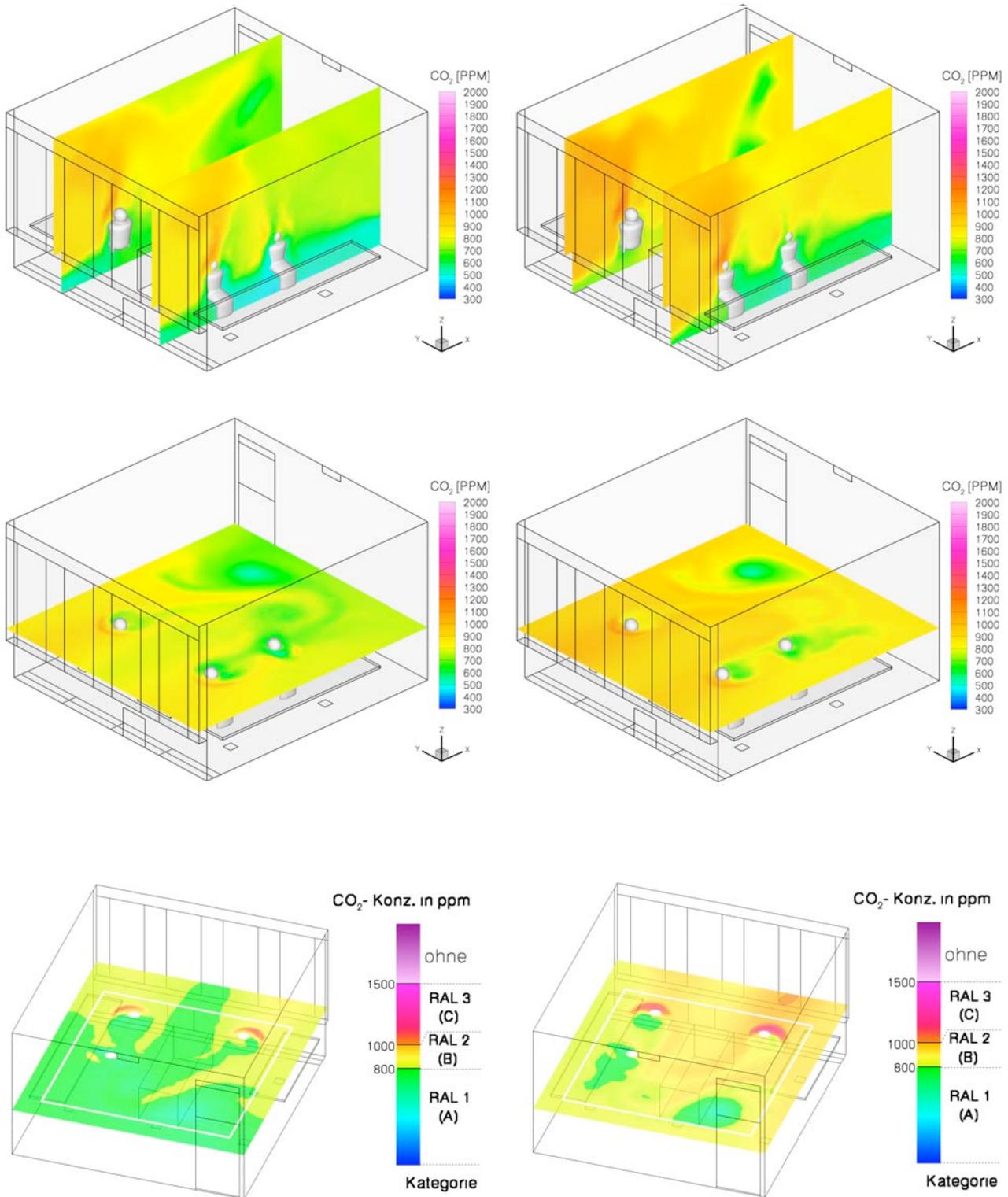
Var. 12: L1B Sommer: Ventilatorconvektoren Komfortbrüstungsgeräte. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte), RAL-Klassen (unten)

Die Geräte sind ständig, ohne Taktung in Betrieb. Es gelingt mit dieser Konfiguration, den Tag über dieselbe CO<sub>2</sub>-Konzentration aufrecht zu erhalten. Die Umgebungen der Köpfe sind Inseln erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration und den Klassen B und C (fensterferner Arbeitsplatz) zuzuordnen.



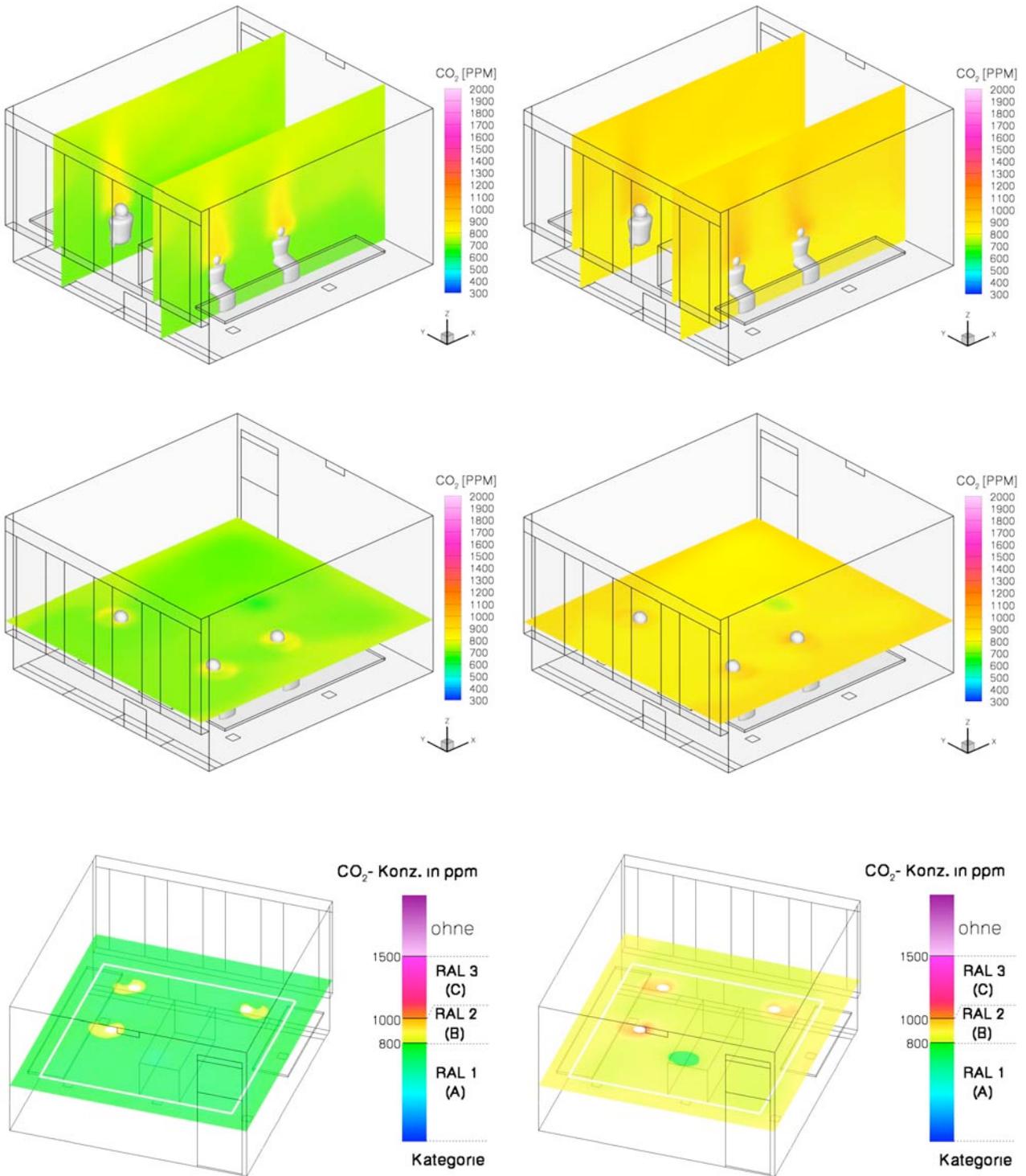
Var. 13: PL5 F2A Sommer: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung.10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 1



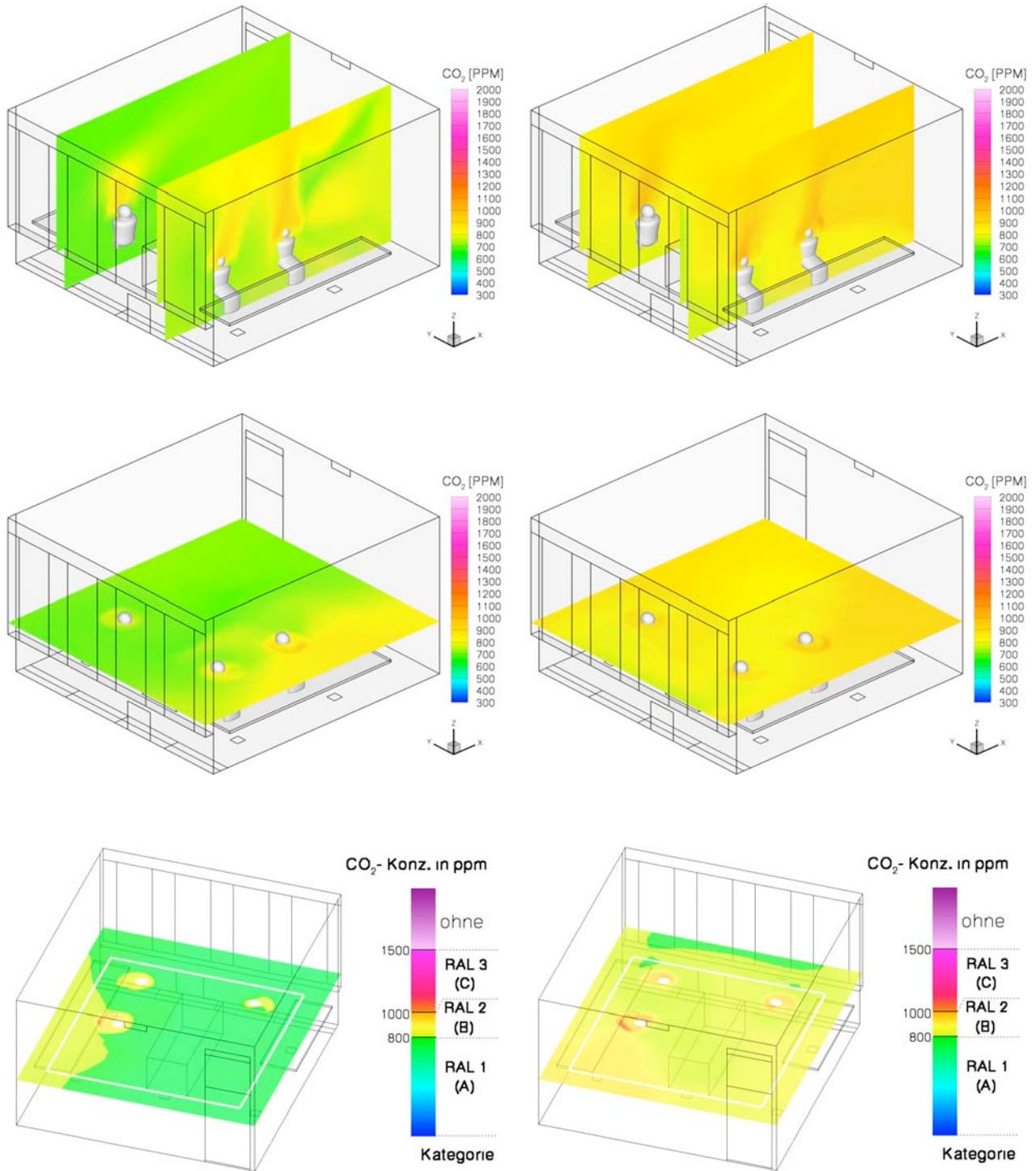
Var. 14: PL5 F2A Winter: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte), RAL-Klassen (unten)

Umgebungen der Köpfe sind Inseln *niedrigerer* CO<sub>2</sub>-Konzentration, wie bei Verdrängungslüftung zu erwarten (siehe Variante 1). Türseitig schlechterer Wert, eine Folge der Fallströmung an der kühlen Fensterscheibe.



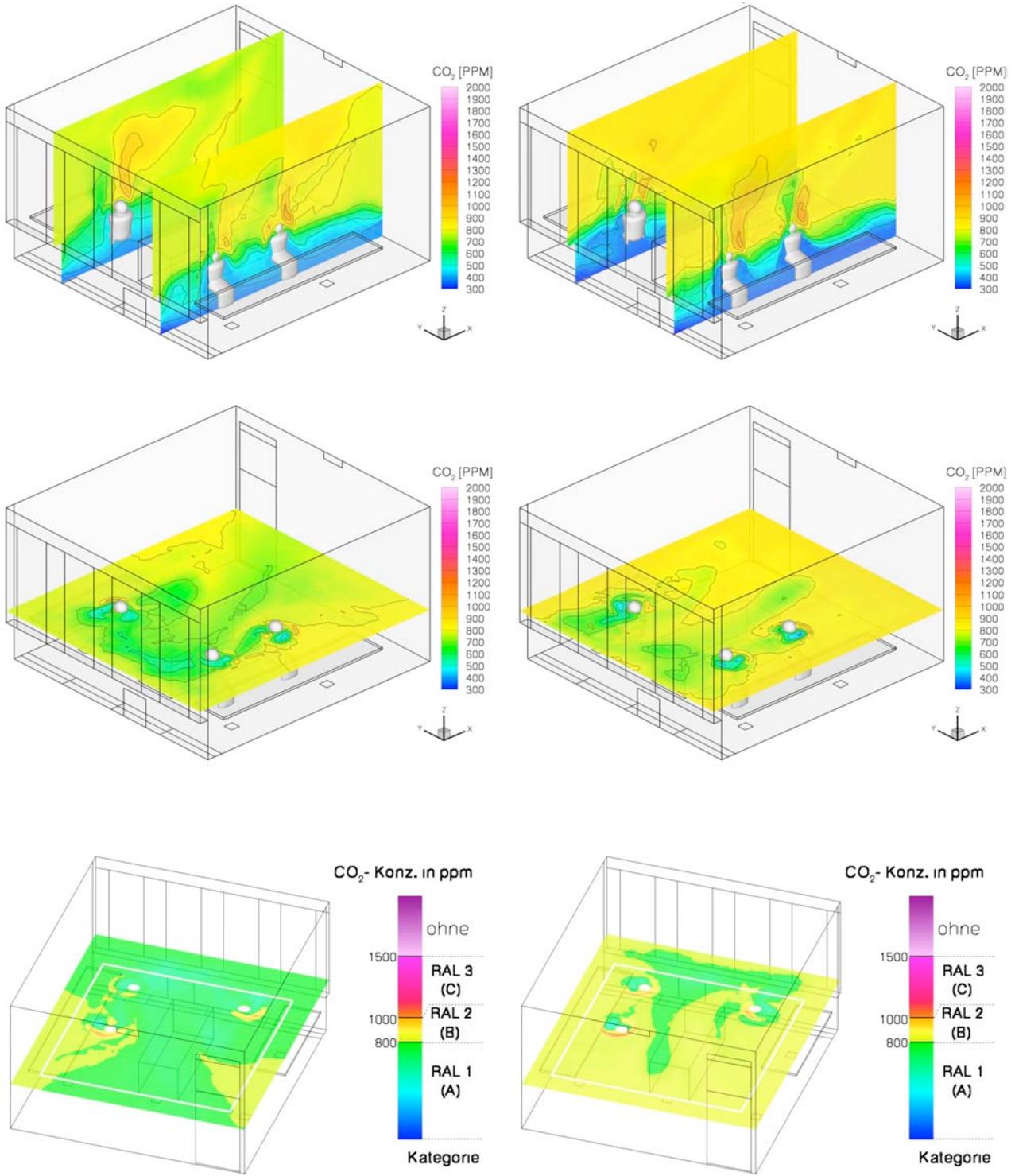
Var. 15: PL2 F2A Sommer: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung.10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 4



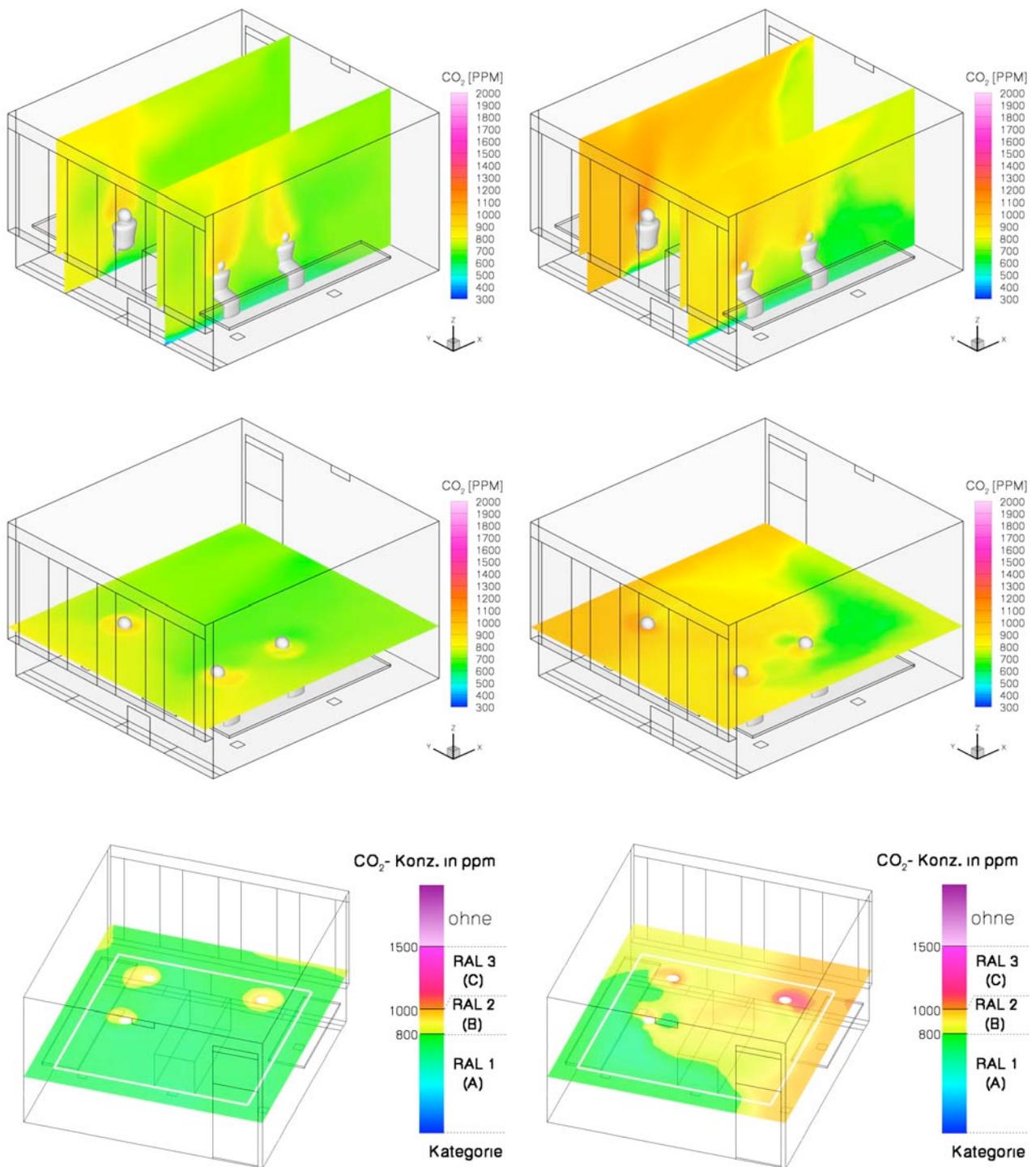
Var. 16: PL2 F2A Winter: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung.10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 4



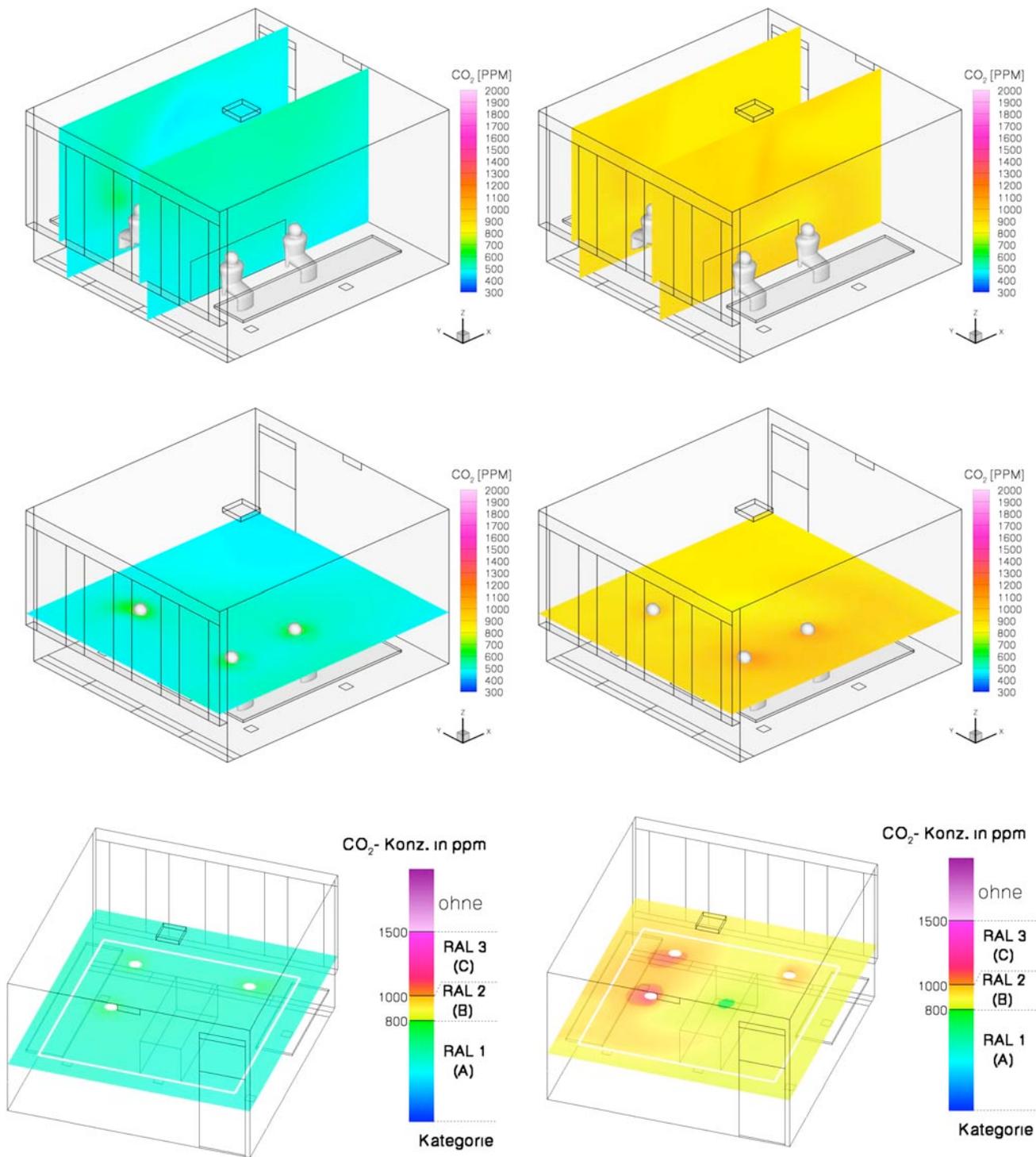
Var. 17: PL4 F5A Sommer: Quelllüftung und Fußbodenkühlung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte), RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 1



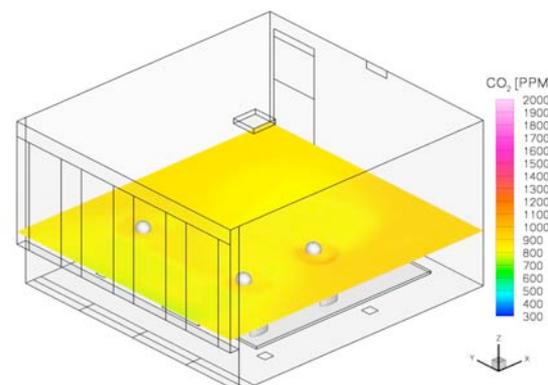
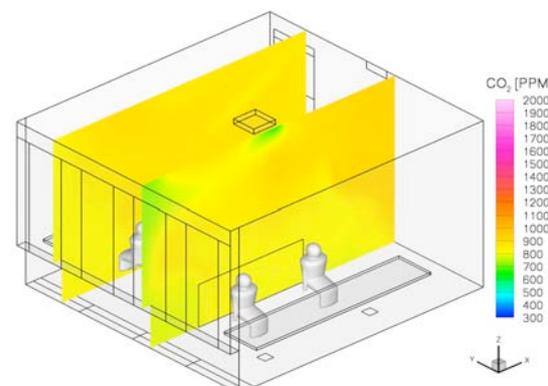
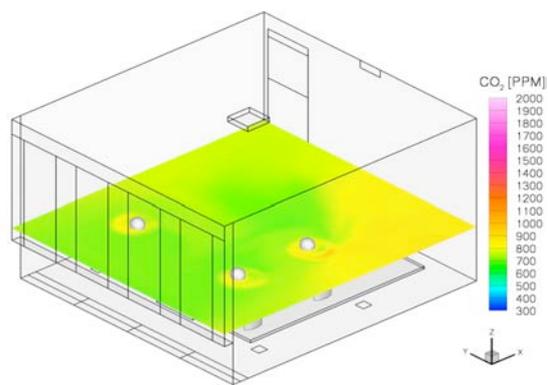
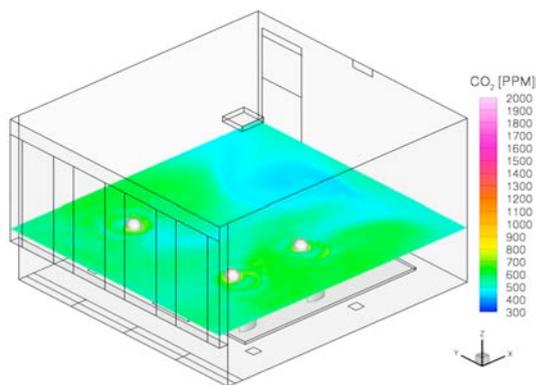
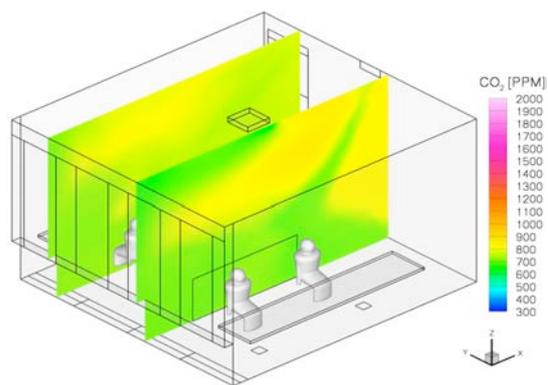
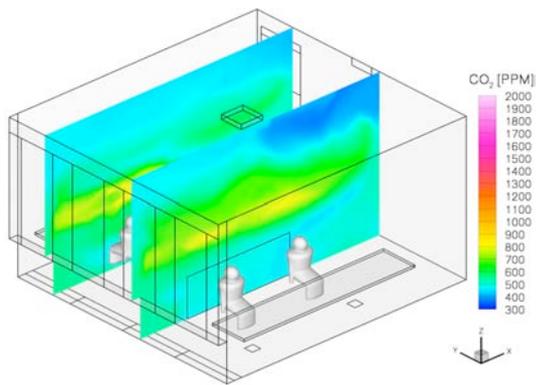
Var. 18: PL4 F5A Winter: Quelllüftung und Fußbodenheizung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Die Fallströmung an der kühleren Fensterfront beschleunigt die als Quellluft eingebrachte Zuluft und vermischt sie mit der Raumluft. Deswegen sind hier (Ausnahme bei Quellluft!) die Umgebung der Köpfe Insel erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration. Der Vorteil der Verdrängungslüftung geht also verloren.



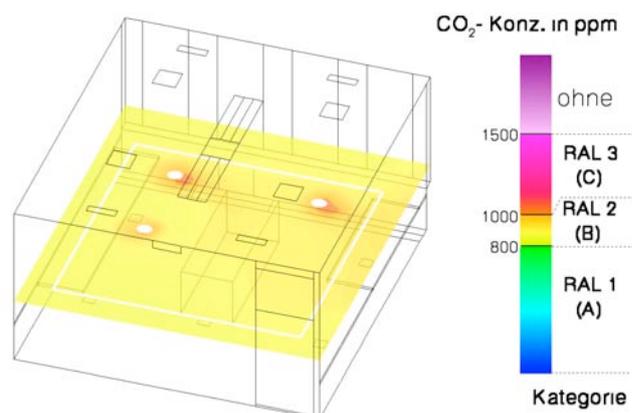
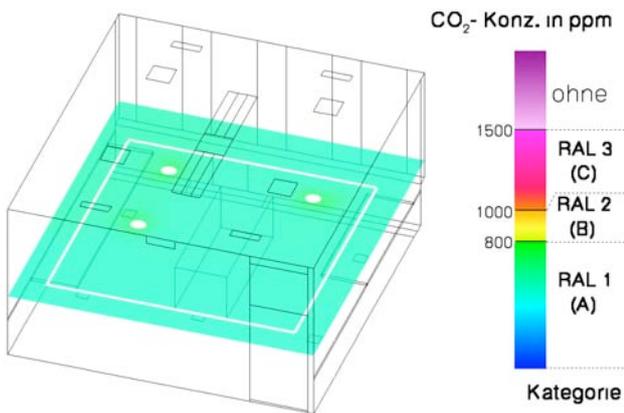
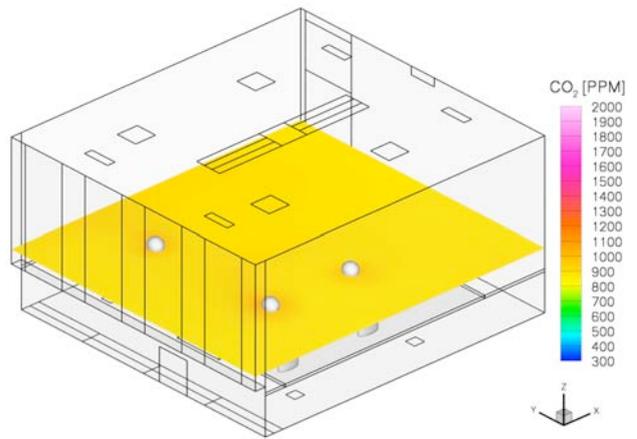
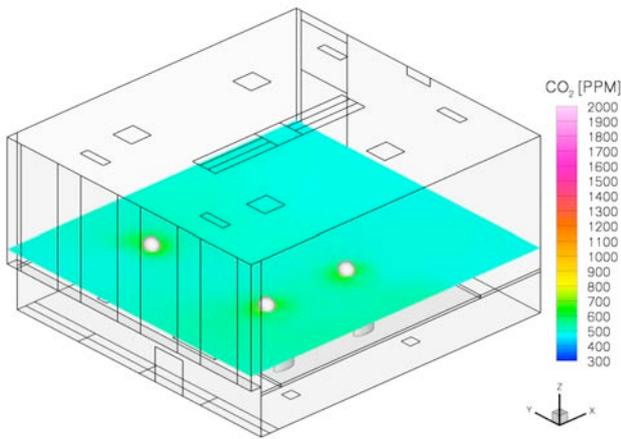
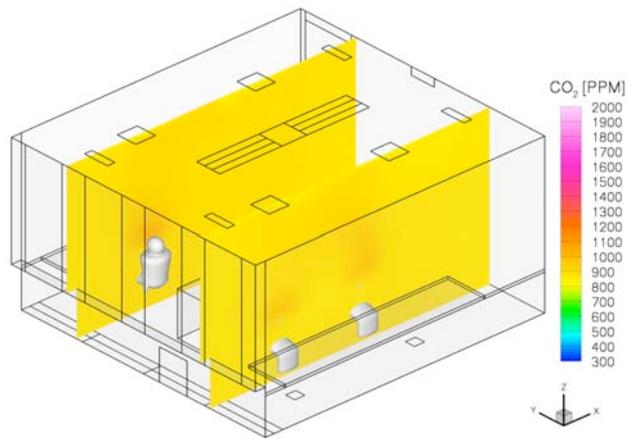
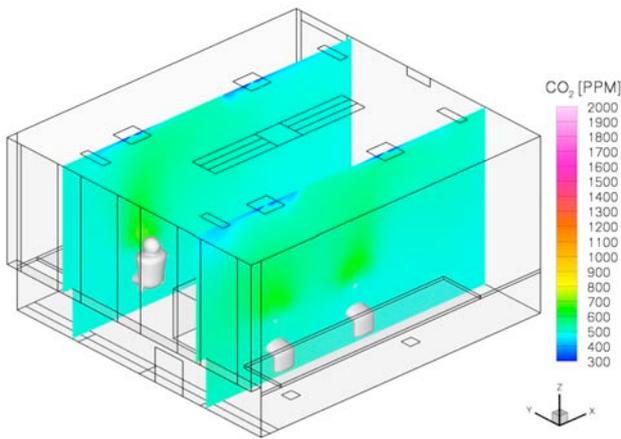
Var. 19: PL2 L2 Sommer: Lüftungsgitter und Deckenfancoil. 9 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 4



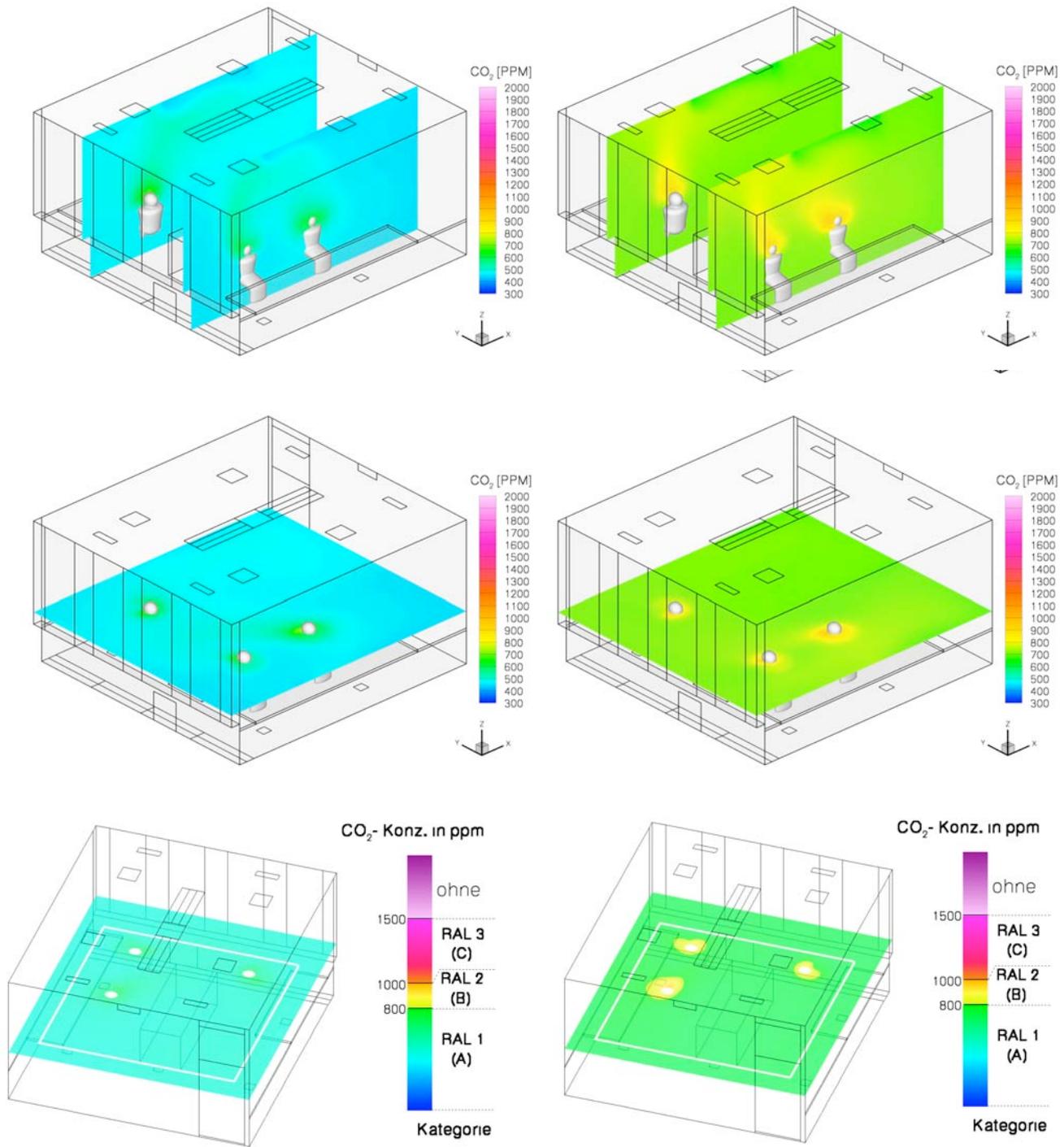
Var. 20: PL2 L2 Winter: Lüftungsgitter und Deckenfancoil. 9 Uhr (links oben), 10 Uhr (rechts oben), 16 Uhr (rechts unten). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben)

Wie Variante 4



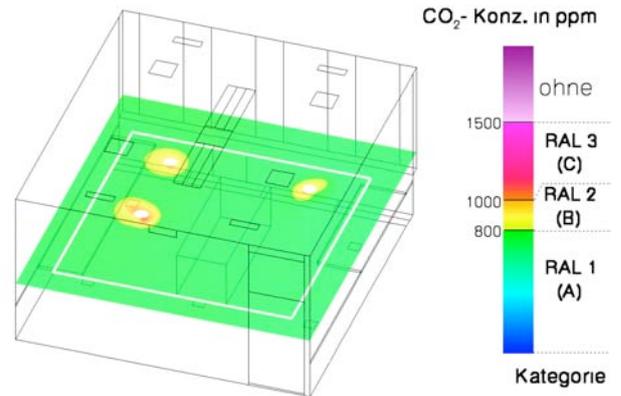
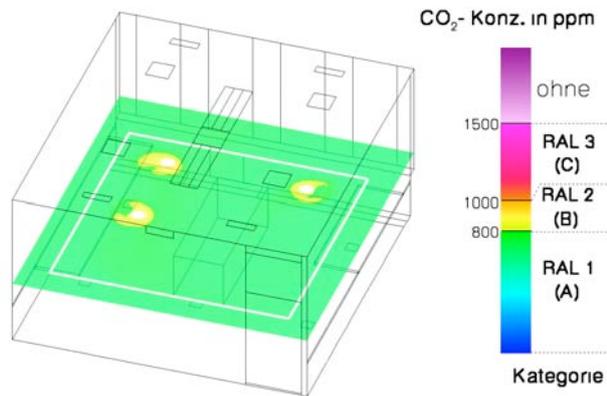
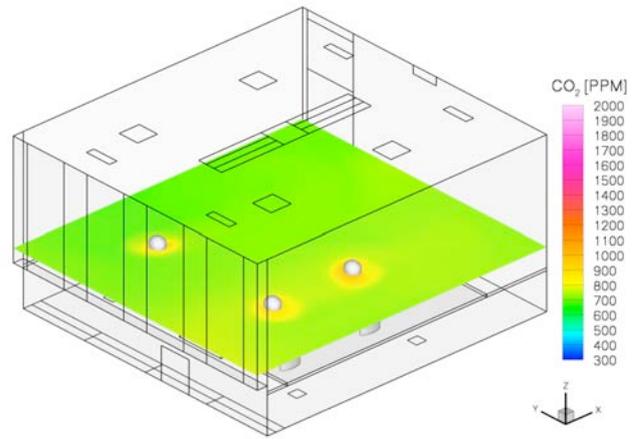
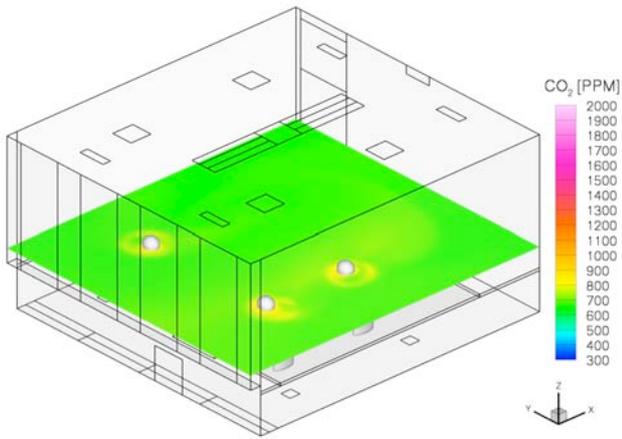
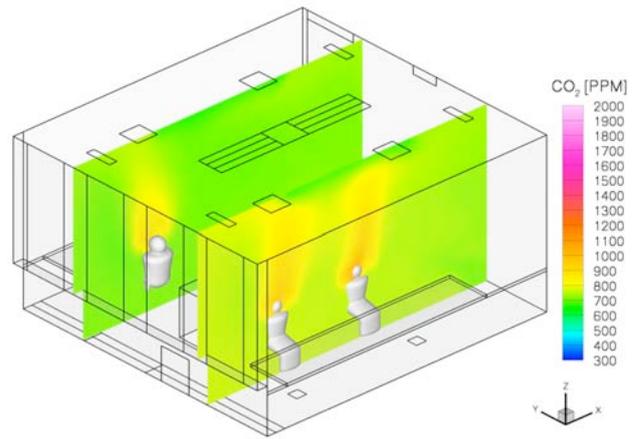
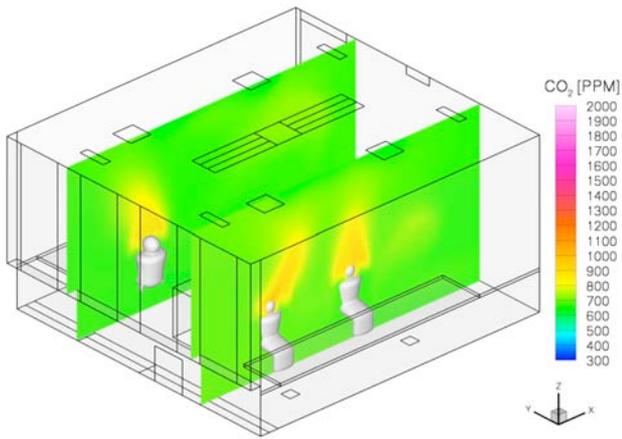
Var. 21: L3 Sommer: Deckeneinbaugerät mit Drallauslässen. 9 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 4



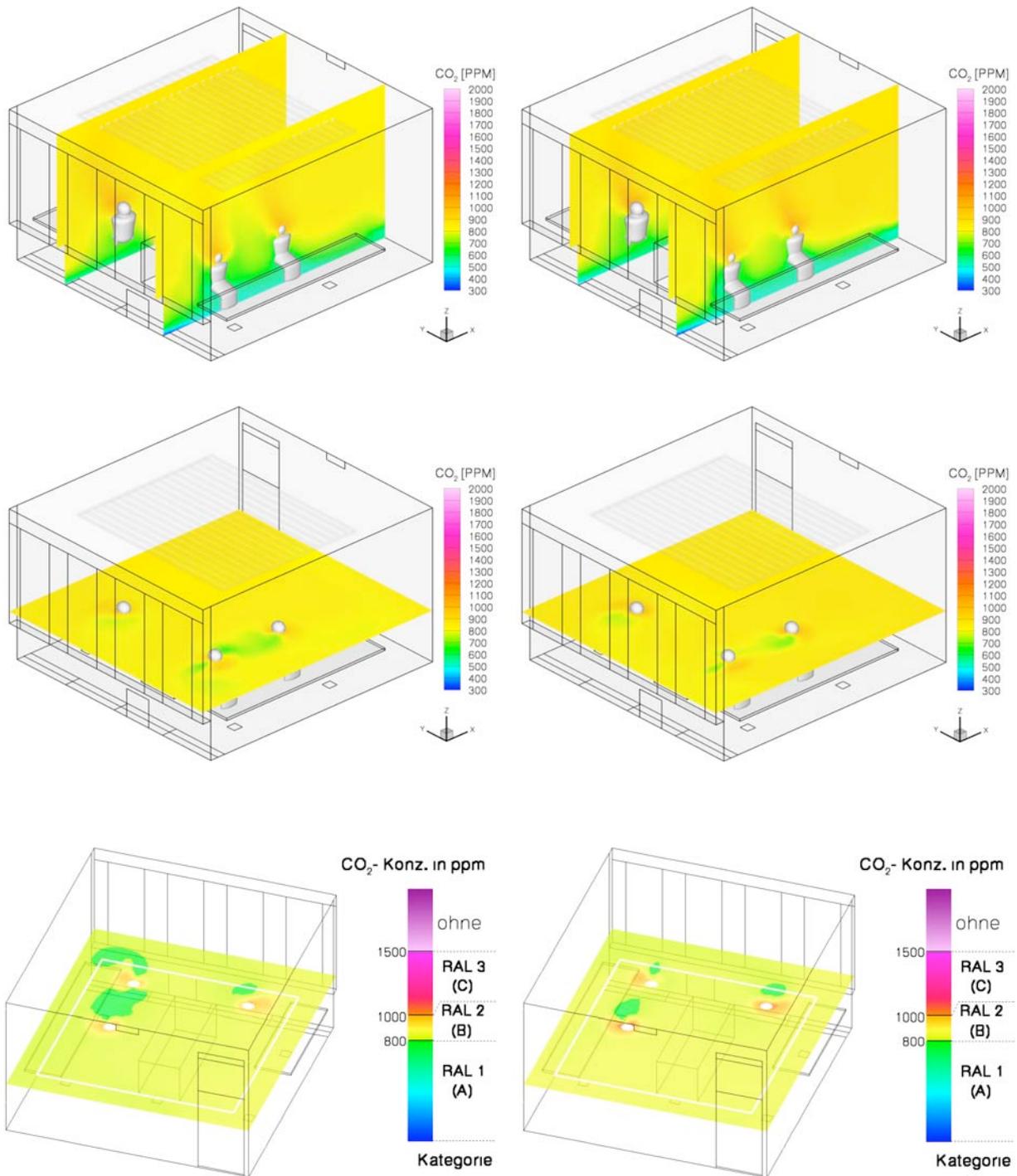
Var. 22: FL1 Sommer: Induktionskühlgerät (Kühlbalken). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten). 9 Uhr (links), 16 Uhr (rechts).

Wie Variante 4. Das Gerät kann die CO<sub>2</sub>-Konzentration über den Tag bemerkenswert gut konstant halten! In der Umgebung der Köpfe wird die Grenze der Klasse B nicht überschritten.



Var. 23: FL1 Winter: Induktionsheizgerät (Heizbalken). CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten). 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts).

Wie Variante 4. Auch hier die Konstanz der CO<sub>2</sub>-Werte während des Tages beeindruckend.



Var. 24: PL4 F3 Sommer: Kühlsegel mit Quellluftauslass. 14 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)  
 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ppm (oben, mitte) , RAL-Klassen (unten)

Wie Variante 1. Die Zonen niedriger CO<sub>2</sub>-Konzentration sind Richtung Fenster verschoben. Das Kühlsegel nimmt einen Teil der Deckenfläche ein und verfügt mit 150 W/m<sup>2</sup> über rund die doppelte flächenbezogene Kühlleistung der Putzkühldecke (80 W/m<sup>2</sup>) und die rund 4fache der aktivierten Betondecke (40 W/m<sup>2</sup>). Kleinere Fläche und intensivere Kühlung bringen eine größere thermisch induzierte Luftbewegung mit sich. Es zeigt sich ein Kaltluftabfall an den Seitenwänden und an der rückwärtigen Kante des Kaltluftsegels, die zu Luftvermischung führen. Vergleiche Variante 18.

## 4.26 Einzelauswertung Luftaustauschindex in 1,1 m Höhe bei den Köpfen der Sitzenden

Der lokale Luftaustauschindex ist ein Kriterium für das lokale Alter bzw. die Verweilzeit der Raumluft im Untersuchungsgebiet. Das Luftalter ist dabei mit dem entsprechenden Wert am Austritt normiert. Hierbei bedeuten Werte  $>1$  eine sehr gute Frischluftversorgung, Werte um 1 ein Alter, welches bei idealer Durchmischung zu erwarten wäre, Werte deutlich unter 1 weisen auf Regionen mit verbrauchter, alter Luft und somit auf Kurzschlusseffekte in den untersuchten Strömungsstrukturen hin.

### 4.26.1 Verdrängungslüftung

Wie bei den Ergebnissen der Kohlenstoffdioxidkonzentrationen in der Raumluft, machen sich auch bei Luftaustauschindex die Zuluftbringungen als Quellluft oder Drallluft-Bodendüsen durch höhere Werte, also geringeres Luftalter in unmittelbarer Umgebung der Köpfe der Personen im Raum bemerkbar. Beispiele sind die Varianten 1, 2, 3, 6, 7, 13, 14, 17, 18 und 24.

Dies belegt die Wirksamkeit von Quellluftlösungen.

Instruktiv ist auch das scheinbare Gegenbeispiel der Variante 18, Quelllüftung und Fußbodenheizung im Winter. Hier wird durch Fallluft an der kühleren Fensterscheibe in Verbindung mit der Fußbodenheizung die Quellluftströmung aus der Brüstung zusätzlich angetrieben. Das führt nicht nur zu leichten Zugscheinungen, sondern stört auch die Funktion der Quelllüftung, einen „Frischlufmantel“ an den Personen aufsteigen zu lassen. Dieser „Mantel“ wird durch die induzierte Strömung weggezogen. Die Zuluft wird stärker mit der Raumluft vermischt, mit der Folge eines höheren Luftalters. Erst im Laufe des Tages steigen die Werte des Luftaustauschindex an.

Die Rolle des Fensters als Ursache einer abwärts gerichteten Strömung im Winter ist auch bei den Varianten 5, 9, 16 und 20 mit Lüftungsgittern an der Rückwand des Raumes deutlich. Die im Winter isotherm eingebrachte Zuluft strömt an der Decke entlang zum Fenster und fällt dort ab.

Im Sommer erreichen Lüftungsgitter nicht die gleiche Effizienz des Luftaustauschs verglichen mit Quelllüftungen. Die mit Untertemperatur eingebrachte Zuluft fällt ähnlich einem Wasserfall in den Raum, schön sichtbar in den Bildern zu Varianten 4, 15, 19.

Wieder ist die Variante, die den „Wasserfall“ am wenigsten deutlich zeigt, instruktiv: In Variante 19 induziert der Fancoil eine zusätzlich Strömung, die den „Wasserfall“ überformt, das Luftalter aber gegenüber den anderen Varianten (infolge Mischung) eher anhebt.

Dies leitet über zu den Varianten mit Induktionslüftung (8, 9, 10, 11, 12, 20, 21, 22, 23).

### 4.26.2 Mischlüftung

Induktionslüftung läßt Luftaustauschwerte bei 1 erwarten.

Varianten 10 und 11 dienen wieder als instruktives scheinbares Gegenbeispiel: Da auch die Zuluft bodennah von der Fensterbrüstung aus eingebracht wird, nimmt der Luftaustauschindex stets hohe Werte an.

Noch geringer und völlig homogen ist das Luftalter bei den Komfortbrüstungsgeräten im Sommer (Var 12), die kontinuierlich lüften und kühlen.

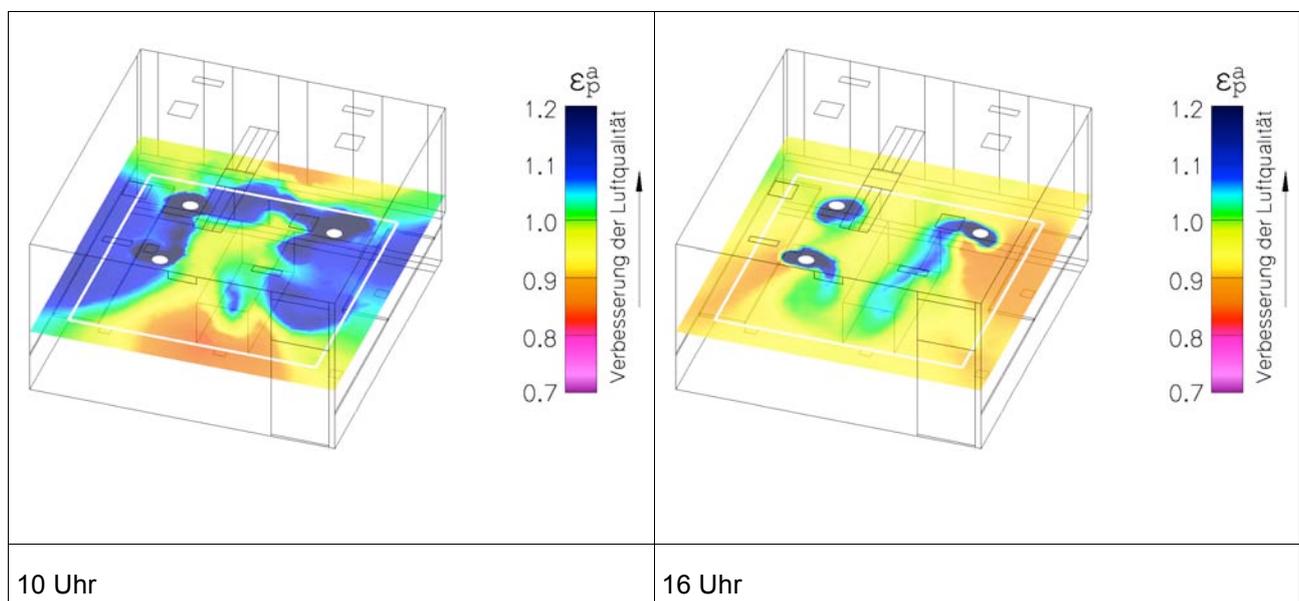
In Variante 20 (Lüftungsgitter und Deckenfancoil) unterbindet die morgendliche Aufheizphase (9 Uhr) von der Decke aus den Luftaustausch durch Ausbildung eines stabilen Warmluftpolsters in Deckennähe. Den Tag über, wenn der Fancoil nicht in Betrieb sein muss, gewährleisten das Lüftungsgitter zusammen mit dem schon erwähnten kühleren Fenster die Luftführung in die unteren Bereiche des Raumes.

Das Deckengerät mit Drallauslässen im Sommer (Var 21) und das Induktionskühlgerät (Var 22) zeigen das Merkmal einer „idealen Kühlung“: Luftaustauschindex- Werte bei 1., die ab 10 Uhr erreicht werden.

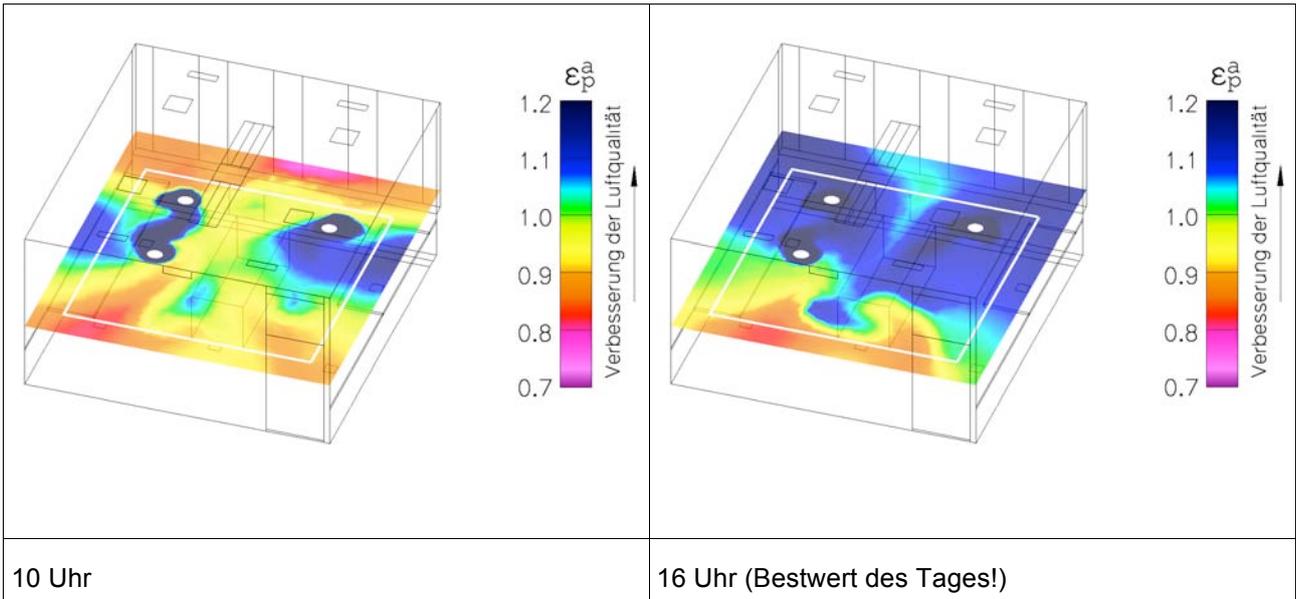
Ein instruktives scheinbares Gegenbeispiel bietet Variante 23 (Heizbalken). Hier überformt der nach der Aufheizphase ab 10 Uhr seitlich austretende Zuluftstrom die sonst auftretende Fallluftströmung an der Fensterscheibe.

Varianten 8 und 9 Luftgitter und Ventilator-konvektoren sind dysfunktional. Im Sommer (Var 8.) kühlt das Brüstungsgerät die Raumluft bodennah ab, ein stabiles Luftpolster entsteht, das die oben in den Raum eintretende isotherme Zuluft nicht nach unten gelangen lässt. Auch im Winter (Var. 9) kann ein Luftaustausch erst nach dem Ende der morgendlichen Aufheizphase mit Hilfe der Fallströmung entlang der Fensterscheibe in Gang kommen.

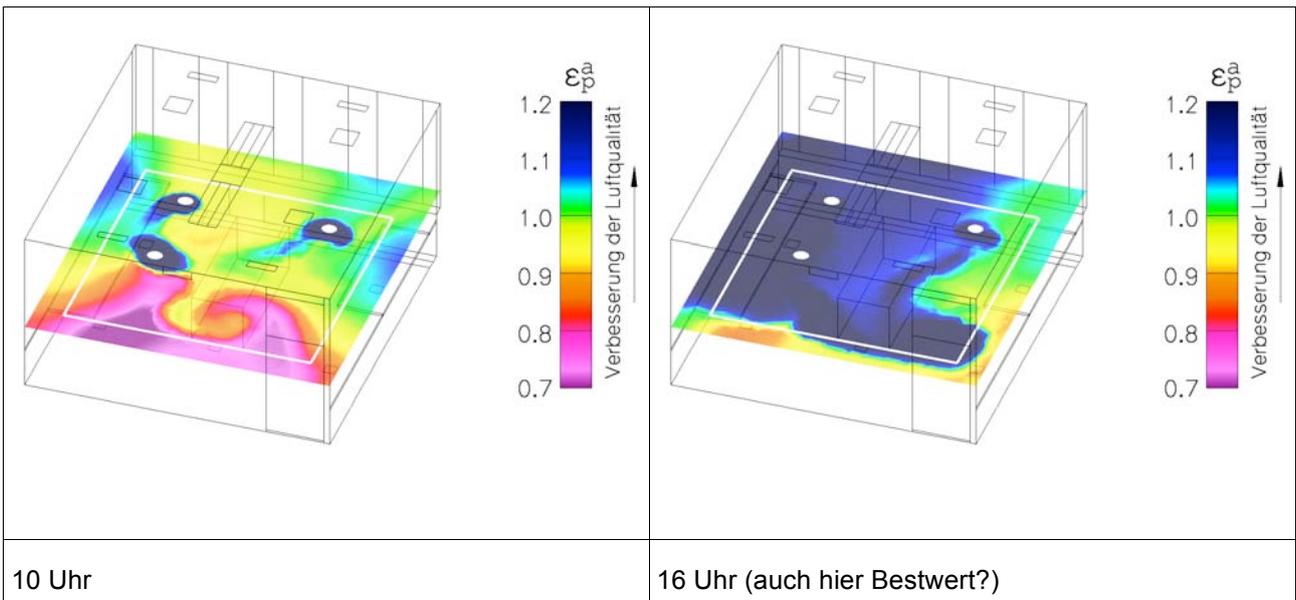
#### 4.26.3 Übersicht über die Simulationsvarianten



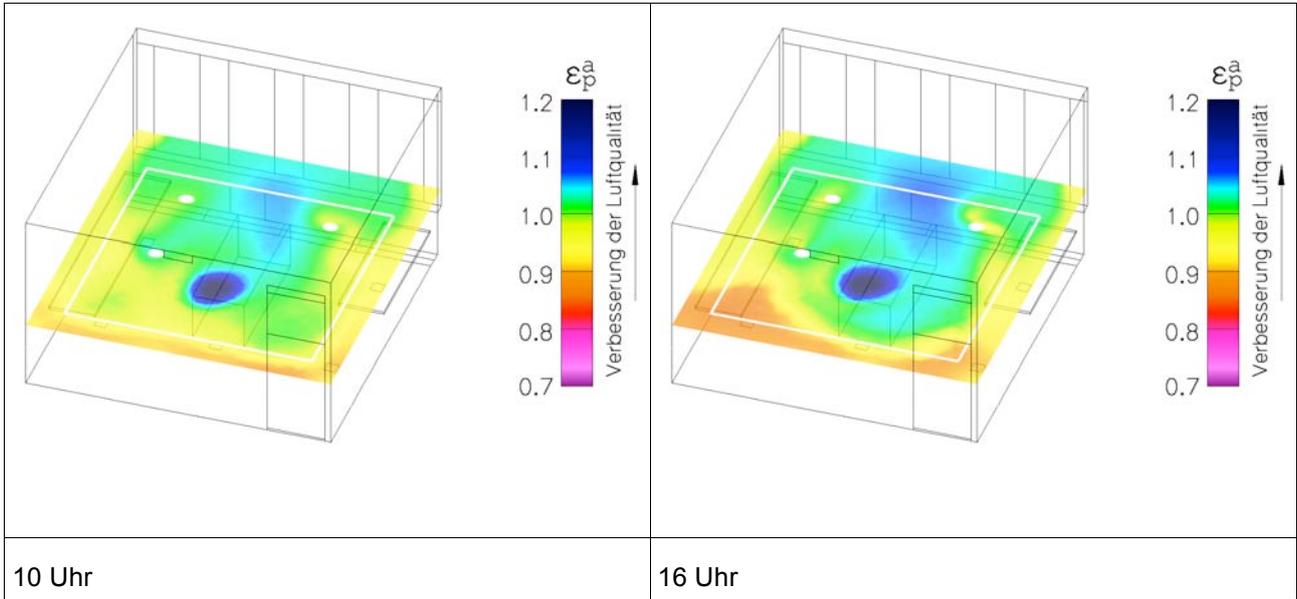
Var 1: PL4 F1D Sommer: Quelllüftung und Putzkühldecke mit Kapillarrohrrmatte



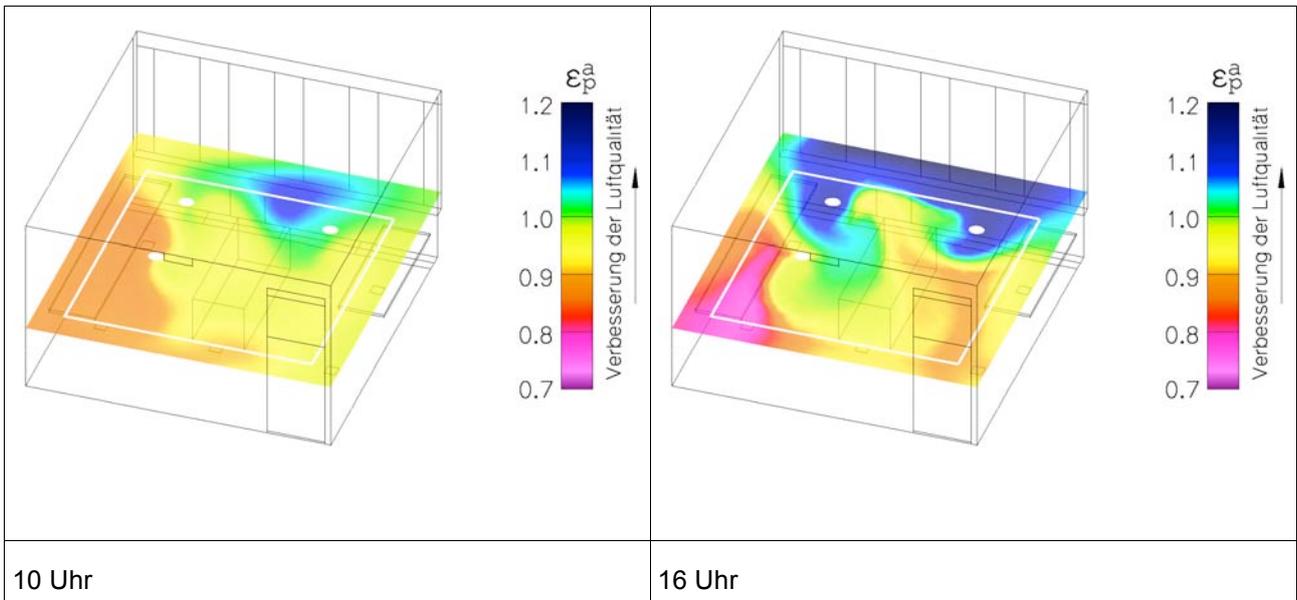
Var 2: PL5 F1D Sommer: Drallauslässe im Boden und Putzkühldecke mit Kapillarrohrrmatte



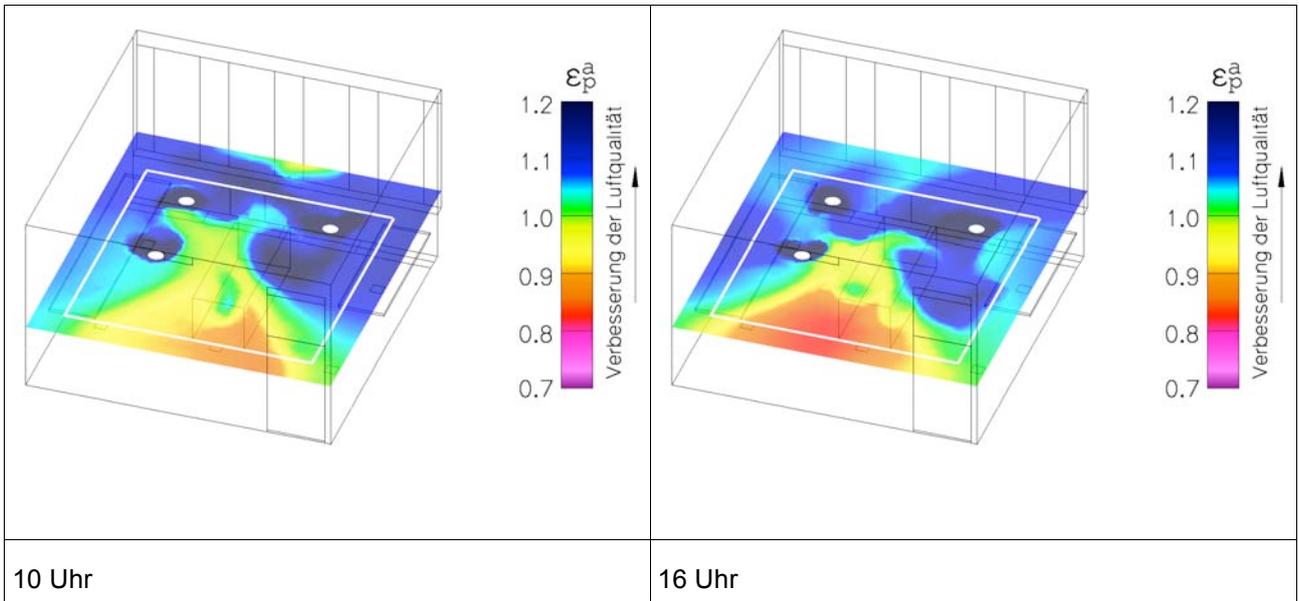
Var 3: PL5 F1D Winter: Drallauslässe im Boden und Putzheizdecke mit Kapillarrohrrmatte



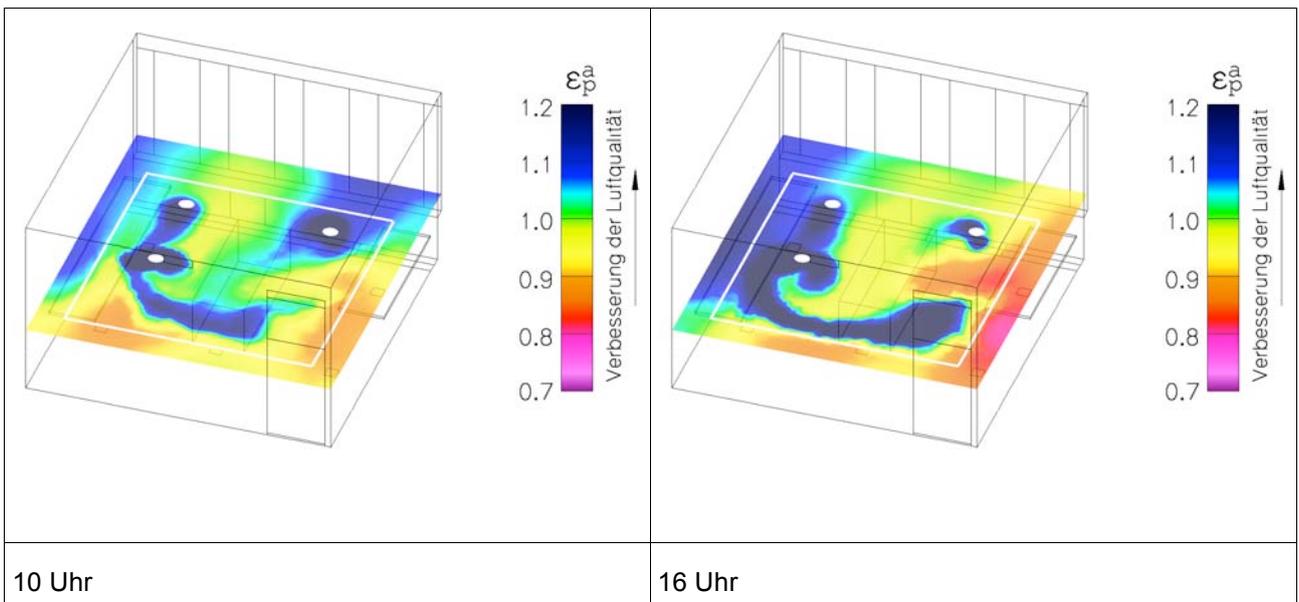
Var 4: PL2 F5A Sommer: Lüftungsgitter und Fußbodenkühlung



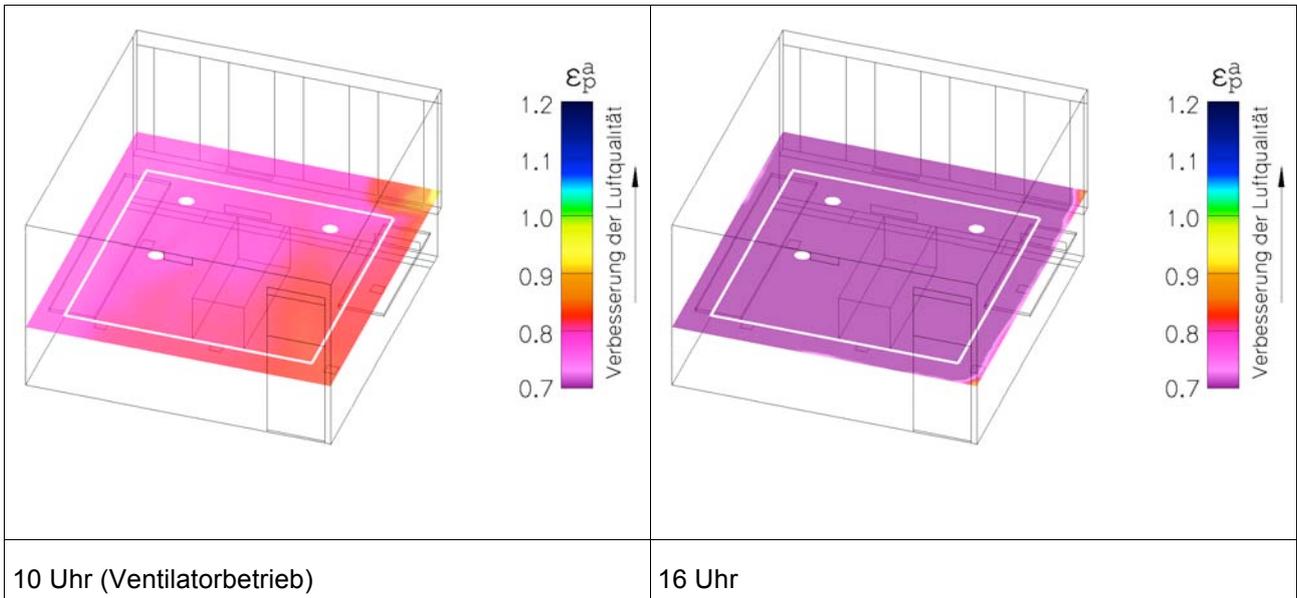
Var 5: PL2 F5A Winter: Lüftungsgitter und Fußbodenheizung



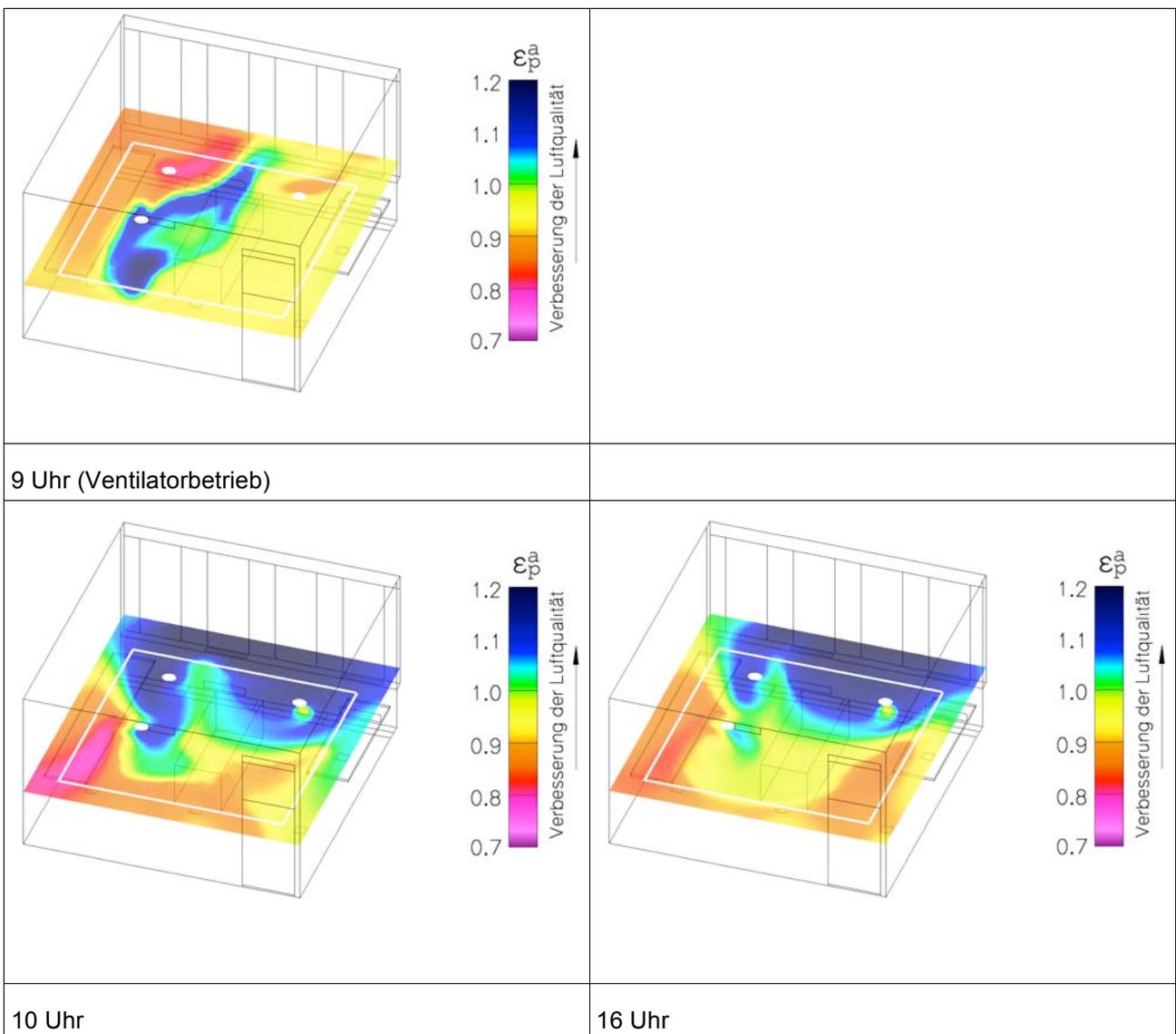
Var 6: PL4 F2A Sommer: Quelllüftung und Betonkernaktivierung



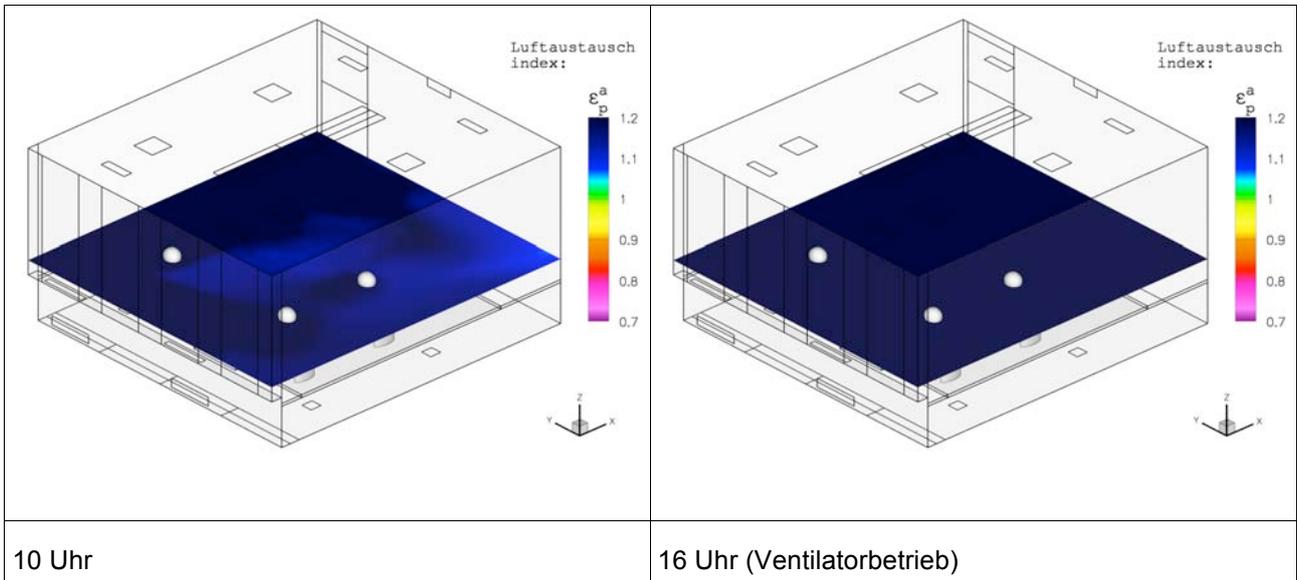
Var 7: PL4 F2A Winter: Quelllüftung und Betonkernaktivierung



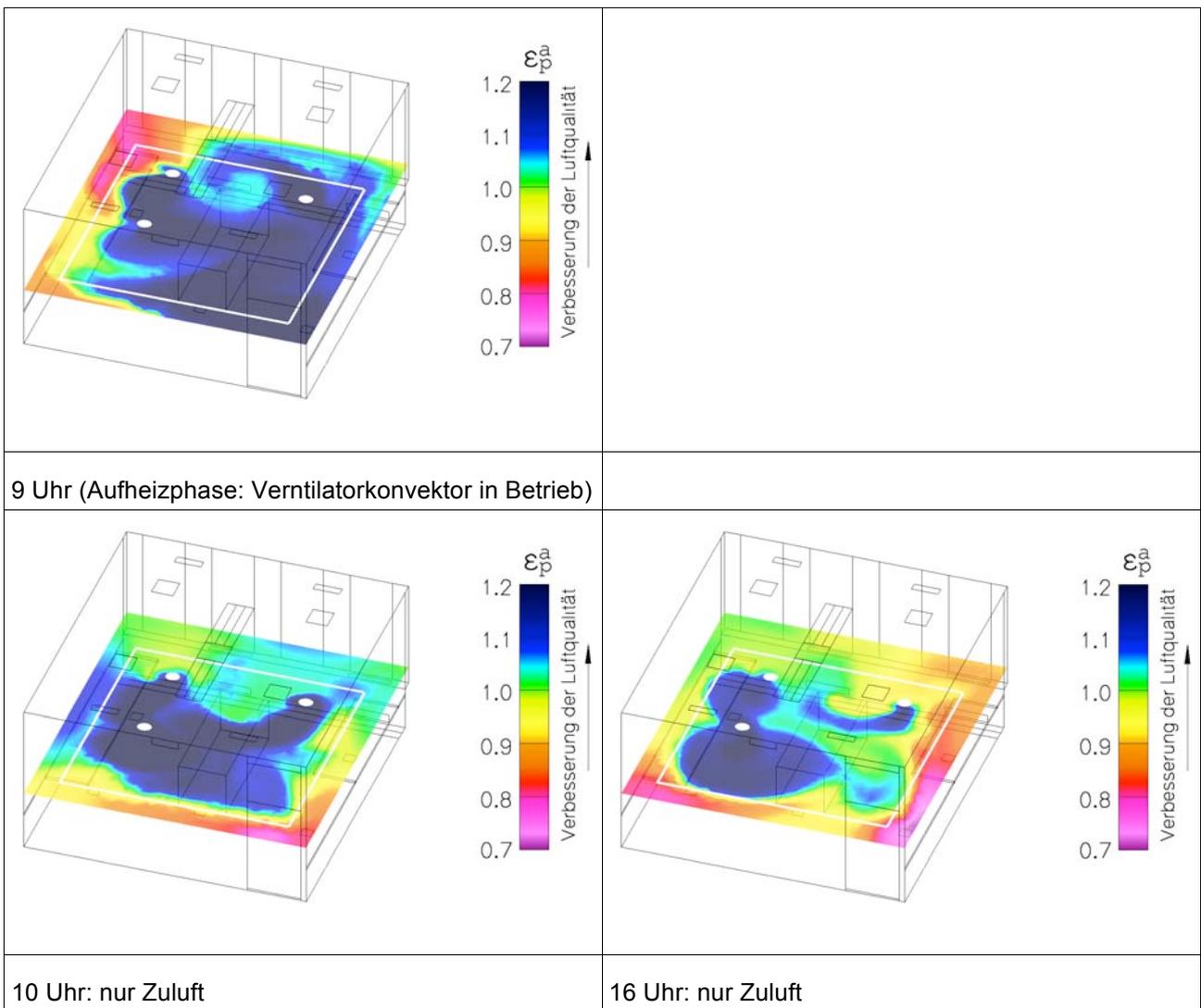
Var 8: PL2 L1A Sommer: Lüftungsgitter und Ventilator-konvektoren



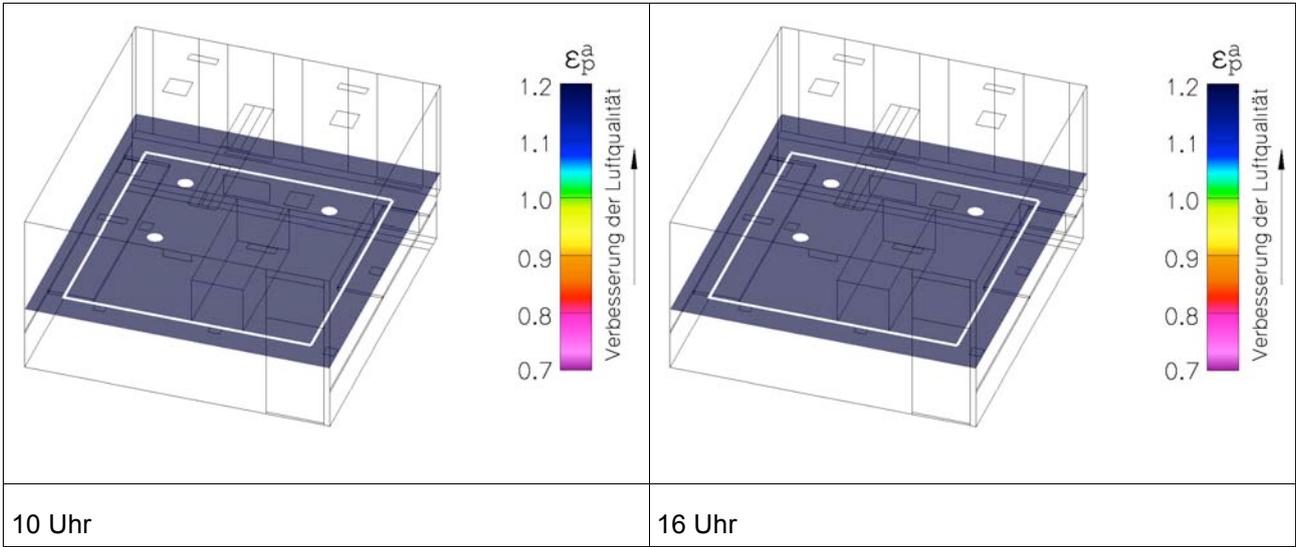
Var 9: PL2 L1A Winter: Lüftungsgitter und Ventilator-konvektoren



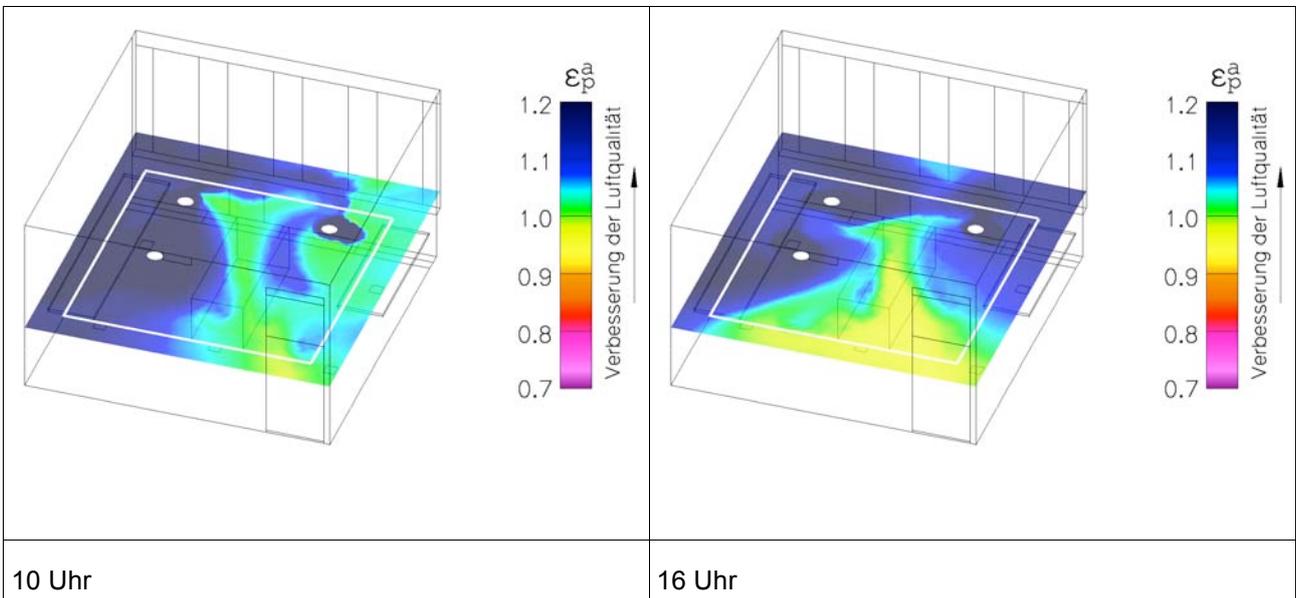
Var 10: L1A Sommer: Ventilatorkonvektoren mit Primärluftanteil



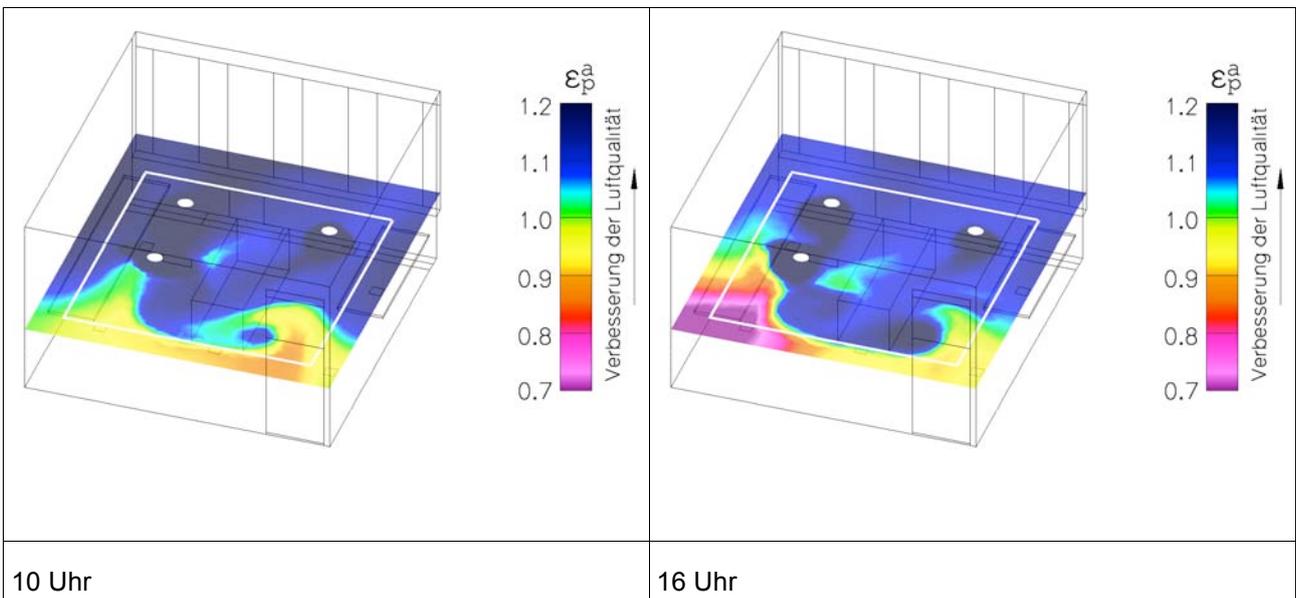
Var 11: L1A Winter: Ventilatorkonvektoren mit Primärluftanteil



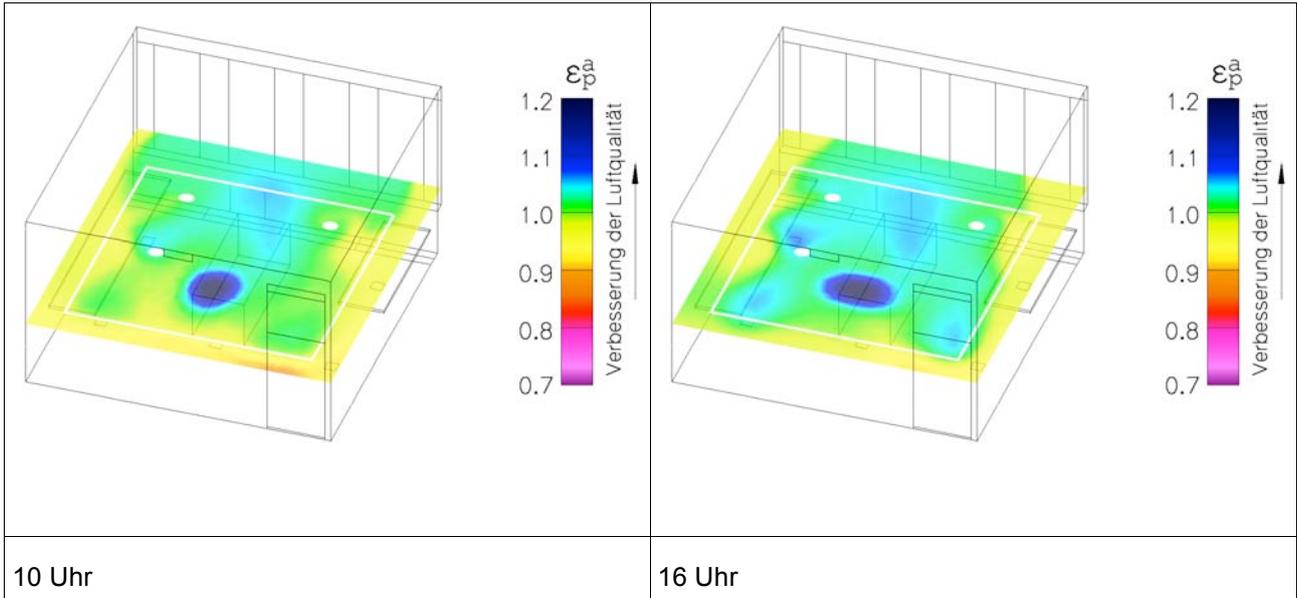
Var 12: L1B Sommer: Ventilator-konvektoren Komfortbrüstungsgeräte



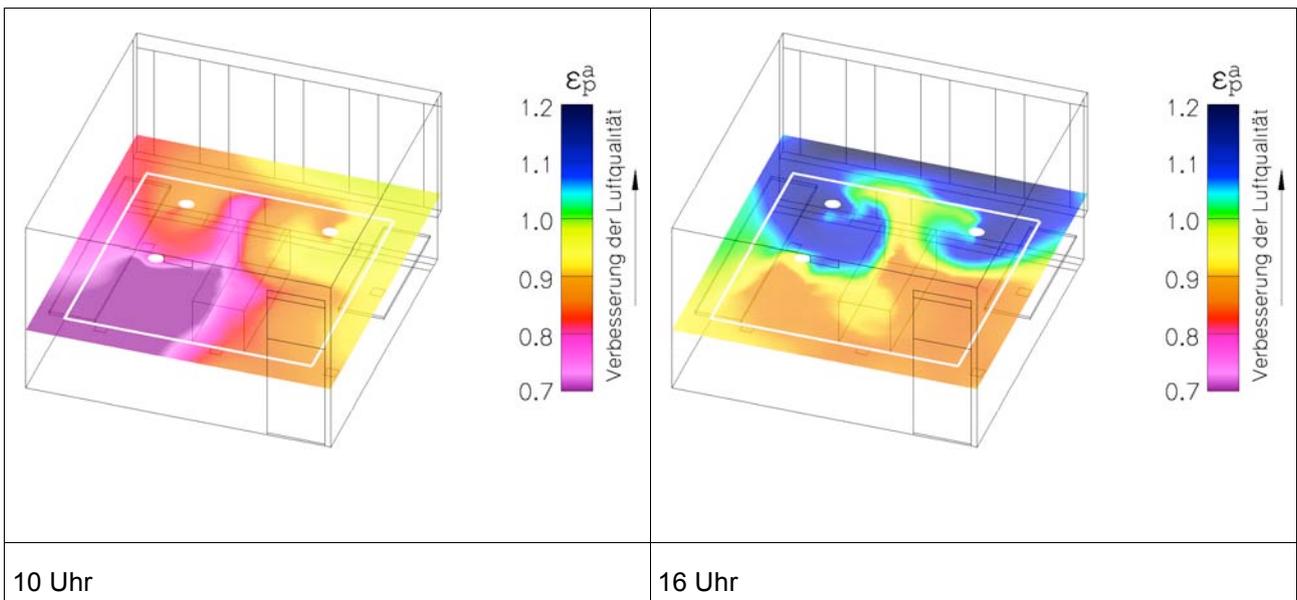
Var 13: PL5 F2A Sommer: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung



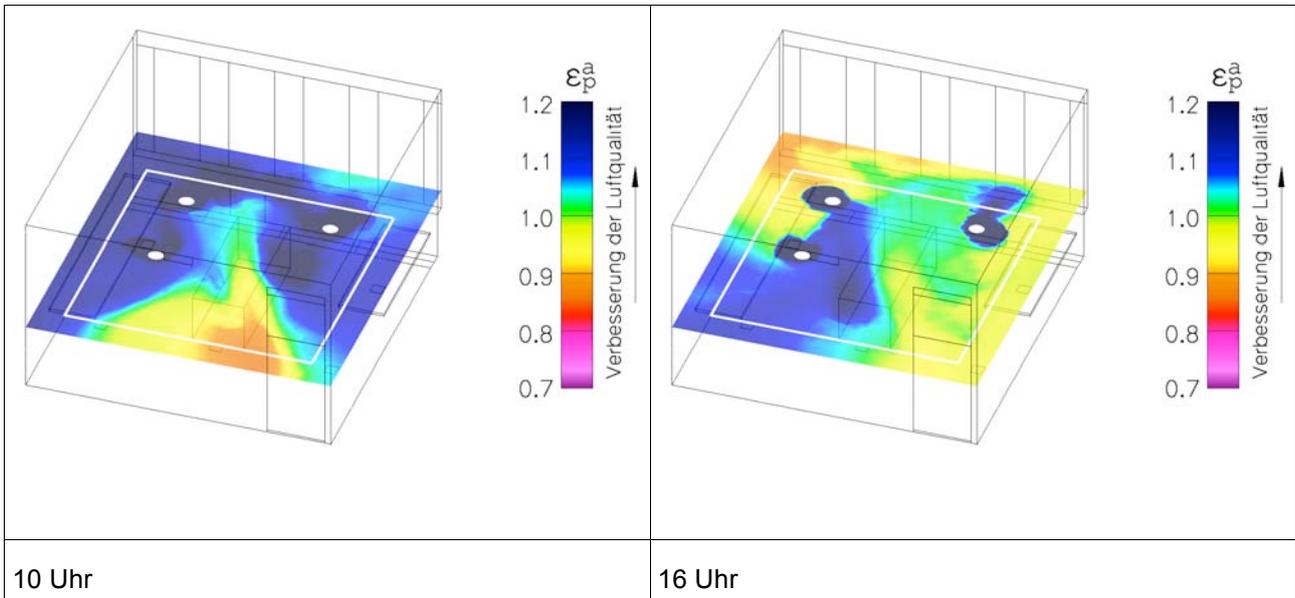
Var 14: PL5 F2A Winter: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung



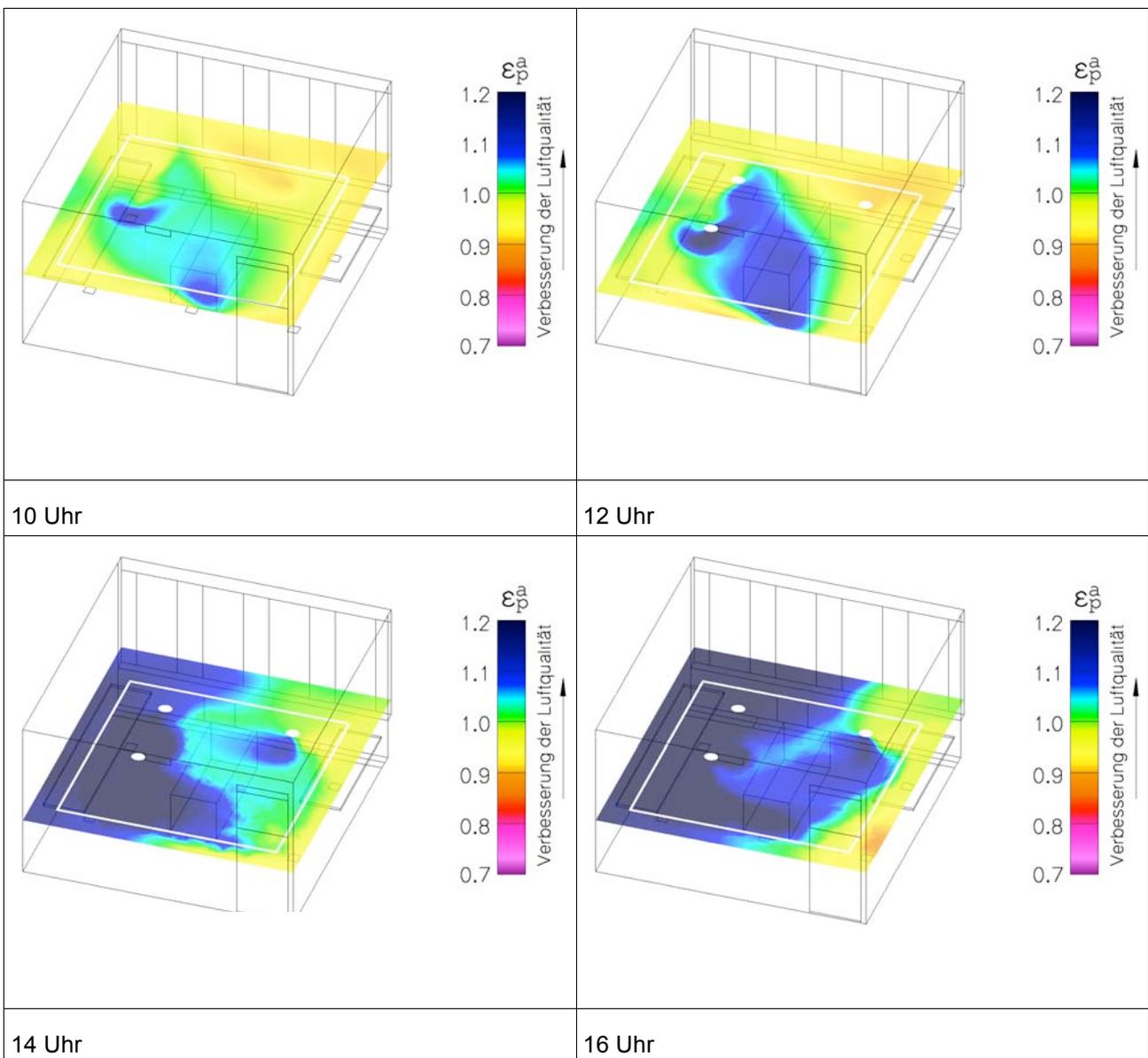
Var 15: PL2 F2A Sommer: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung



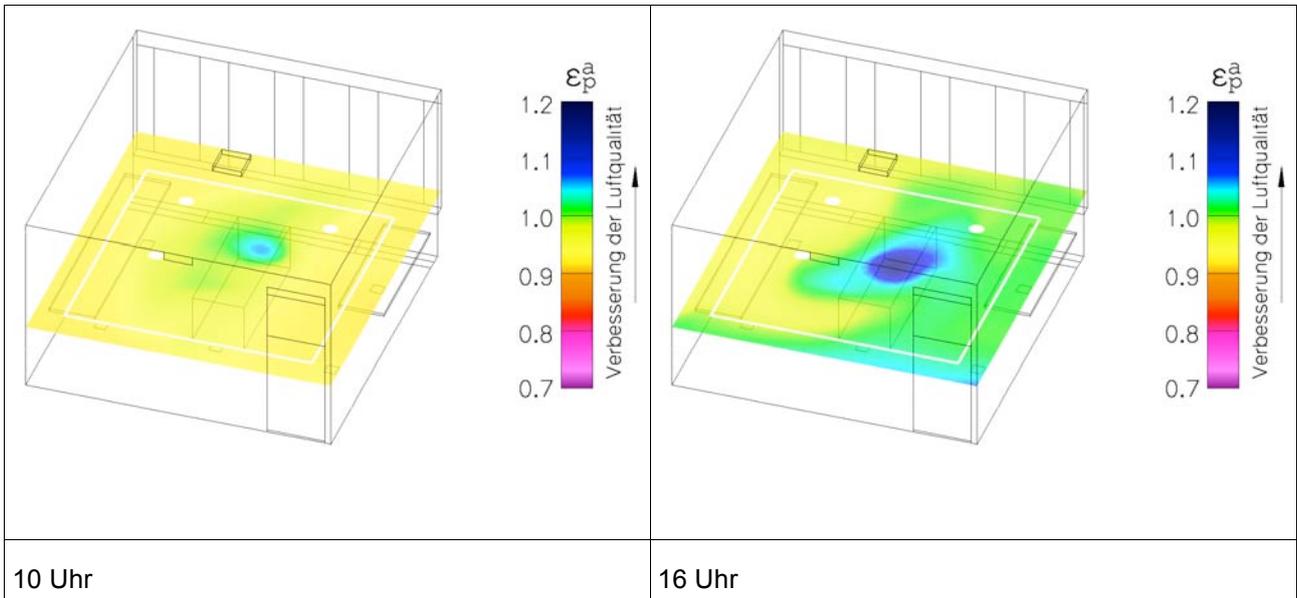
Var 16: PL2 F2A Winter: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung



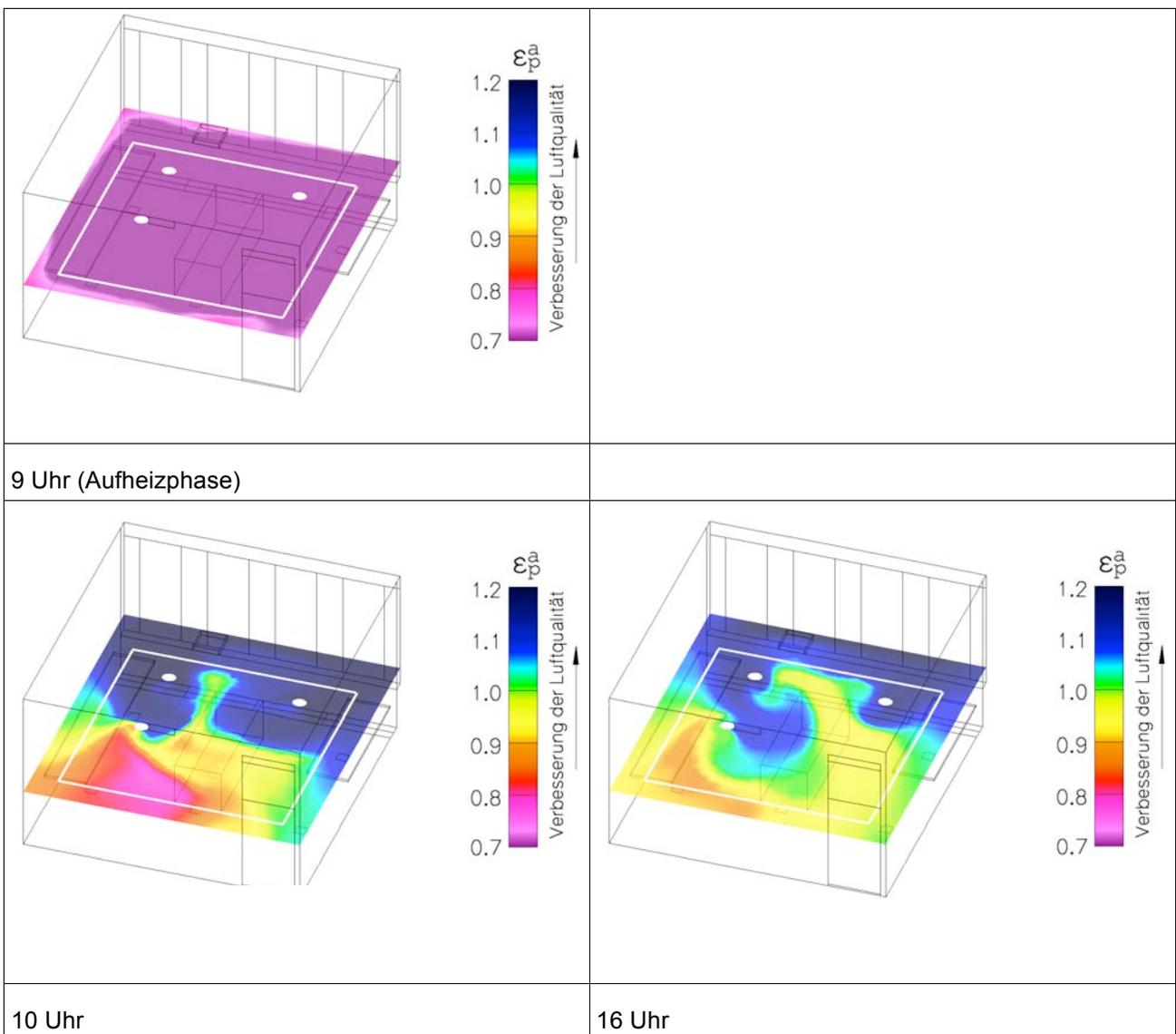
Var 17: PL4 F5A Sommer: Quelllüftung und Fußbodenkühlung



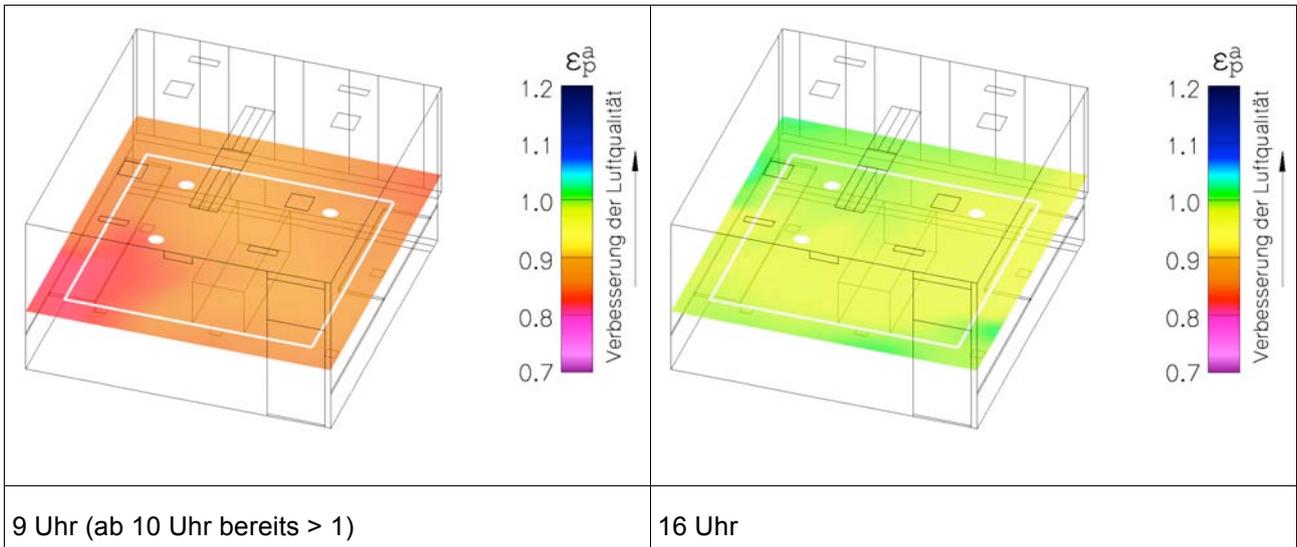
Var 18: PL4 F5A Winter: Quelllüftung und Fußbodenheizung



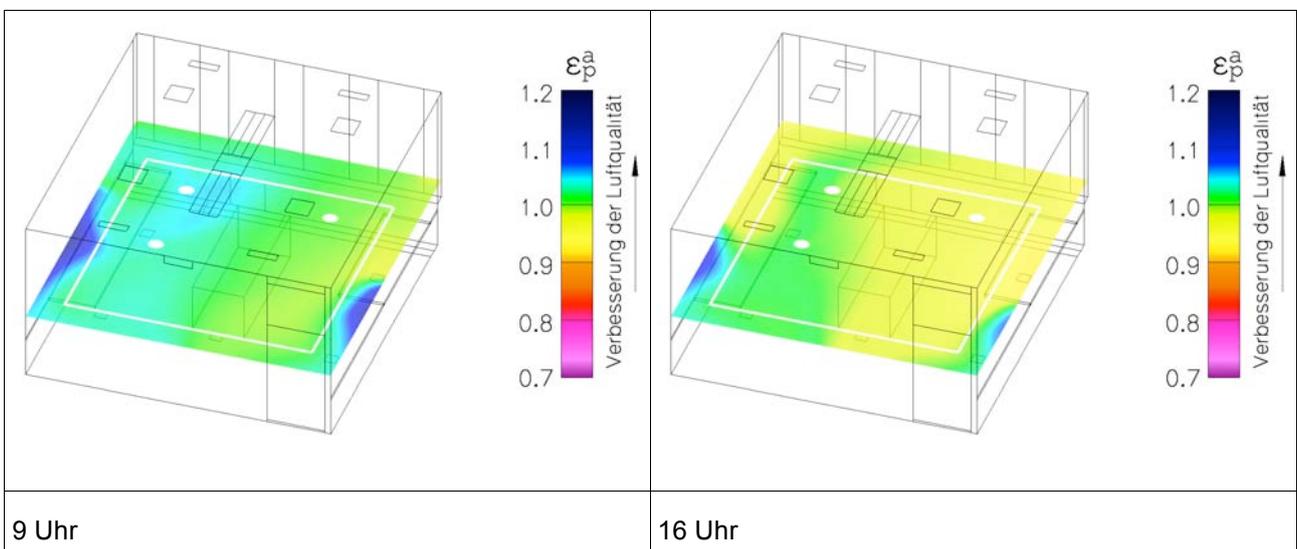
Var 19: PL2 L2 Sommer: Lüftungsgitter und Deckenfancoil



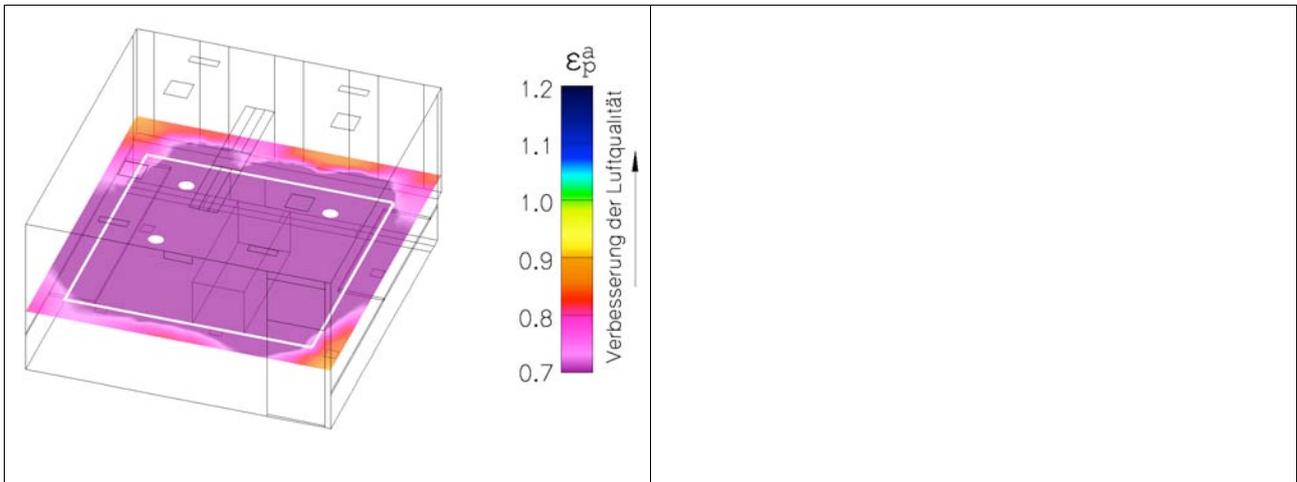
Var 20: PL2 L2 Winter: Lüftungsgitter und Deckenfancoil



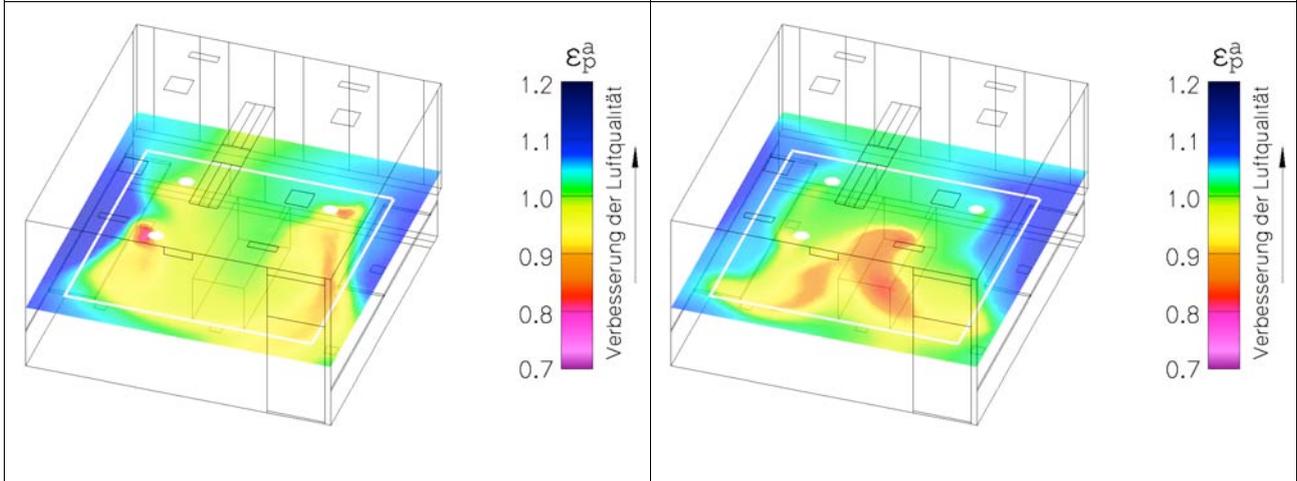
Var 21: L3 Sommer: Deckeneinbaugerät mit Drallauslässen



Var 22: FL1 Sommer: Induktionskühlgerät (Kühlbalken)

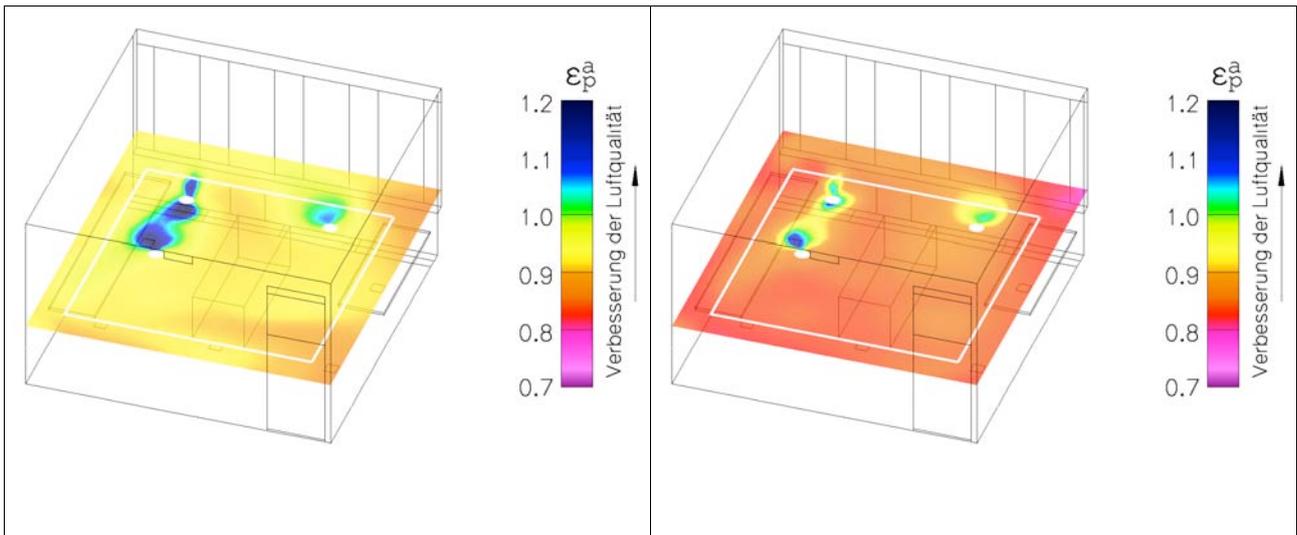


9 Uhr (Aufheizphase)



10 Uhr 16 Uhr

Var 23: FL1 Winter: Induktionsheizgerät (Heizbalken)



14 Uhr 10 Uhr

Var 24: PL4 F3 Sommer: Kühlsegel mit Quellluftauslass

## 4.27 Einzelauswertung Zugluft im Nacken

Diskomfort wegen Zugluft im Bereich des Nackens (DR) ist eine der Kategorien des lokalen Diskomfort den die ÖNORM EN ISO 7730:2006 ausweist. Im folgenden werden die simulierten Haustechnikvarianten mit Vertikalschnitten durch die Position der Personen und Horizontalschnitt in 1,1 m Höhe zu verschiedenen Zeiten des Tages, wie angegeben, überprüft.

Werte für DR < 10 % sind mit der Komfortklasse A vereinbar. In diesen Bereich fallen fast alle untersuchten Varianten, mit Ausnahme von: 8, 9, 10, 19 und 21. Bei diesen Varianten werden zusätzlich Abbildungen gezeigt, in denen die Komfortklassen farblich voneinander abgegrenzt sind.

### 4.27.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei Systemen mit Flächenkühlung oder Flächenheizung in Verbindung mit bodennaher Zuluft einbringung gibt es keine Zugluftprobleme. Das gilt für Deckensysteme und Fußbodensysteme gleichermaßen. Aber auch mit einem Lüftungsgitter (Variante 15) tritt nur lokal, abseits der Arbeitsplätze, Zugluft auf.

Wird die benötigte Kälte und Wärme über die Luft zugeführt, differenziert sich das Bild.

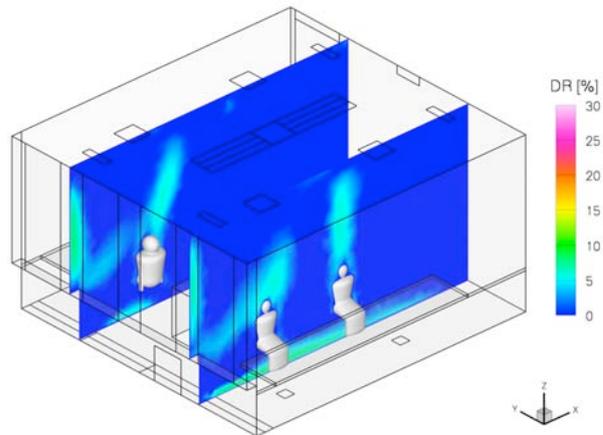
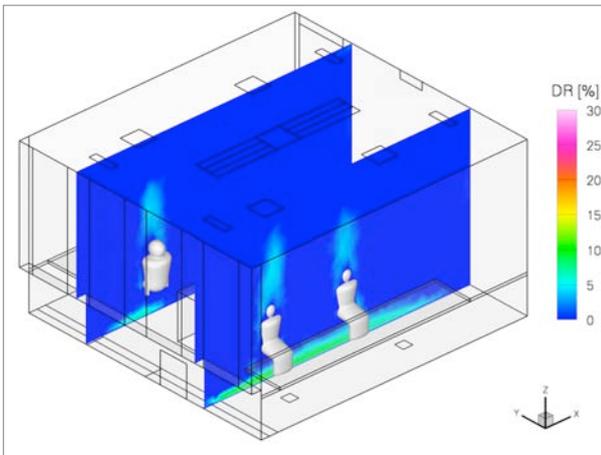
Im Winter muss die Luftheizung bei den untersuchten Varianten nur an den Tagesrändern in Betrieb sein. Die Bürozeiten bleiben von Zugluft verschont. Wir sind aber von fixen Bürozeiten ausgegangen. Sind die Bürozeiten variabel, so können MitarbeiterInnen, die früher kommen oder abends länger bleiben, von Komfortminderungen durch Zugluft betroffen sein.

Im Sommer ist der Kühlbetrieb bei unseren Simulationen den ganzen Tag über notwendig. Dabei sind jene Geräte im Vorteil, die einen geringen Volumenstrom kontinuierlich erzeugen (Variante 12). Hier kommt es im Bereich der Knöchel, aber nicht im Bereich des Nackens zu Zugluftrisiko.

Relativ zugluftarm sind auch Systeme, bei denen die Zuluft bodennah eingebracht wird (Variante 10) und solche bei denen der Umluftstrom von der Decke aus in Richtung der Wände gelenkt wird. (Variante 22).

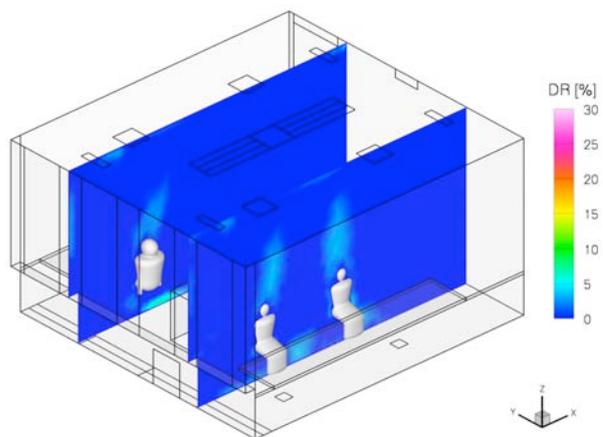
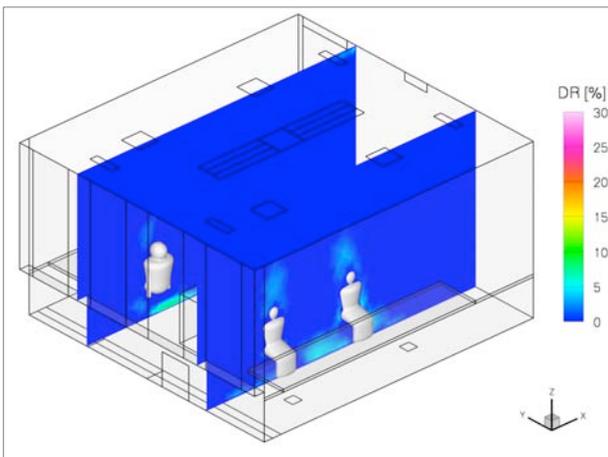
Bei den übrigen Systemen, die aufgrund ihrer großen Kapazität in einen Taktbetrieb übergehen (Varianten 8, 10, 19, 21 und 22) kann im Kühlbetrieb Zugluffreiheit nicht erwartet werden.

## 4.27.2 Übersicht über die Simulationsvarianten

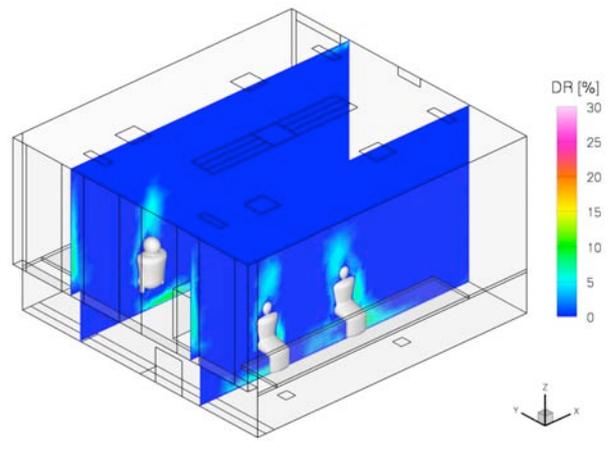
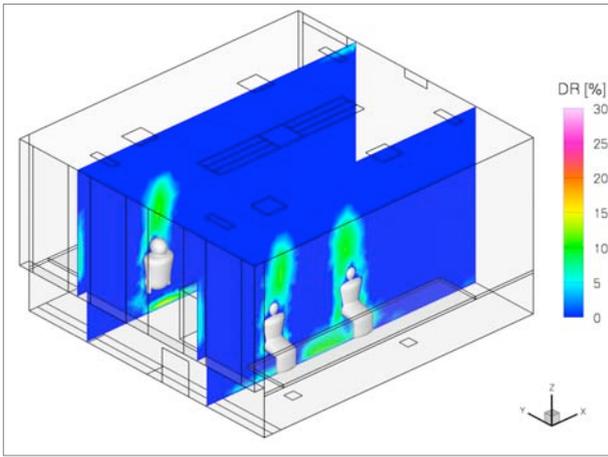


Var. 1: PL4 F1D Sommer: Quelllüftung und Putzkühldecke mit Kapillarrohrrmatte. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts).

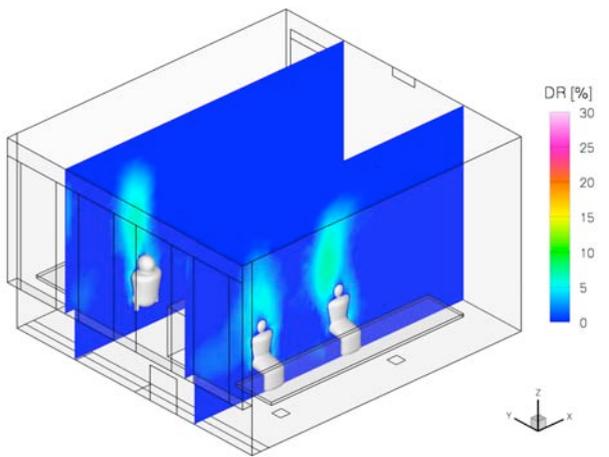
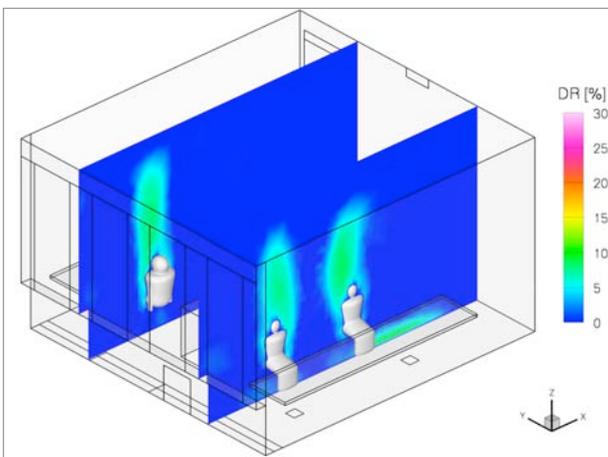
Das Zugluftrisiko in diesen und in den meisten folgenden Simulationsvarianten ist nicht nur sehr gering, sondern es ist eigentlich gar keines, da die Luftbewegung von der Wärme der Personen ausgeht.



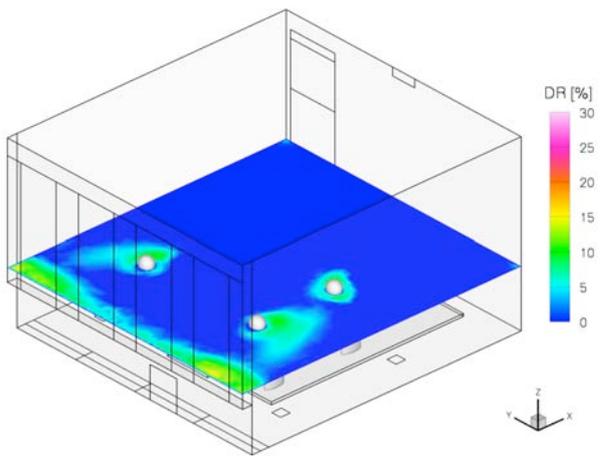
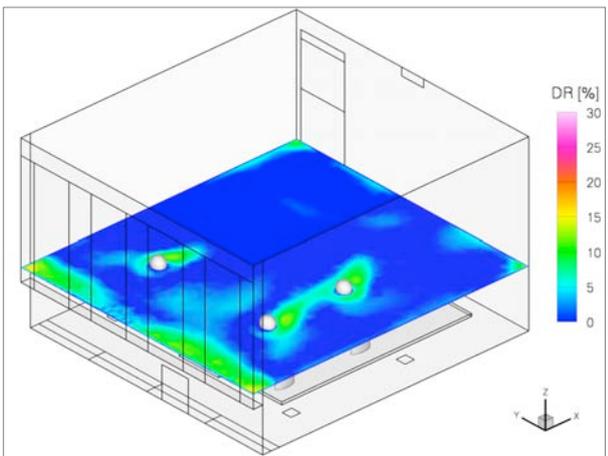
Var. 2: PL5 F1D Sommer: Drallauslässe im Boden und Putzkühldecke mit Kapillarrohrrmatte. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)



Var. 3: PL5 F1D Winter: Drallauslässe im Boden und Putzheizdecke mit Kapillarrohrmatte. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

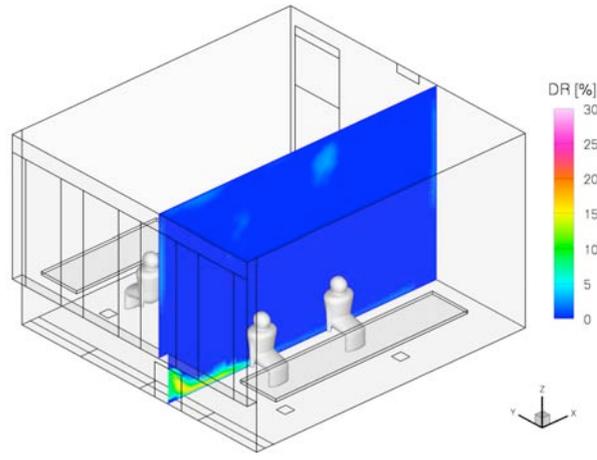
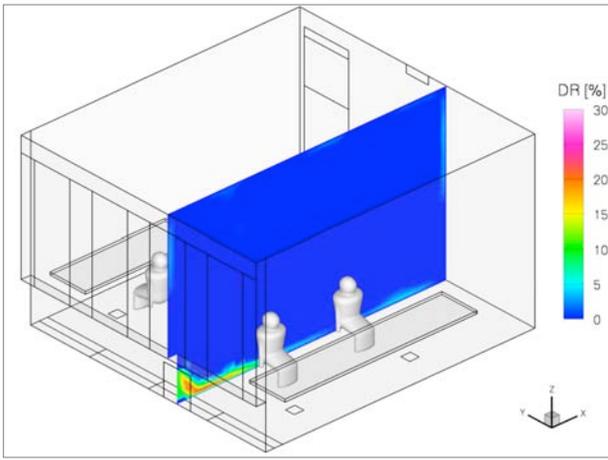


Var. 4: PL2 F5A Sommer: Lüftungsgitter und Fußbodenkühlung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

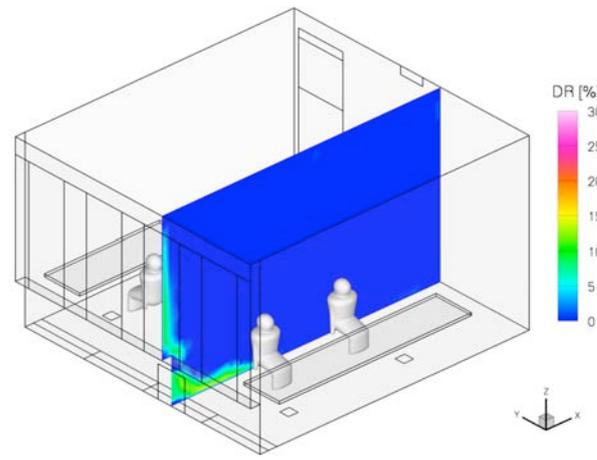
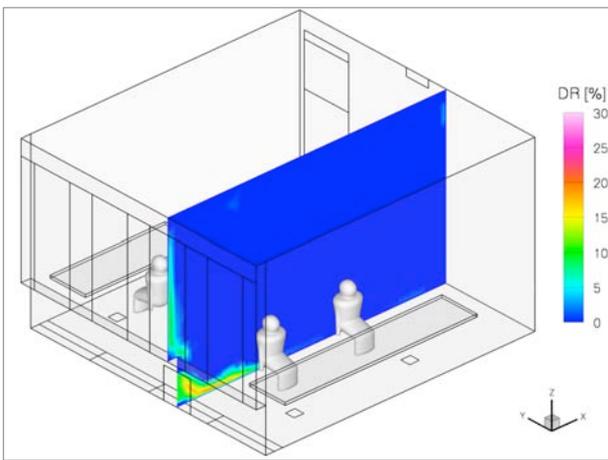


Var. 5: PL2 F5A Winter: Lüftungsgitter und Fußbodenheizung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

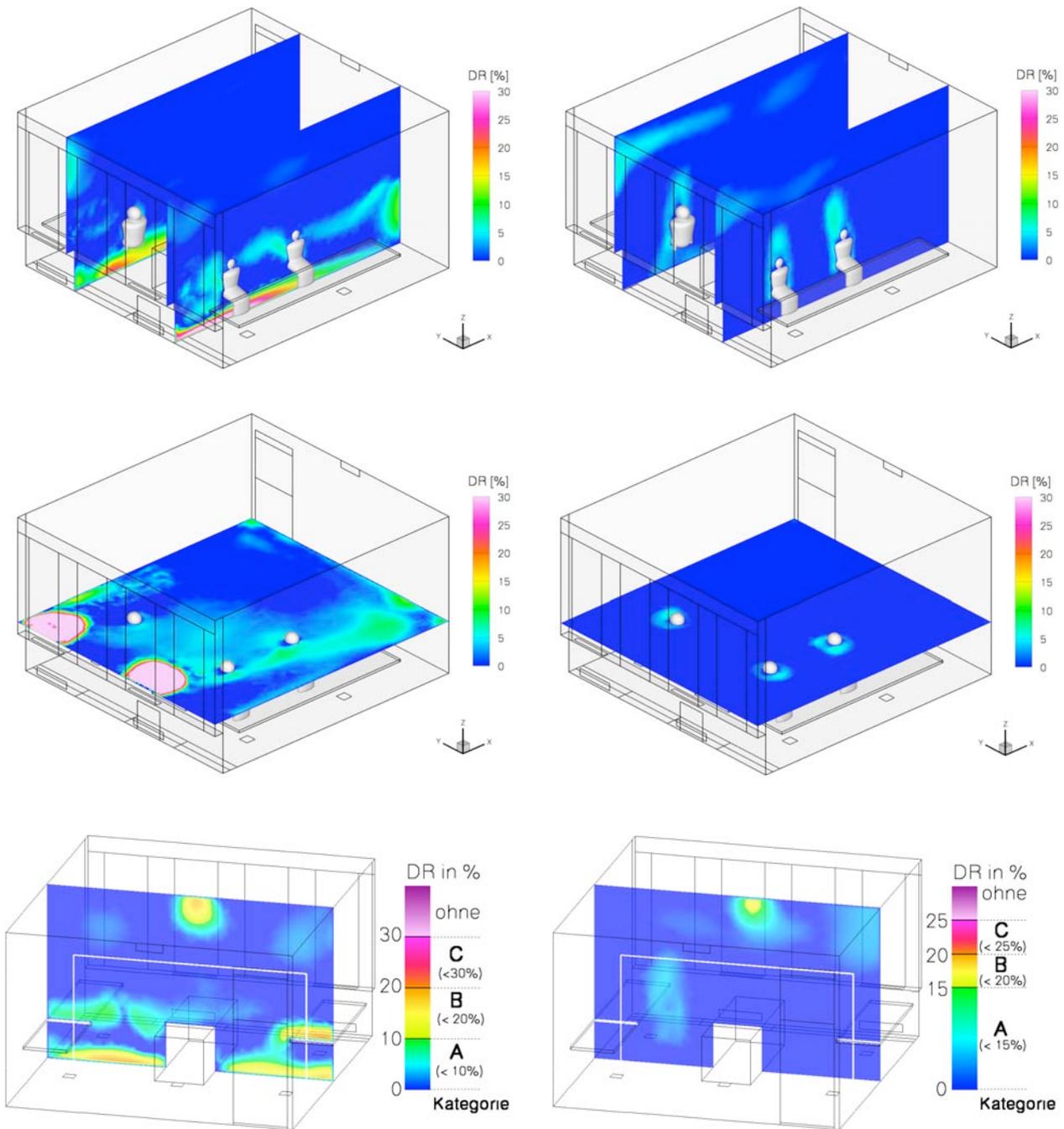
In Fensternähe ist die Fallströmung entlang der kühleren Fensterscheiben sichtbar.



Var. 6: PL4 F2A Sommer: Quelllüftung und Betonkernaktivierung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

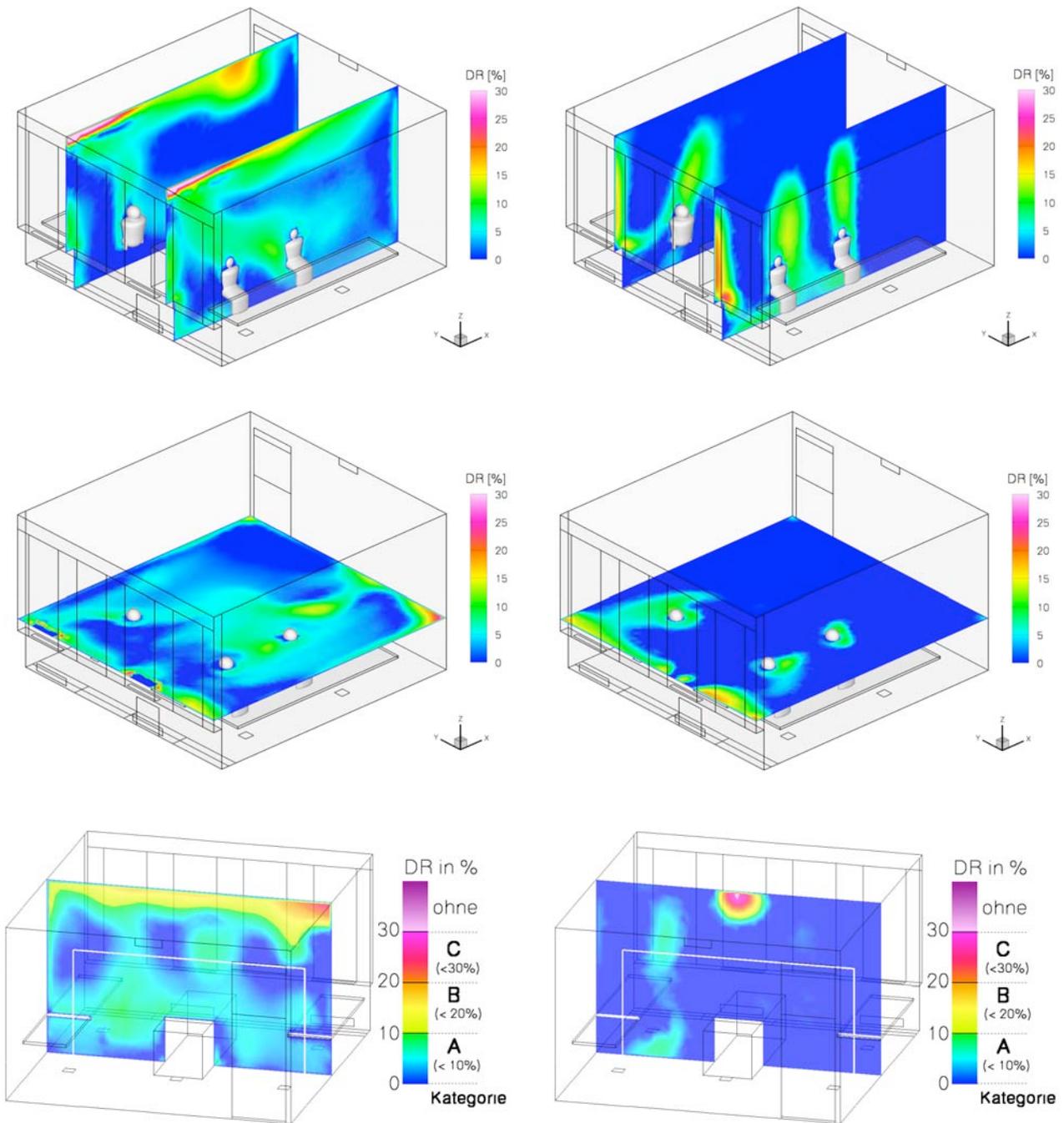


Var. 7: PL4 F2A Winter: Quelllüftung und Betonkernaktivierung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)



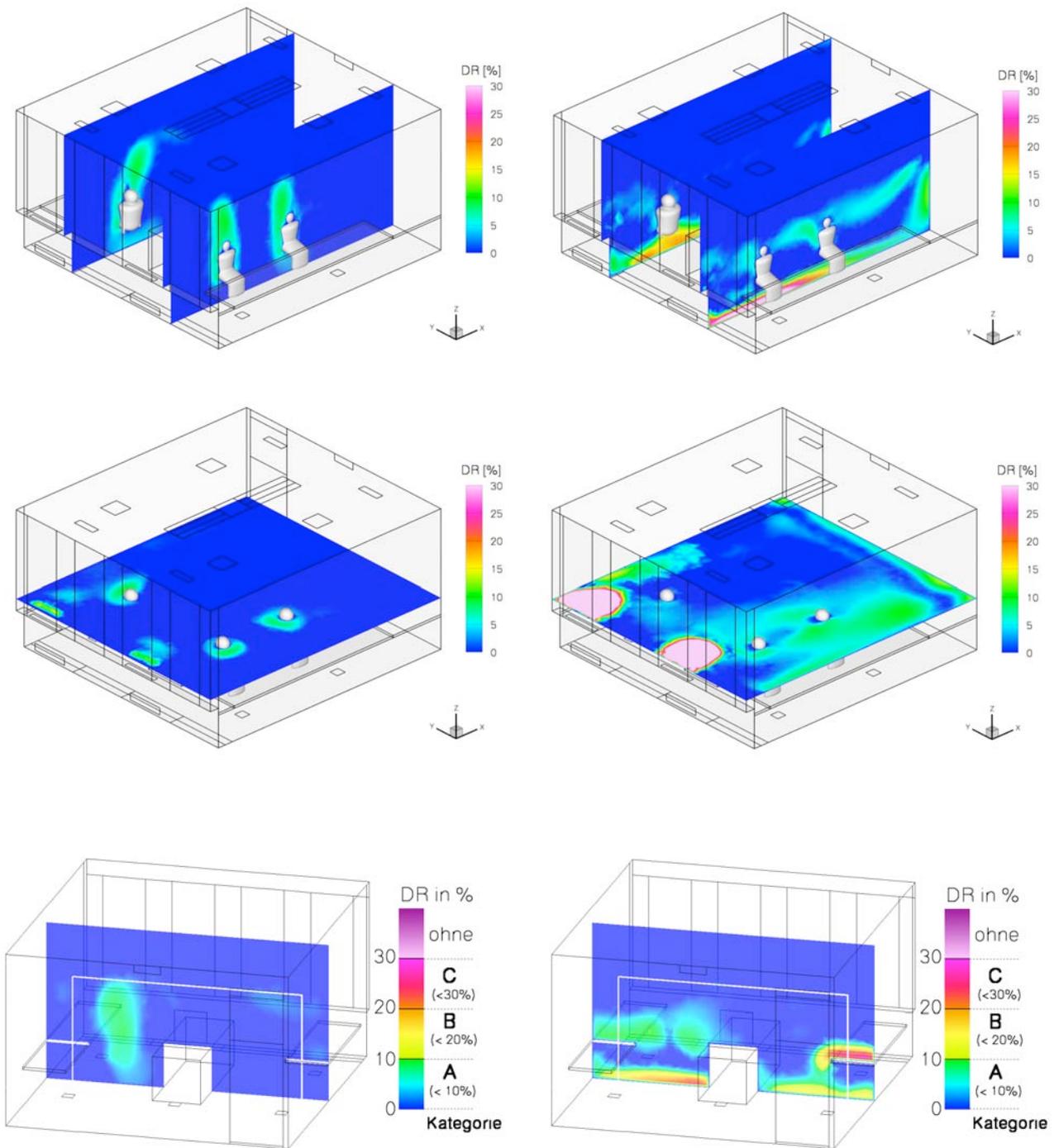
Var. 8: PL2 L1A Sommer: Lüftungsgitter und Ventilatorkonvektoren.10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

Beim Betrieb der Ventilatorkonvektoren um 10 Uhr ist im Bereich der Knöchel Zugluftrisiko bis 25 % gegeben. Aber auch im Bereich des Nackens wird ein Zugluftrisiko sichtbar, das mit der Komfortklasse A nur mehr knapp vereinbar ist (unten).



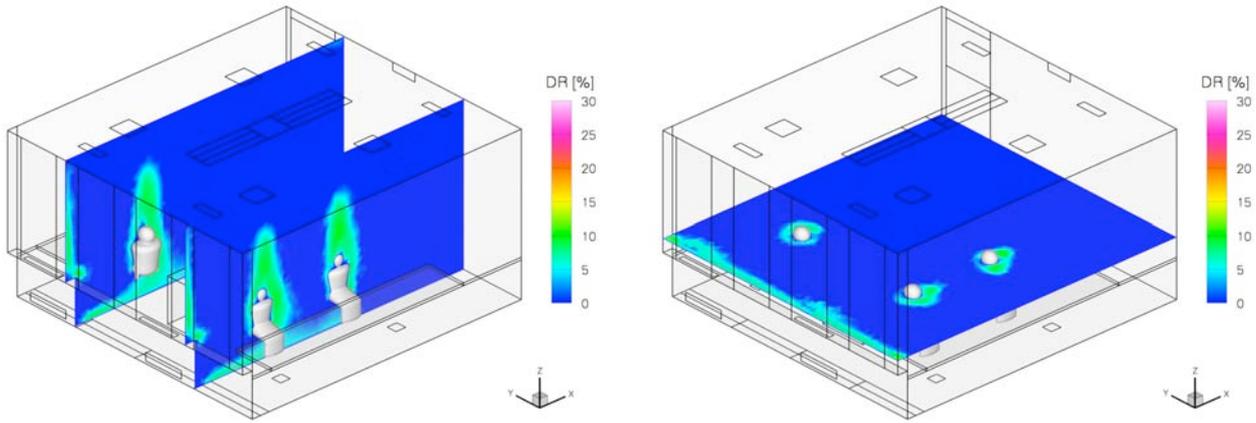
Var. 9: PL2 L1A Winter: Lüftungsgitter und Ventilatorconvektoren. 9 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

Beim Betrieb der Ventilatorconvektoren um 9 Uhr treten Luftströmungen auf, die ein Zugluftisiko  $DR > 10\%$  bewirken. Um 16 Uhr, wenn nur das Lüftungsgitter mit der Frischluftversorgung in Betrieb ist, ist vor allem der Luftstrom zentral an der Decke zu sehen (rechts unten), von dem die sitzenden Personen nicht betroffen sind.



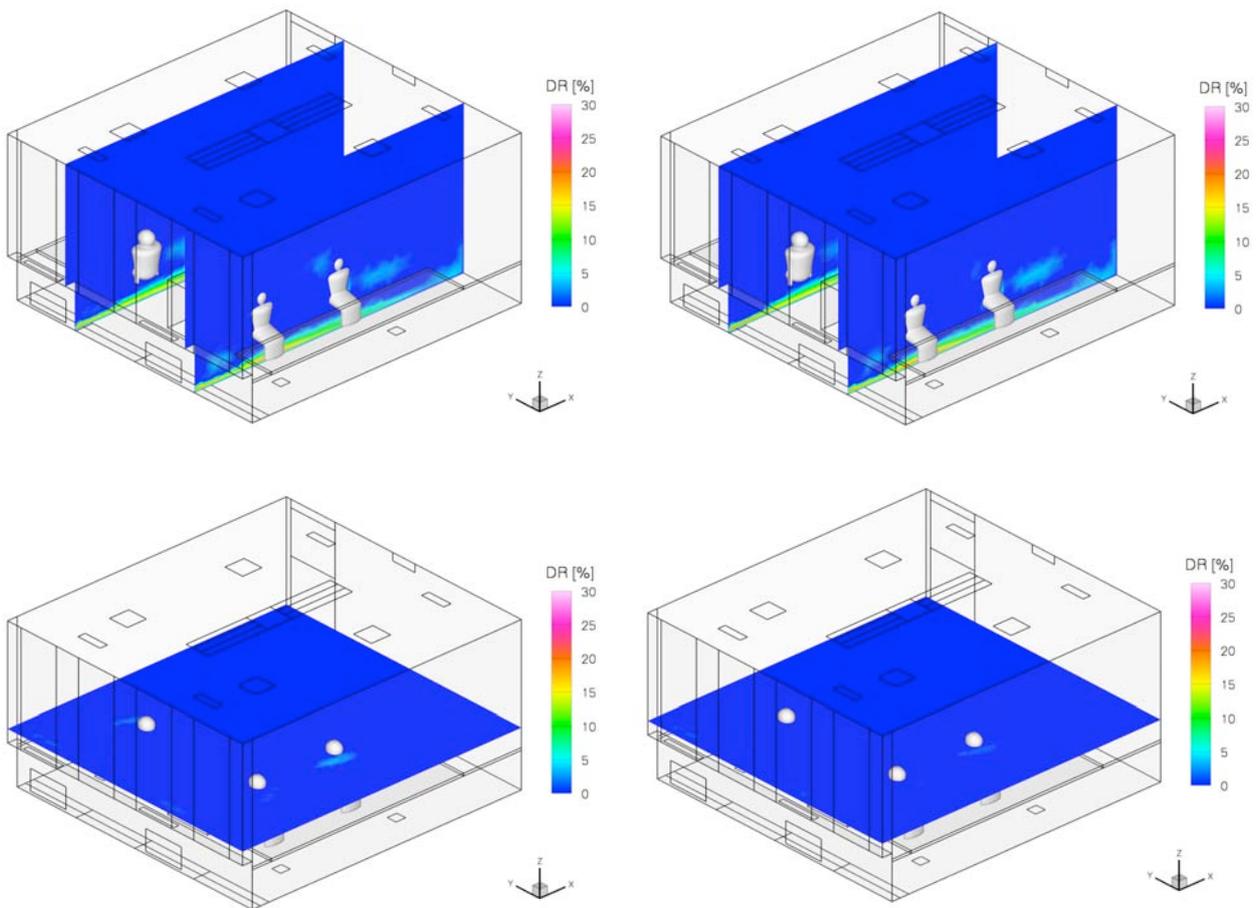
Var. 10: L1A Sommer: Ventilator-konvektoren mit Primärluftanteil. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

Bei Betrieb der Ventilatoren (hier: 16 Uhr) wird die Grenze der Komfortklasse A erreicht oder knapp überschritten. Die Ventilator-konvektoren sind den ganzen Tag über mit einer Taktung von ca. 30 Minuten im Umluftbetrieb. In den dazwischenliegenden Zeiten (hier: 10 Uhr) wird lediglich die Primärluftzufuhr aufrechterhalten.



Var. 11: L1A Winter: Ventilator-konvektoren mit Primärluftanteil. 10 Uhr

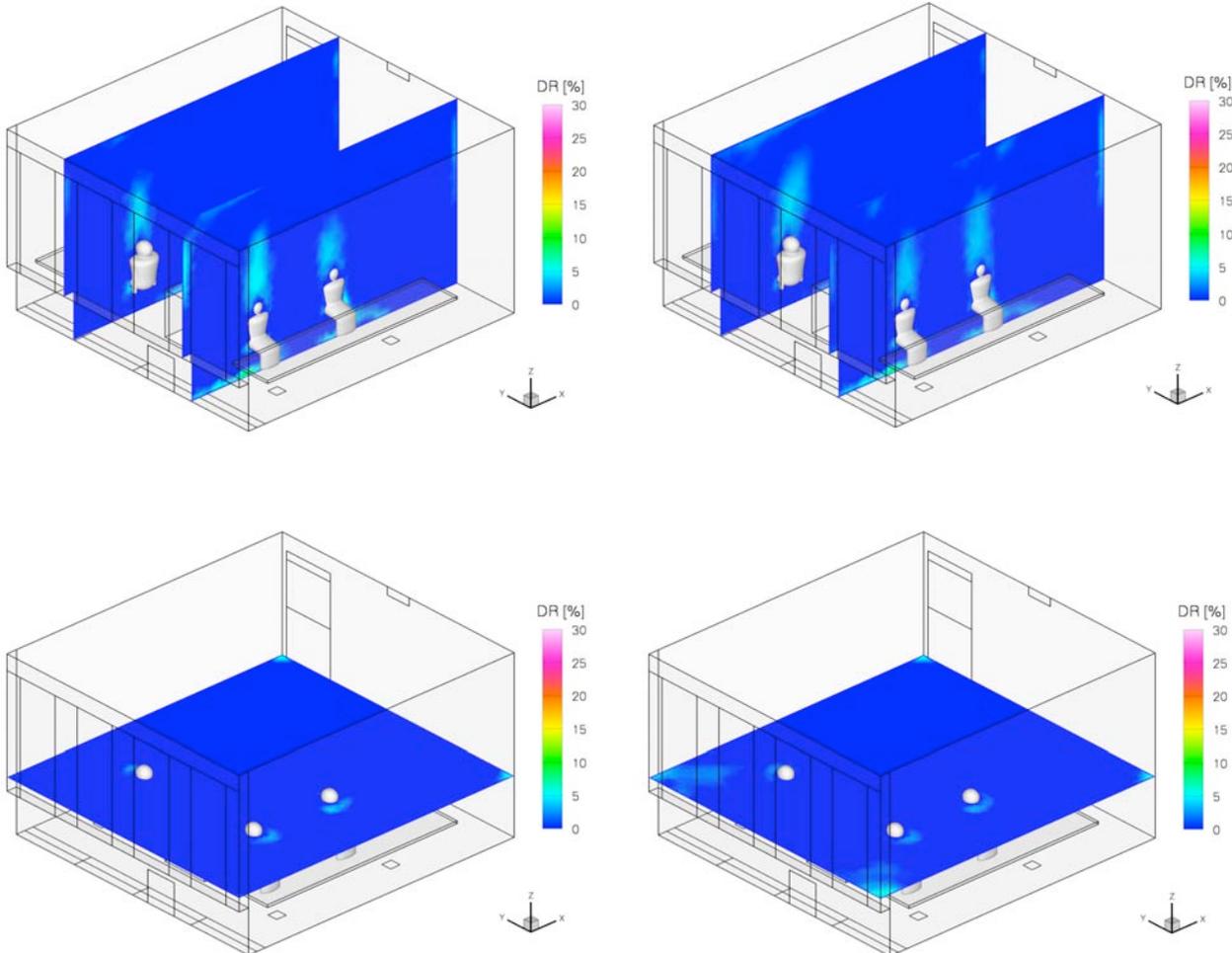
Zum gezeigten Zeitpunkt 10 Uhr ist lediglich Primärluftbetrieb ohne Zugluftisiko. Im Winter ist der Heizbetrieb mit Umluftventilation im Unterschied zum Sommer nur außerhalb der Betriebszeiten morgens und abends nötig, sodass die gezeigte problemlose Situation den ganzen Bürotag über gegeben ist. In der Praxis müssten lediglich MitarbeiterInnen, die sehr früh ins Büro kommen oder abends länger bleiben, mit Zugluft rechnen.



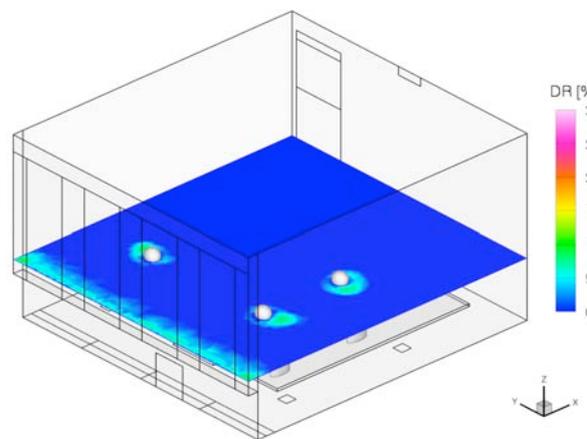
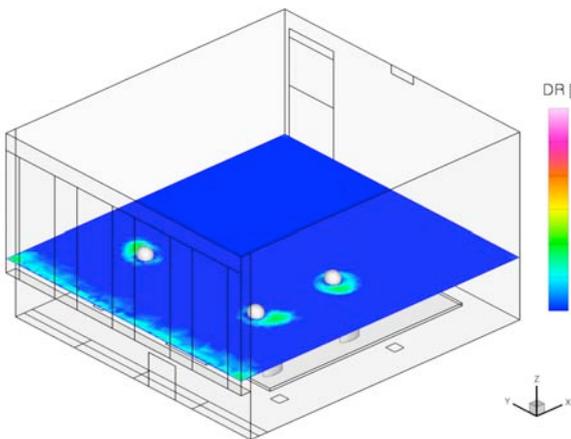
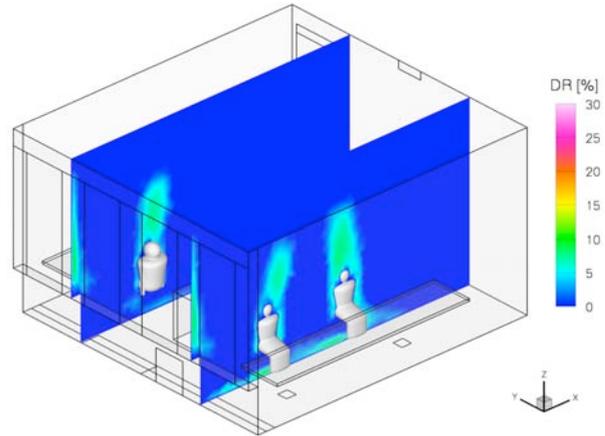
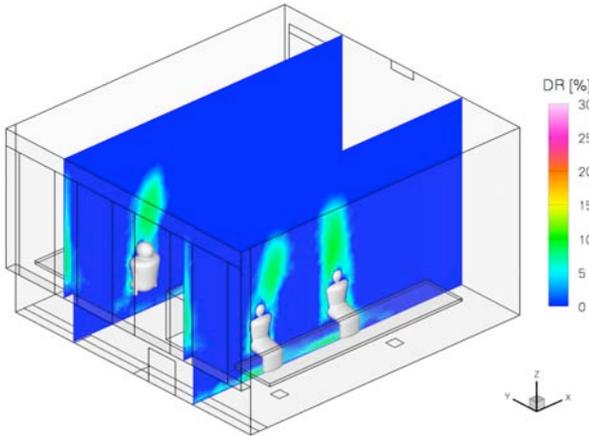
Var. 12: L1B Sommer: Ventilator-konvektoren Komfortbrüstungsgeräte. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

Komfortbrüstungsgeräte laufen infolge ihres geringeren Volumenstroms permanent, ohne Taktung. Dabei kommt es zwar nicht im Nackenbereich, jedoch im Bereich der Knöchel zu Zugluftbelastungen.

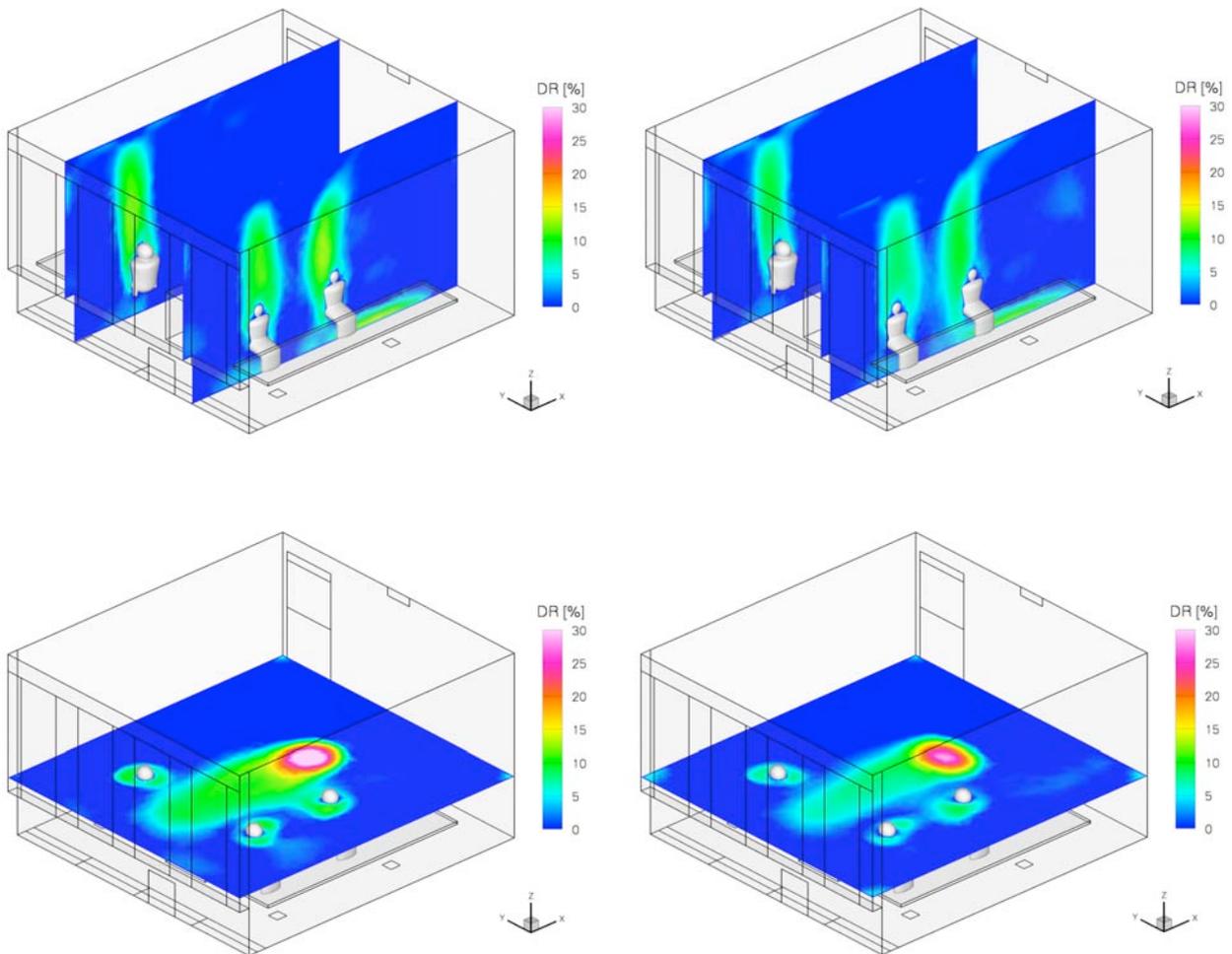
Siehe Abb: 4.12.14



Var. 13: PL5 F2A Sommer: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

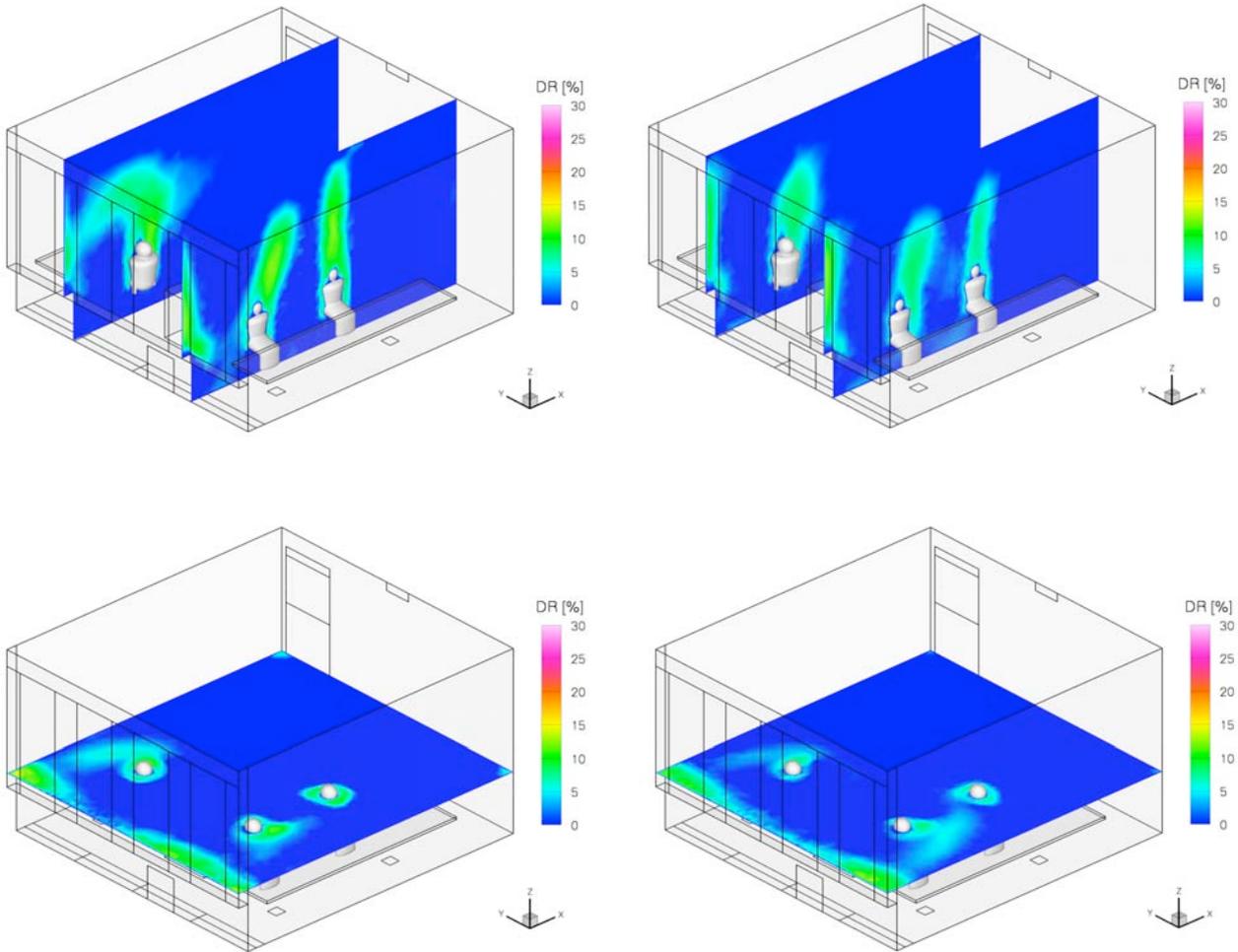


Var. 14: PL5 F2A Winter: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)



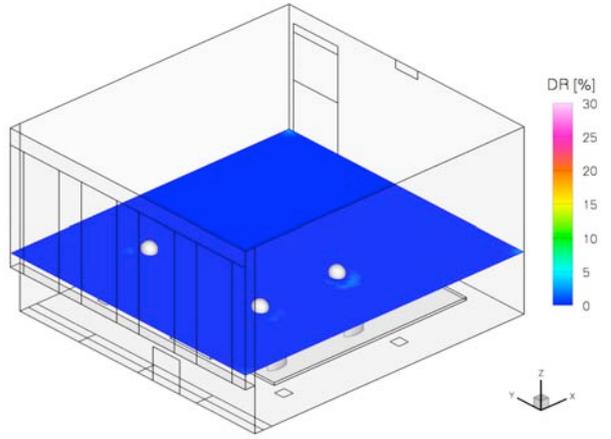
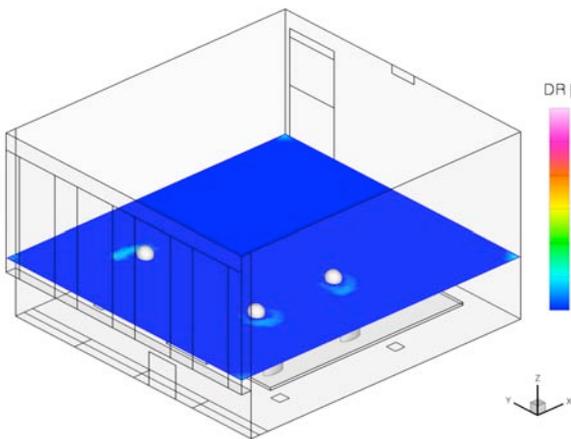
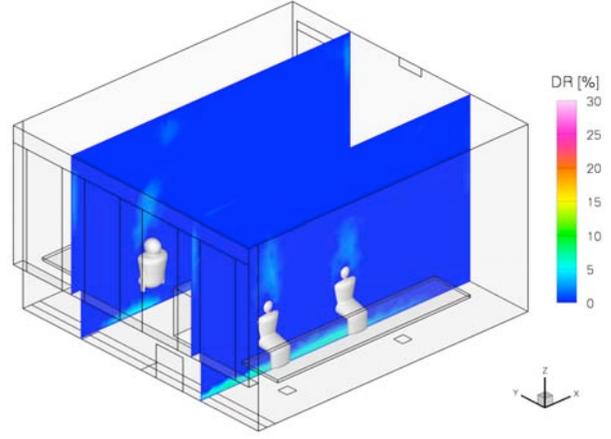
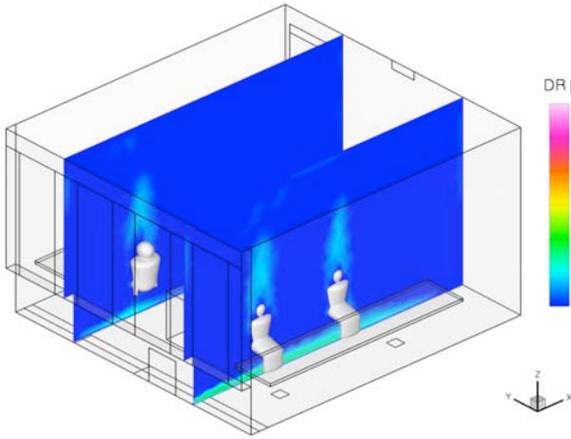
Var. 15: PL2 F2A Sommer: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

Die wasserfallartig zentral in den Raum fallende kühle Zuluft erzeugt ein lokal starkes Zugluftisiko, allerdings abseits der Arbeitsplätze. Die Flexibilität der Raumnutzung wird dadurch eingeschränkt.

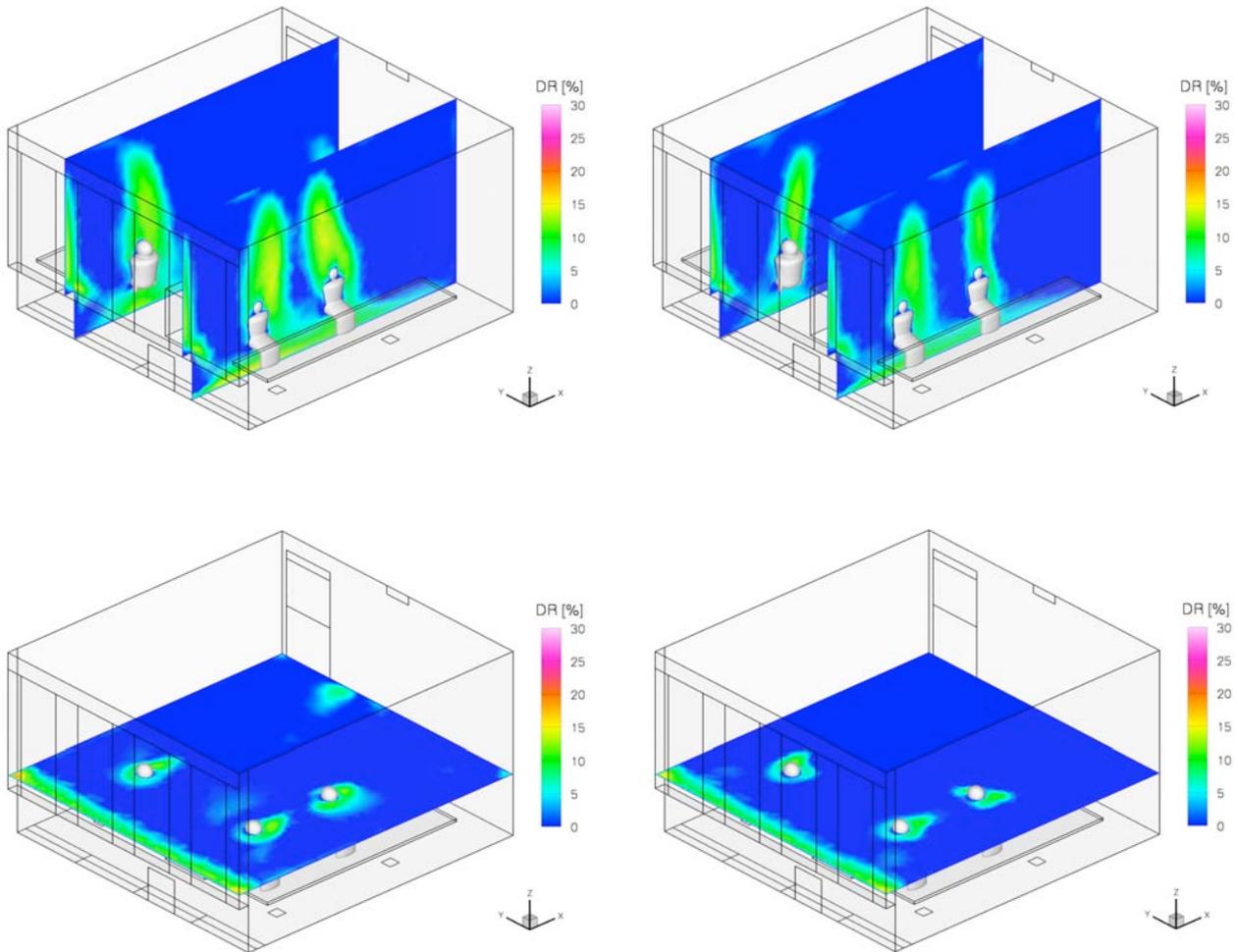


Var. 16: PL2 F2A Winter: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

Im Winter bleibt die isotherm eingebrachte Zuluft in Deckennähe. Der „Wasserfalleffekt“ bleibt aus.

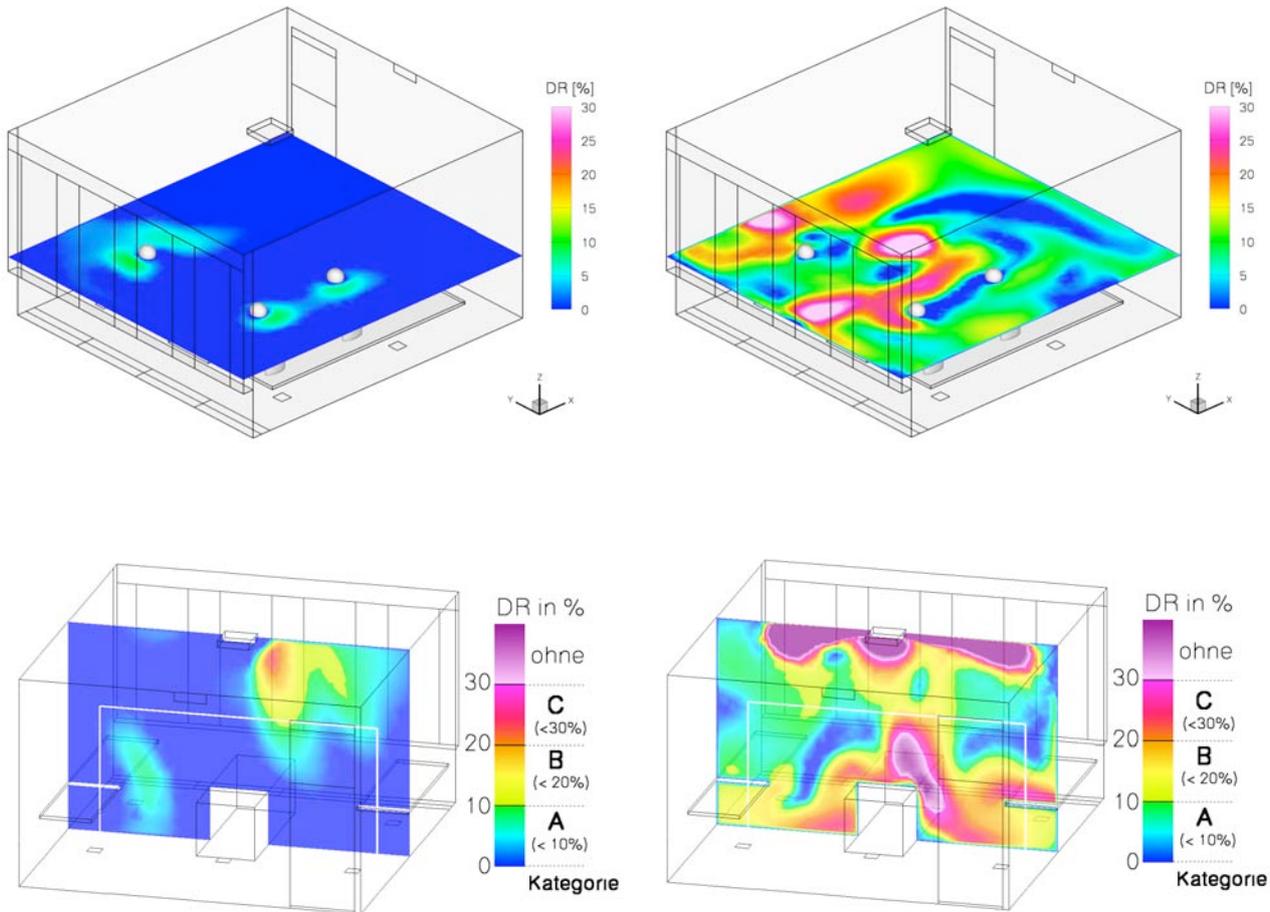


Var. 17: PL4 F5A Sommer: Quelllüftung und Fußbodenkühlung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)



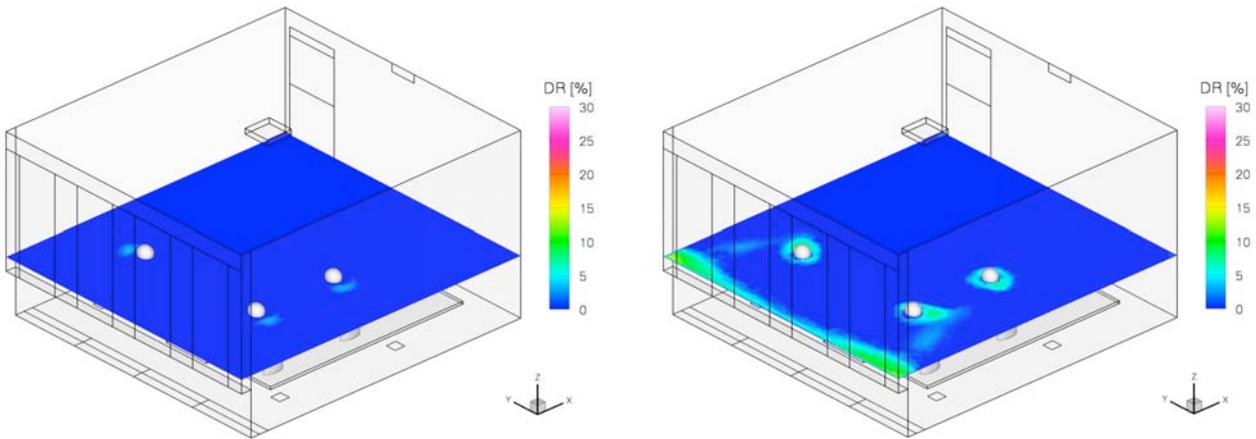
Var. 18: PL4 F5A Winter: Quelllüftung und Fußbodenheizung. 10 Uhr (links), 16 Uhr (rechts)

Bei der Beheizung des Raumes über den Fußboden entsteht eine Warmluftschicht, die an den Orten des geringsten Widerstands, das sind die Wärme abgebenden Personen, den Weg nach oben sucht. Deswegen sind die Konvektionskegel bei und über den Personen hier besonders ausgeprägt. Bei demselben System im Sommer (Variante 17 siehe Seite 259), mit Fußbodenkühlung, sind im Gegensatz dazu die Konvektionskegel besonders schwach ausgeprägt. In der warmen Luft um die Personen herum kann sich nur wenig Auftrieb ausbilden.



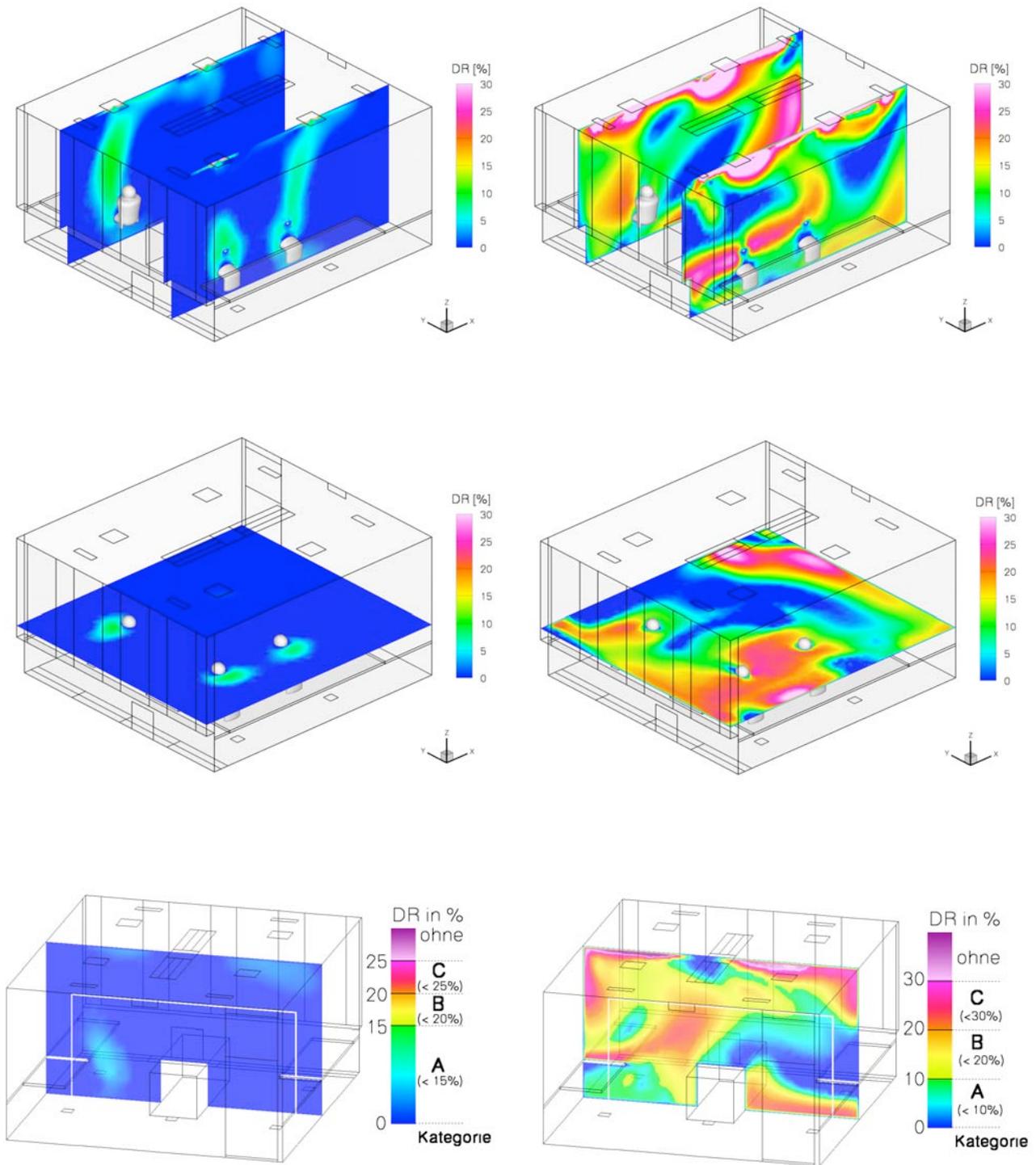
Var. 19: PL2 L2 Sommer: Lüftungsgitter und Deckenfancoil. 9 Uhr (links), 16 Uhr (rechts), Komfortklassen (unten)

Die Anlage ist den ganzen Tag über in einem Takt von ca. 30 Minuten im Umluft- und Kühlbetrieb (hier: 16 Uhr). In den Betriebspausen (hier: 9 Uhr) läuft die Primärluftzufuhr über das Luftgitter weiter. Während des Umluftbetriebes kommt es zu starken Luftbewegungen und entsprechendem Zugluftrisiko im Raum.



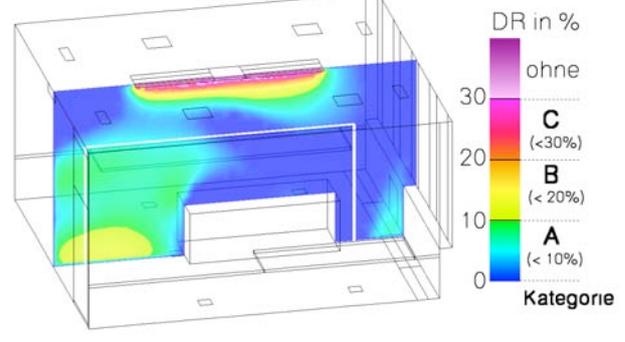
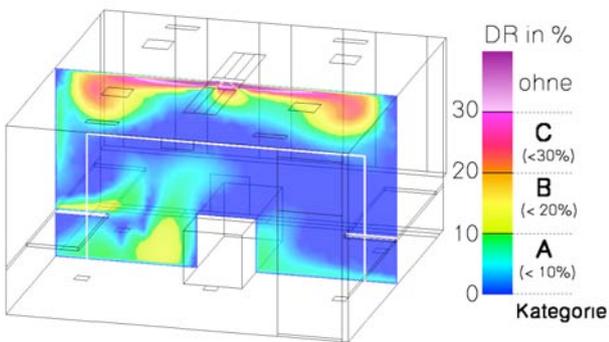
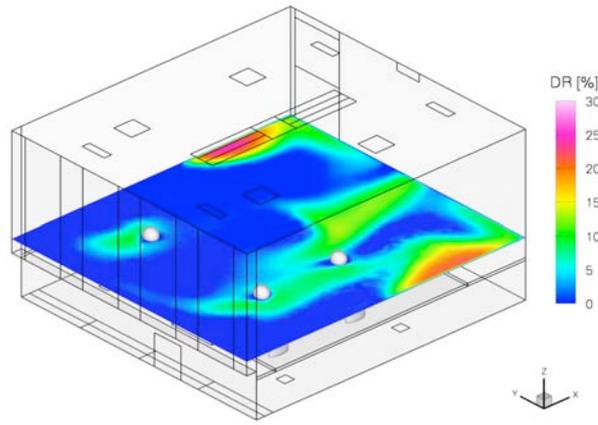
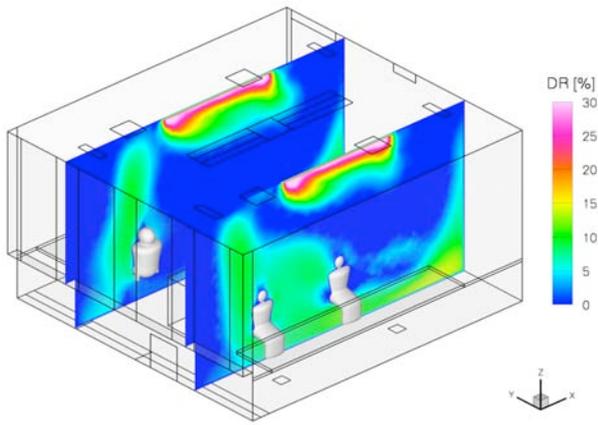
Var. 20: PL2 L2 Winter: Lüftungsgitter und Deckenfancoil. 9 Uhr (links), 10 Uhr (rechts)

Im Winter ist der Betrieb des Deckenfancoils nur außerhalb der Betriebszeiten (hier: 9 Uhr) erforderlich. Aber auch dann bleiben Zugscheinungen aus. Die Luftbewegung im Heizbetrieb ist auf den deckennahen Bereich beschränkt, wo ein Warmluftpolster entsteht.



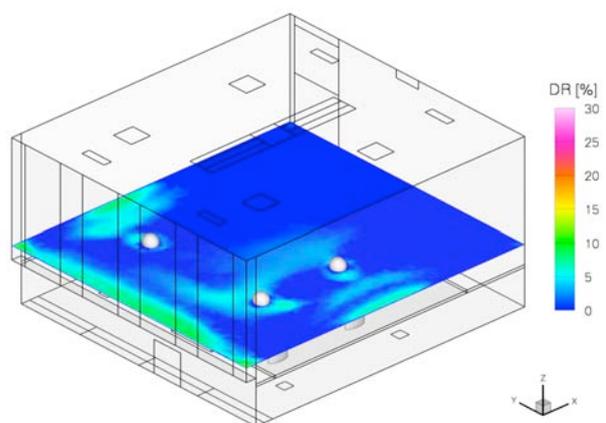
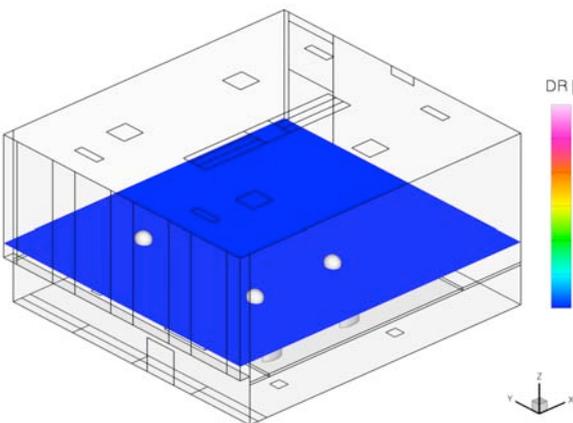
Var. 21: L3 Sommer: Deckeneinbaugerät mit Drallausslässen. 9 Uhr (links), 16 Uhr (rechts). Komfortklassen (unten)

Auch dieses Gerät ist im Sommer den ganzen Tag in einem getakteten Betrieb, der abwechselnd nur Zuluft zuführt (hier: 9 Uhr) und in einen Kühl- und Umluftbetrieb übergeht, bei dem starke Zugluft entsteht.



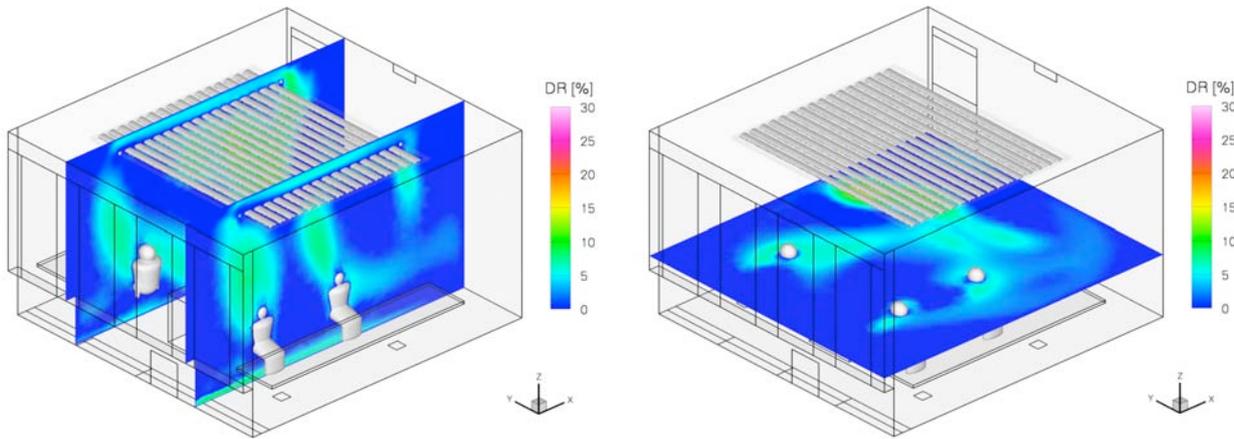
Var. 22: FL1 Sommer: Induktionskühlgerät (Kühlbalken). 16 Uhr. Komfortklassen (unten)

Das Induktionsgerät ist den ganzen Tag über mit einer Taktung von ca. 30 Minuten im Umluft- und Kühlbetrieb. Die Versorgung mit Zuluft ist kontinuierlich. Bei Umluftbetrieb (hier: 16 Uhr) ist mit Zugluftisiko zu rechnen, das schon knapp außerhalb der Grenzen für die Komfortklasse A (DR < 10 %) liegt.



Var. 23: FL1 Winter: Induktionsheizgerät (Heizbalken). 9 Uhr (links), 10 Uhr (rechts)

Im Winter ist der Umluftbetrieb nur außerhalb der Bürozeiten (hier: 9 Uhr) notwendig. Dabei finden die Luftbewegungen nur an der Decke statt. Ohne Umluftbetrieb (hier: 10 Uhr) stellt sich eine thermisch durch die kühlen Fensterscheiben getriebene Luftumwälzung ein, die aber kein Zugluftisiko mit sich bringt.



Var. 24: PL4 F3 Sommer: Kühlsegel mit Quelluftauslass. 14 Uhr.

## 4.28. Einzelauswertung vertikale Lufttemperaturunterschiede

Vertikale Lufttemperaturunterschiede zwischen Kopf und Fußgelenken sind einer der lokalen Diskomfort-Parameter der Norm EN ISO 7730. Sie werden in der Simulation als Horizontalschnitt in 60 cm Höhe sichtbar gemacht.

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Variante 12, Komfortbrüstungsgeräte, hat bei der Betrachtung des lokalen Diskomforts durch Zugluft besser abgeschnitten als andere Brüstungsgeräte (Varianten 8–11). Diese haben einen höheren Volumenstrom im Kühl- oder Heizmodus, der Zugluft erzeugt. Im Primärluftmodus (Varianten 10–11) gibt es bei geringerem Luftvolumenstrom und isothermer Führung keine Zugluftprobleme.

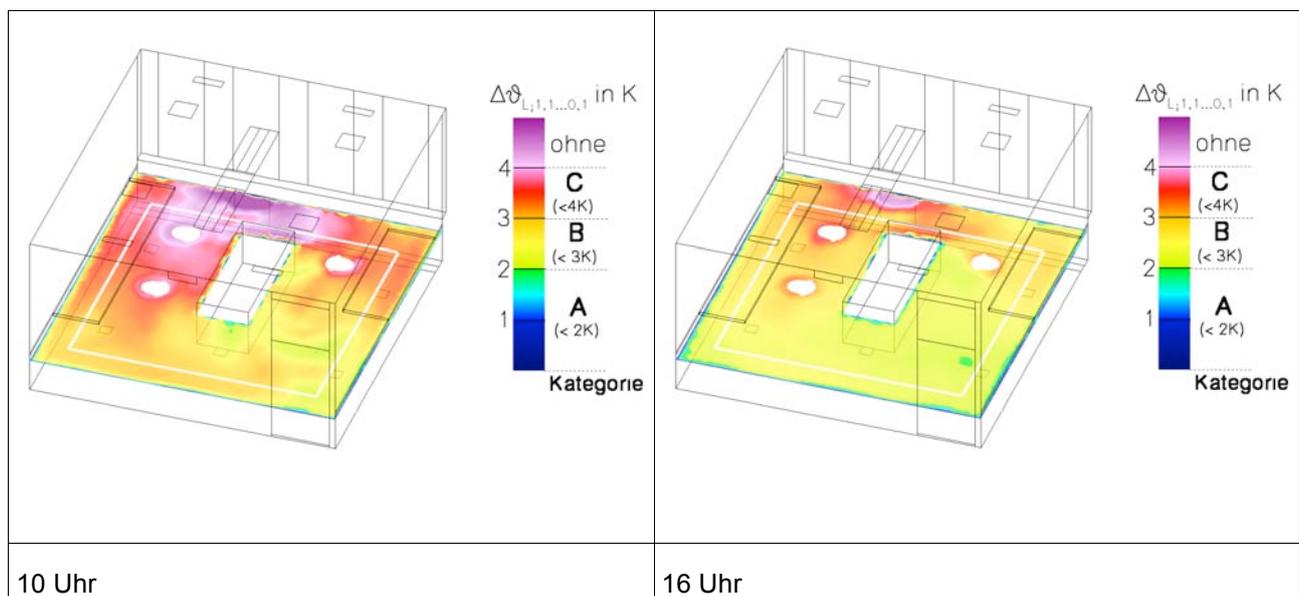
Das Komfortbrüstungsgerät benötigt zwar einen geringeren Luftvolumenstrom, ist aber dafür auch ständig (ohne Taktung) im Kühlbetrieb. Dies gewährleistet einen quellluftartigen guten Luftaustausch, aber auch wie nun deutlich wird, die im Bild gezeigte lokale Unbehaglichkeit einer zu hohen Lufttemperaturdifferenz zwischen Kopf- und Fußknöcheln.

Alle Varianten mit Quellluft oder Fußboden-Dralldüsen bringen im Sommer die Frischluft mit 4 K Untertemperatur ein, was offensichtlich lokalen Diskomfort erzeugt. Es ist jedoch möglich und üblich die Untertemperatur mit 1 bis 2 K wesentlich geringer zu wählen. Damit sollte das Problem verschwinden. Allerdings muss die fehlende Kühlleistung dann über die jeweiligen Kühlflächen eingebracht werden.

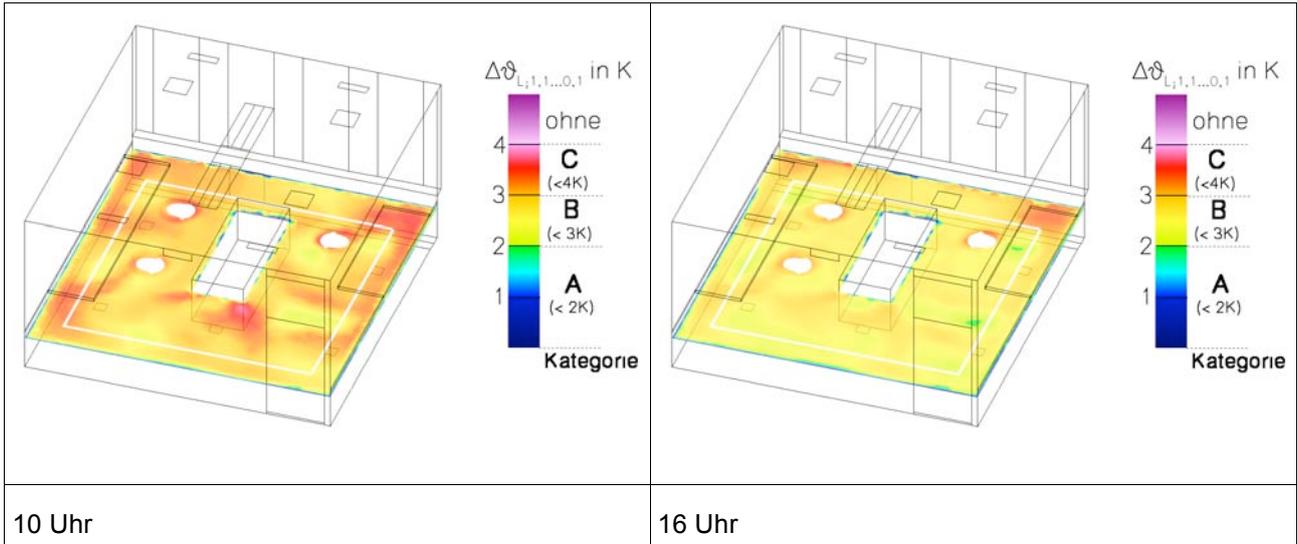
Die Variante 17, Quelllüftung und Fußbodenkühlung, bringt die Frischluft nicht nur mit 4 K Untertemperatur ein. Zusätzlich wird der Fußboden gekühlt. Beides wirkt gleichsinnig in Richtung hoher vertikaler Unterschiede der Lufttemperaturen.

Lüftungsgitter und alle Konvektorlösungen verhalten sich bezüglich dieses lokalen Komfortparameters problemlos!

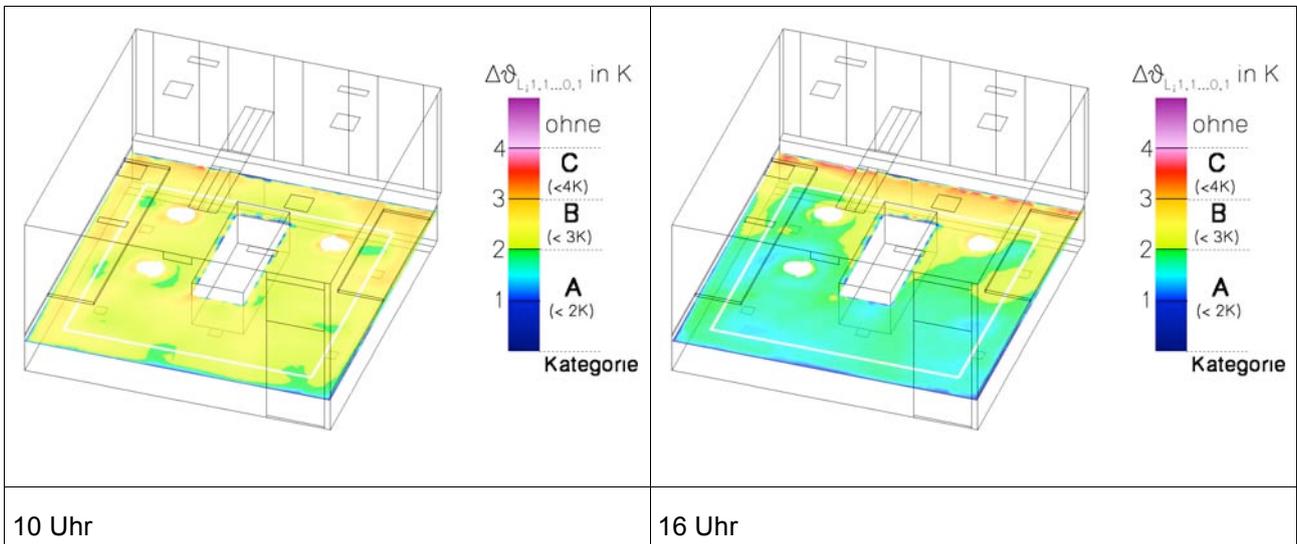
### Übersicht über die Simulationsvarianten



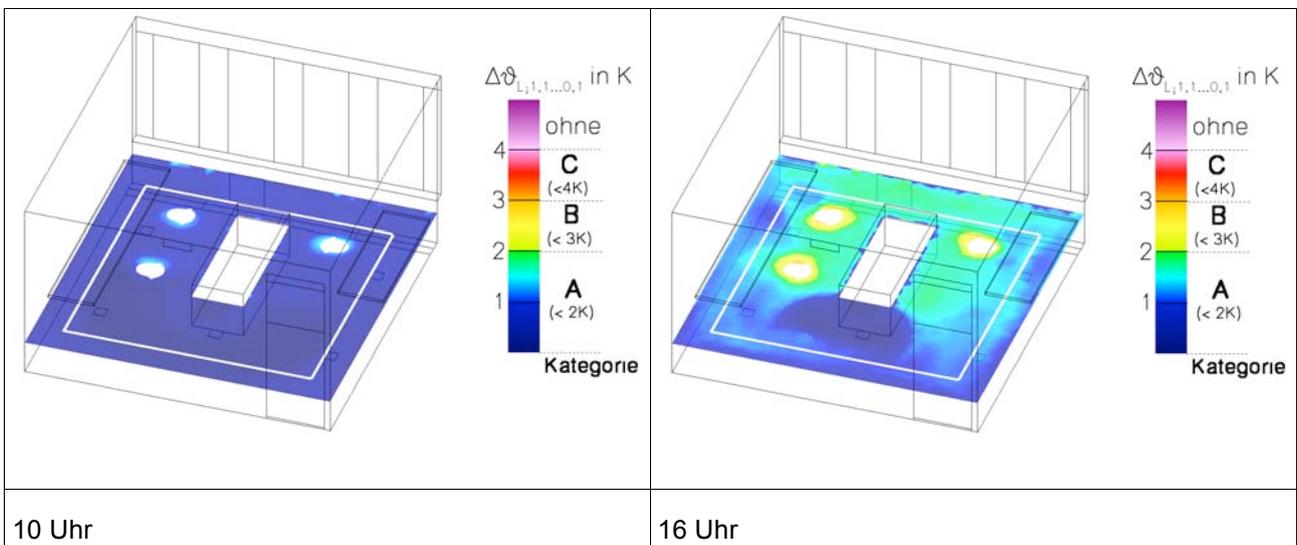
Var 1: PL4 F1D Sommer: Quelllüftung und Putzkühldecke mit Kapillarrohrrmatte



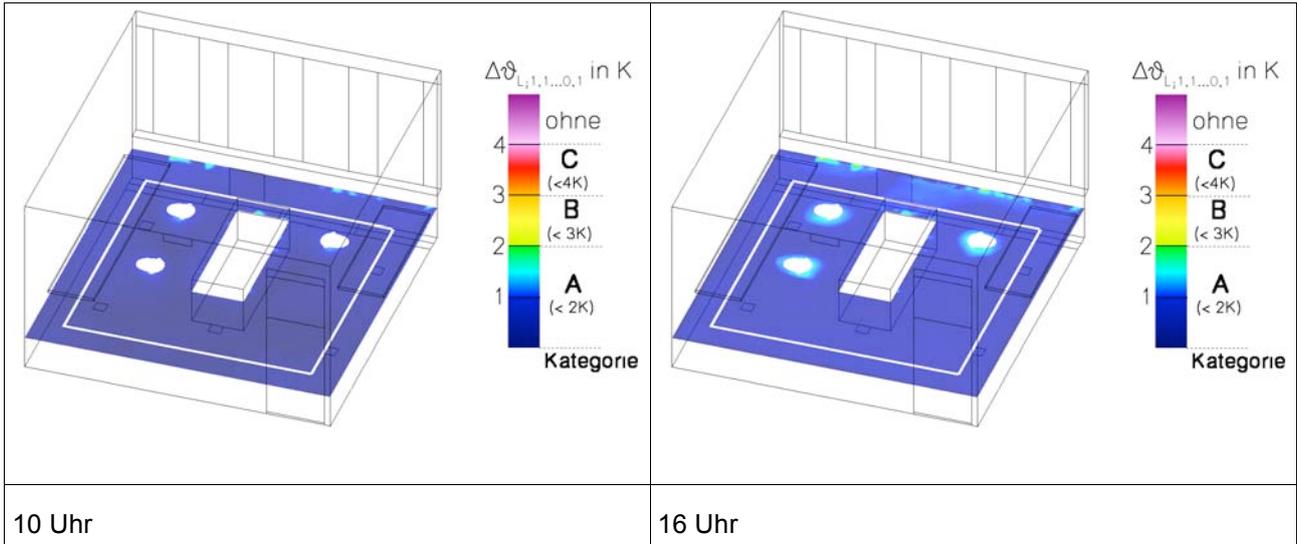
Var 2: PL5 F1D Sommer: Drallauslässe im Boden und Putzkühldecke mit Kapillarrohrmatte



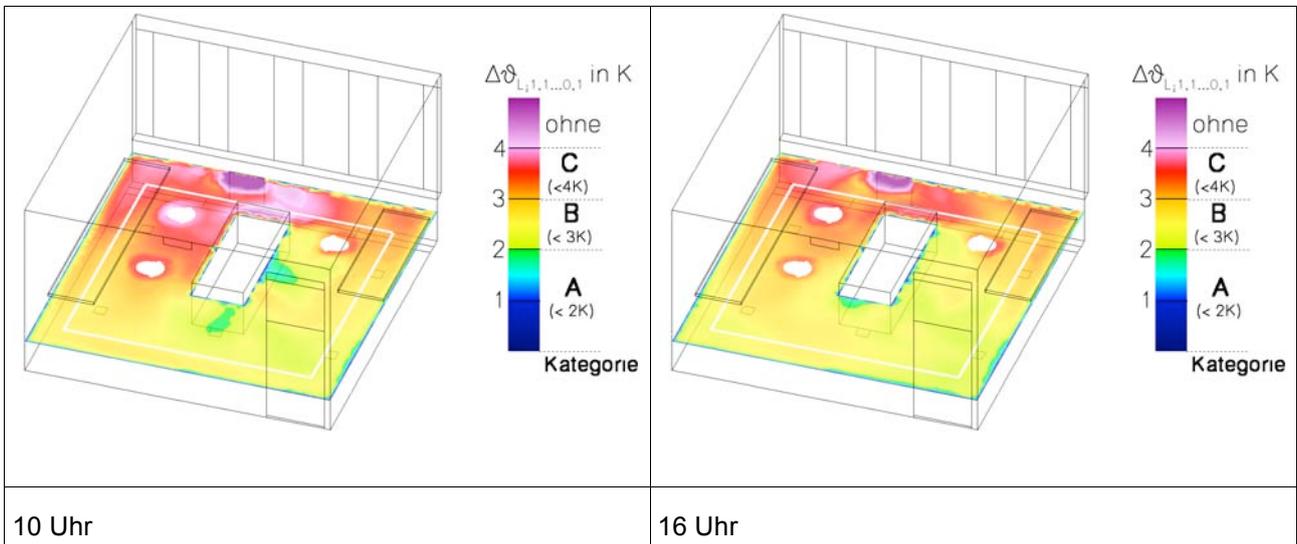
Var 3: PL5 F1D Winter: Drallauslässe im Boden und Putzheizdecke mit Kapillarrohrmatte



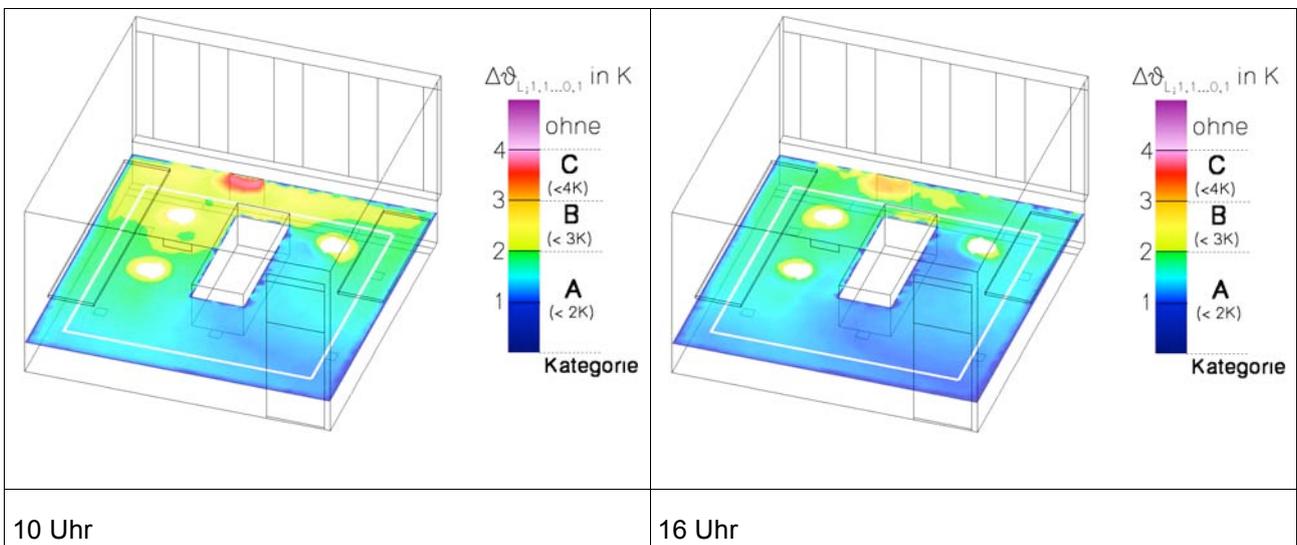
Var 4: PL2 F5A Sommer: Lüftungsgitter und Fußbodenkühlung



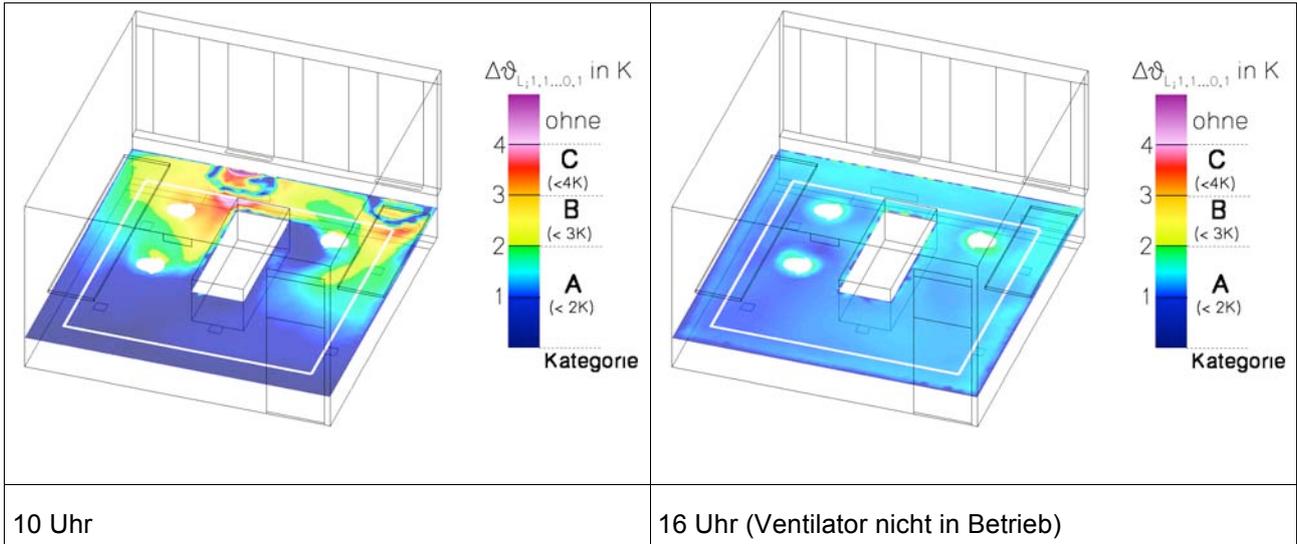
Var 5: PL2 F5A Winter: Lüftungsgitter und Fußbodenheizung



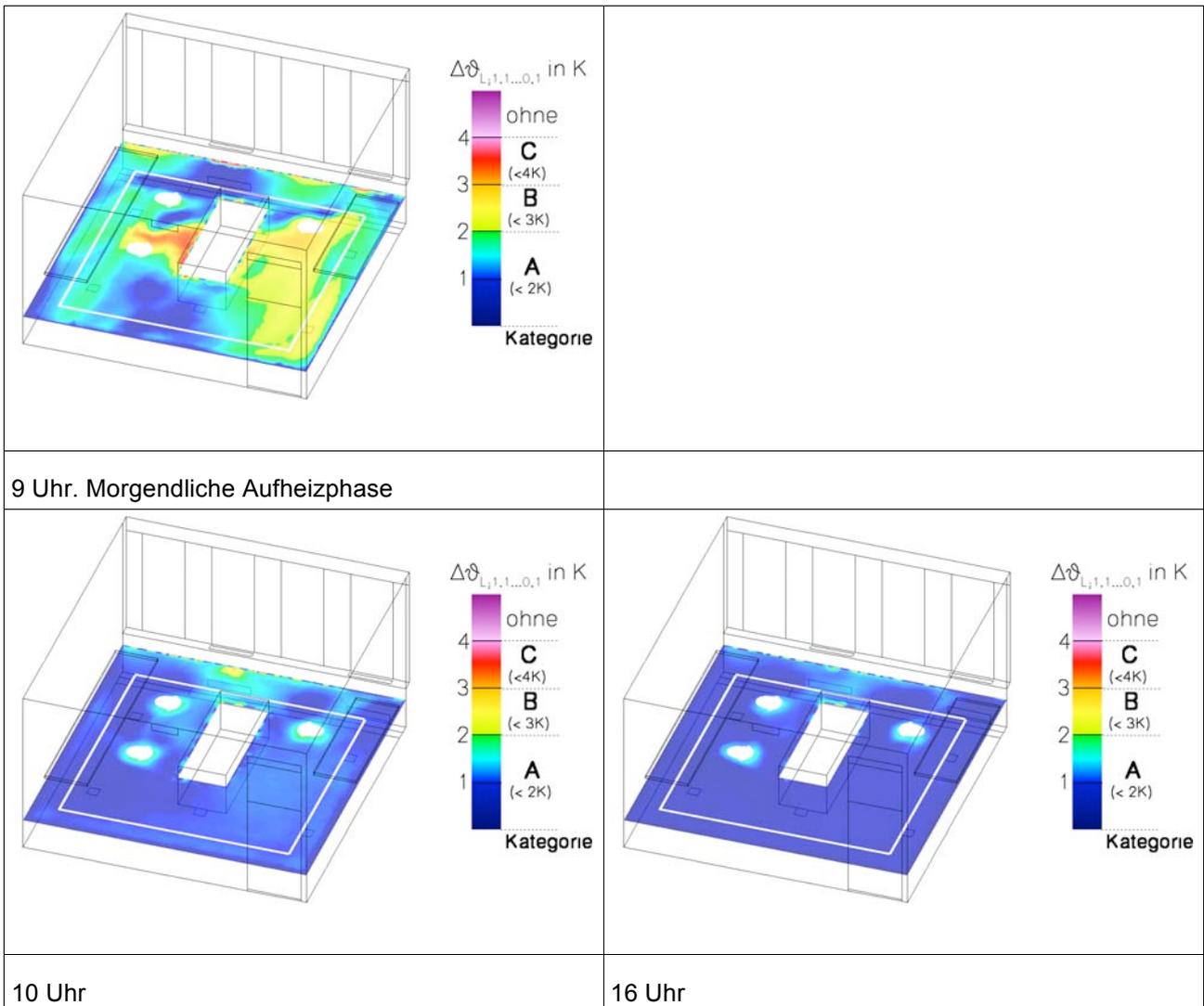
Var 6: PL4 F2A Sommer: Quelllüftung und Betonkernaktivierung



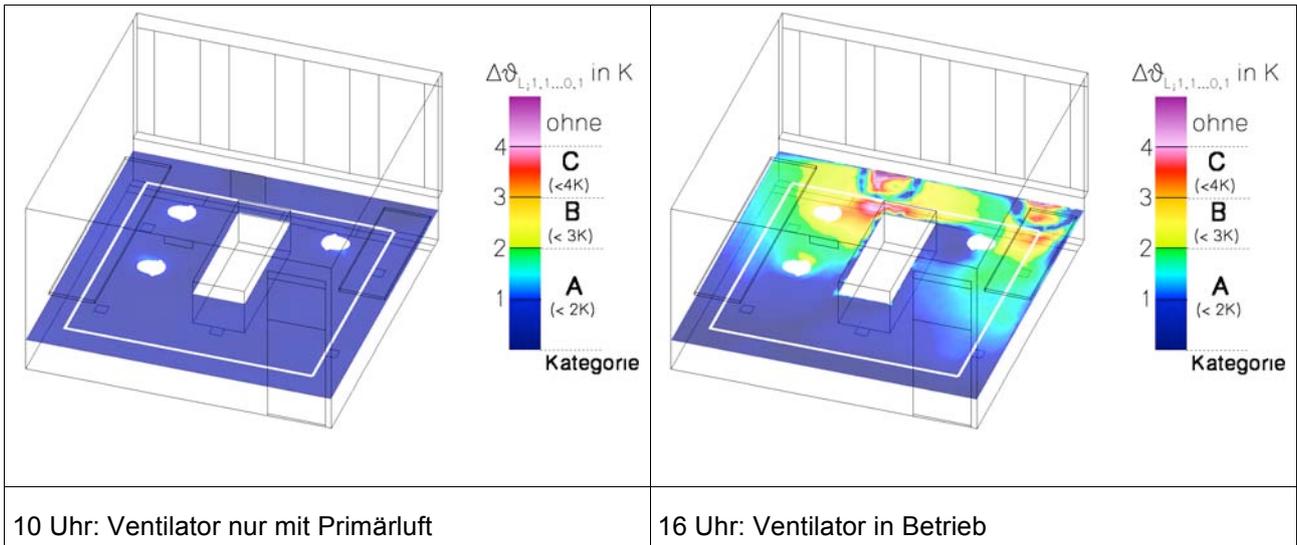
Var 7: PL4 F2A Winter: Quelllüftung und Betonkernaktivierung



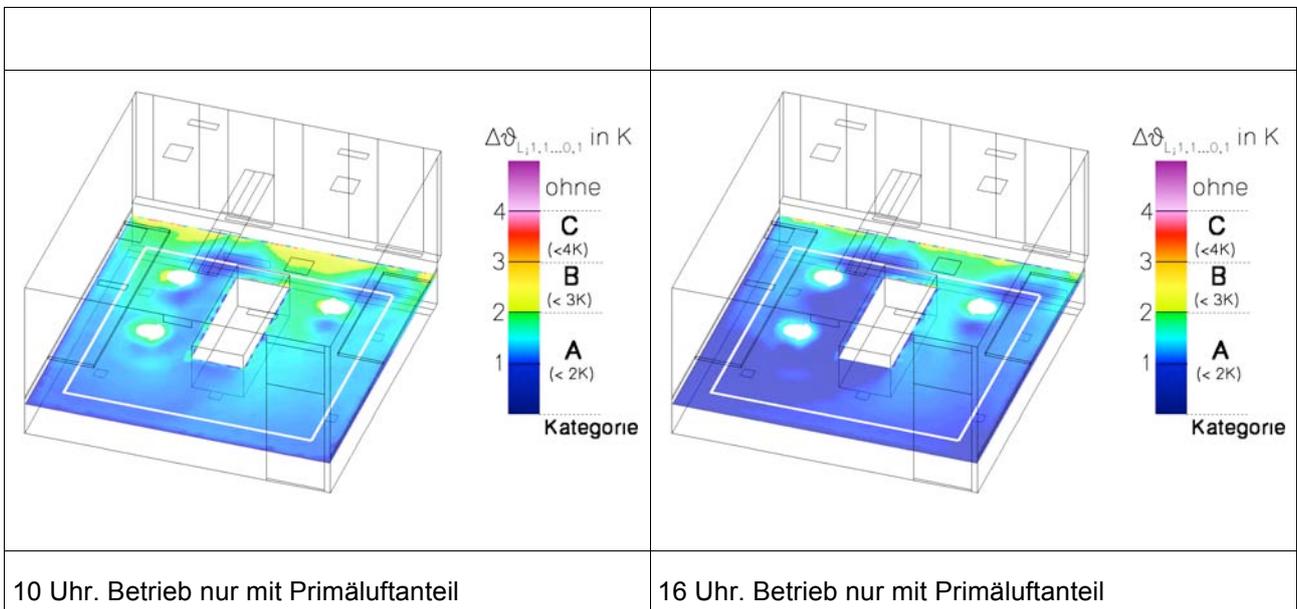
Var 8: PL2 L1A Sommer: Lüftungsgitter und Ventilator-konvektoren



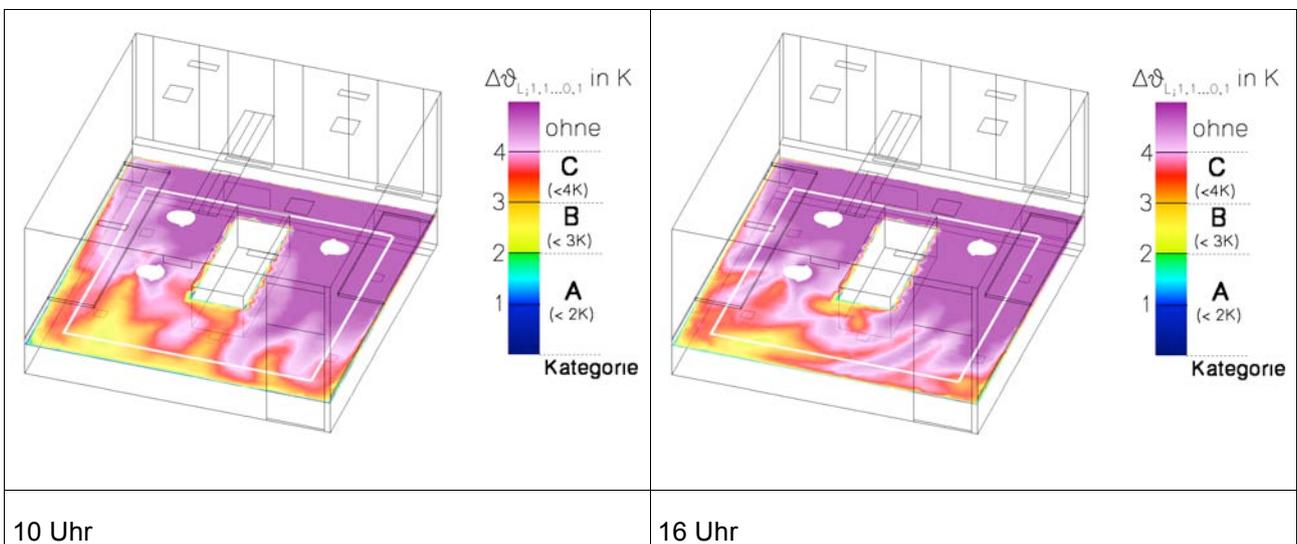
Var 9: PL2 L1A Winter: Lüftungsgitter und Ventilator-konvektoren



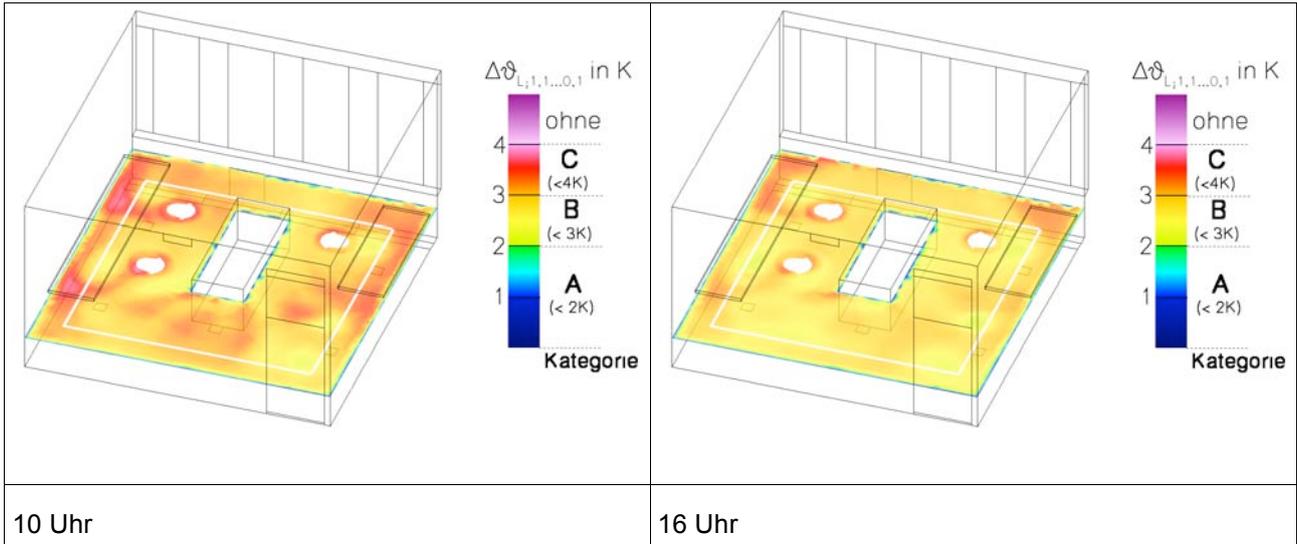
Var 10: L1A Sommer: Ventilatorkonvektoren mit Primärluftanteil



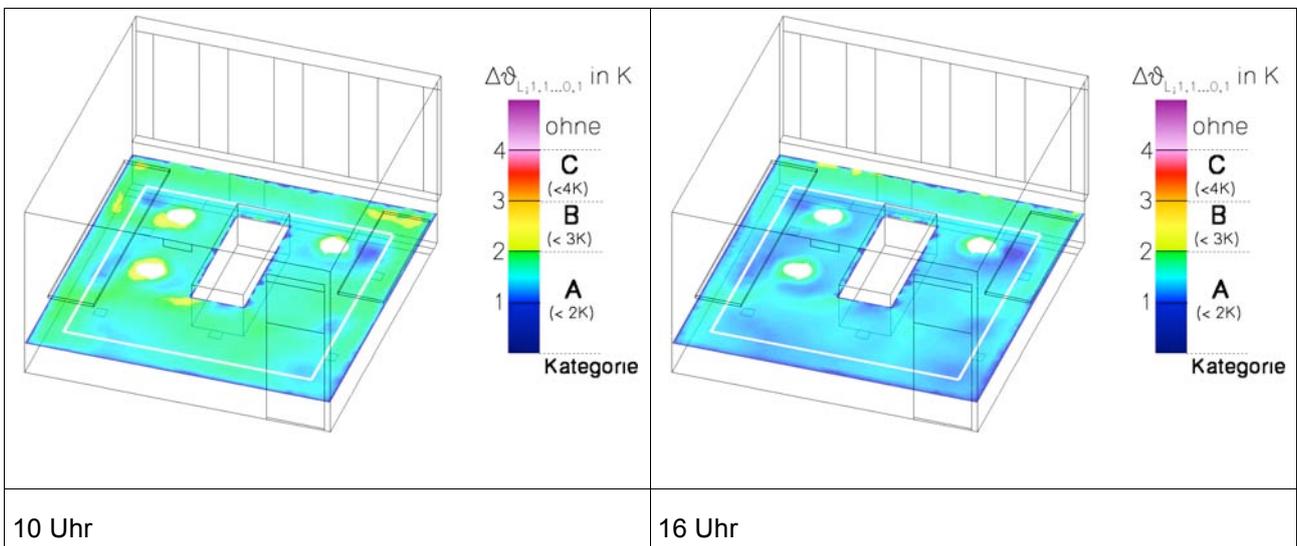
Var 11: L1A Winter: Ventilatorkonvektoren mit Primärluftanteil



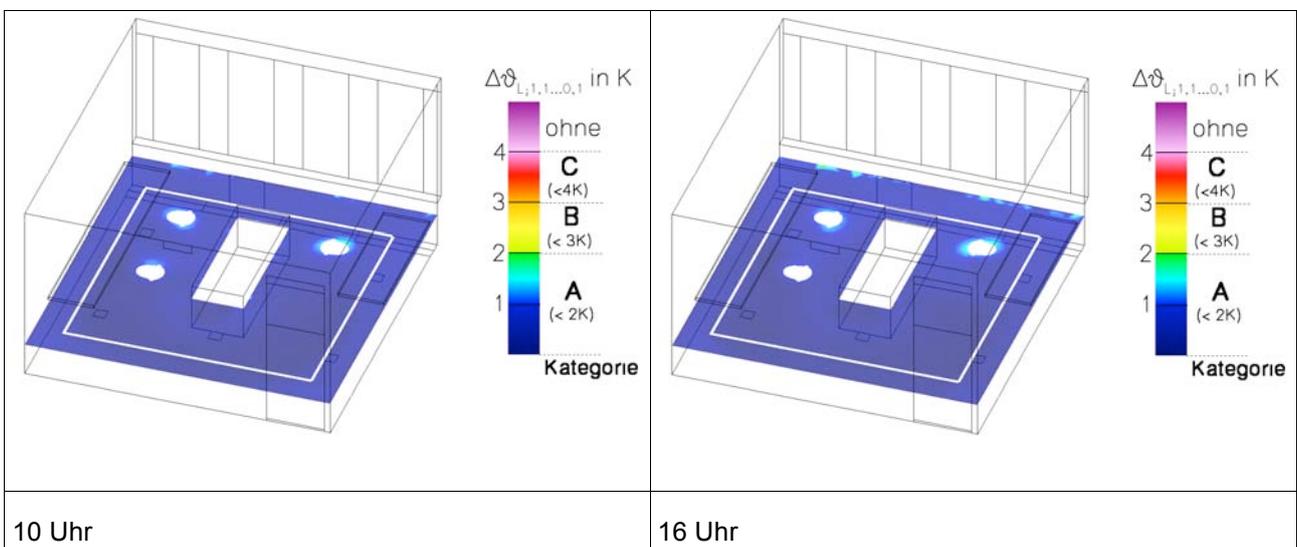
Var 12: L1B Sommer: Ventilatorkonvektoren Komfortbrüstungsgeräte



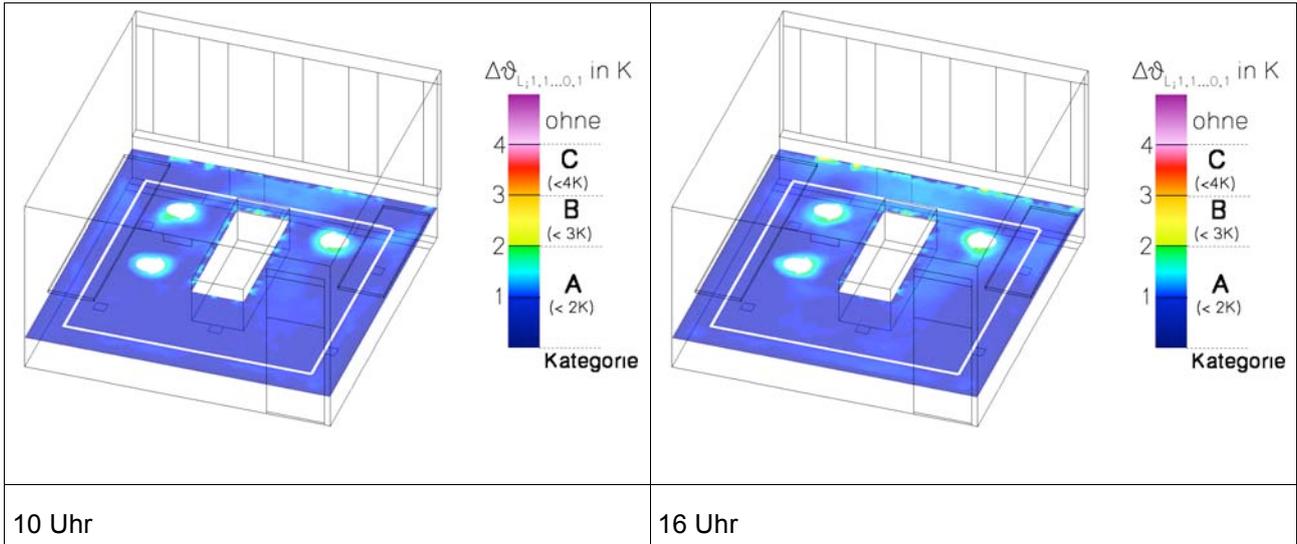
Var 13: PL5 F2A Sommer: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung



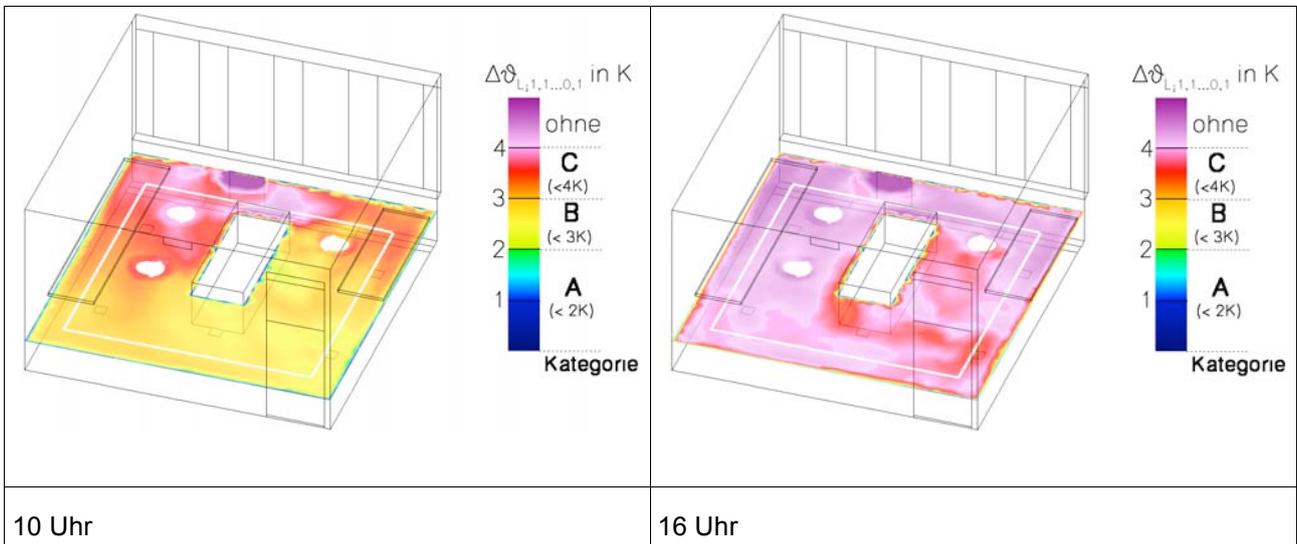
Var 14: PL5 F2A Winter: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung



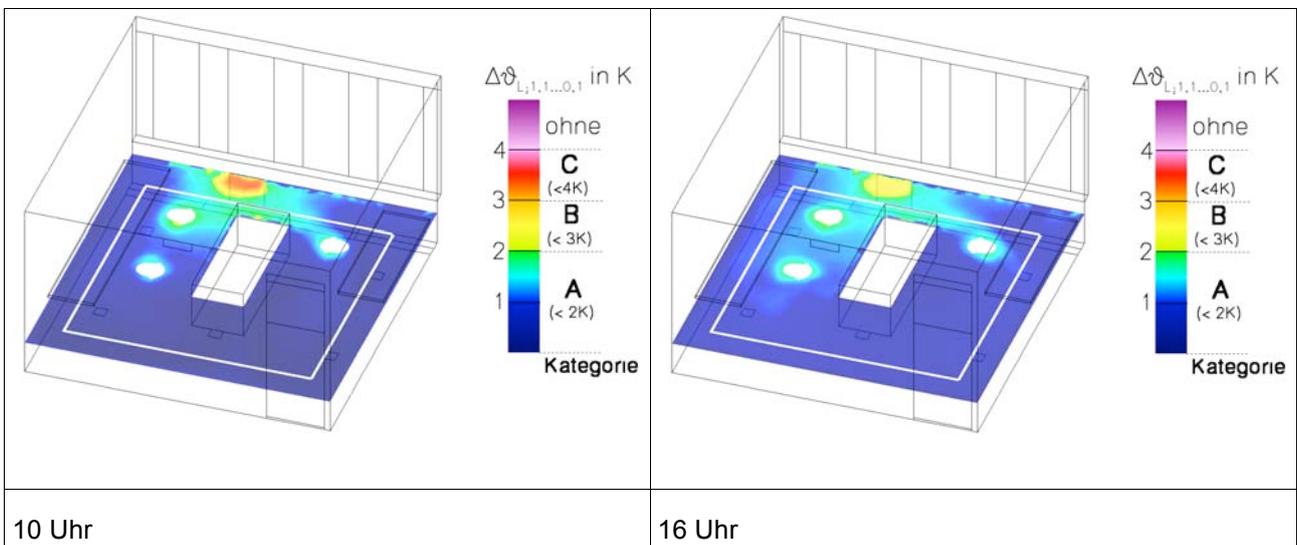
Var 15: PL2 F2A Sommer: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung



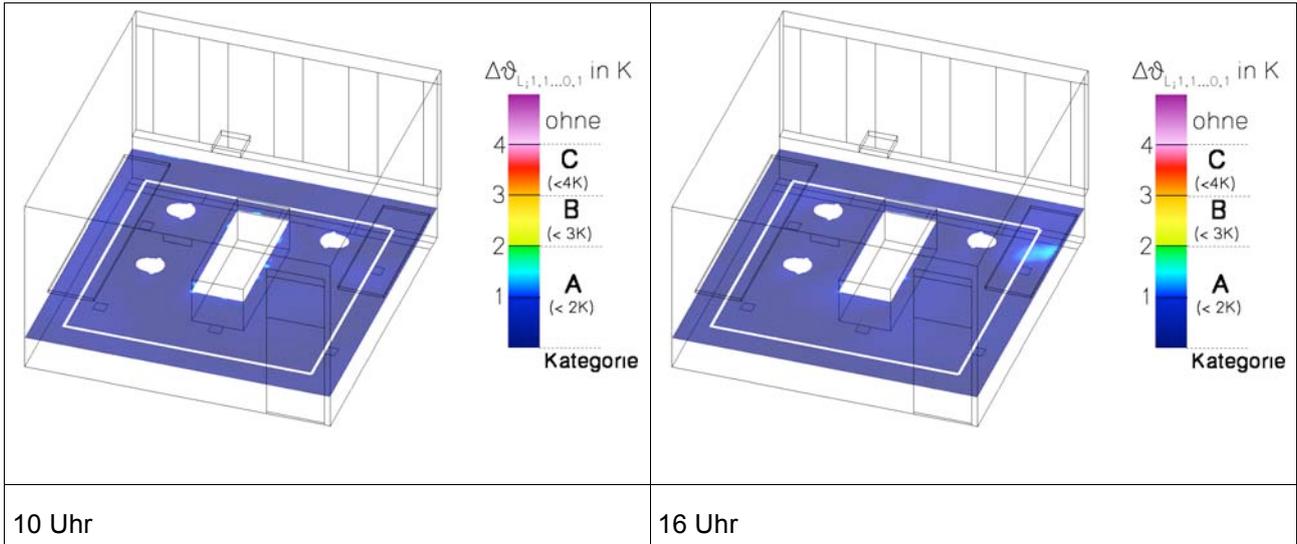
Var 16: PL2 F2A Winter: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung



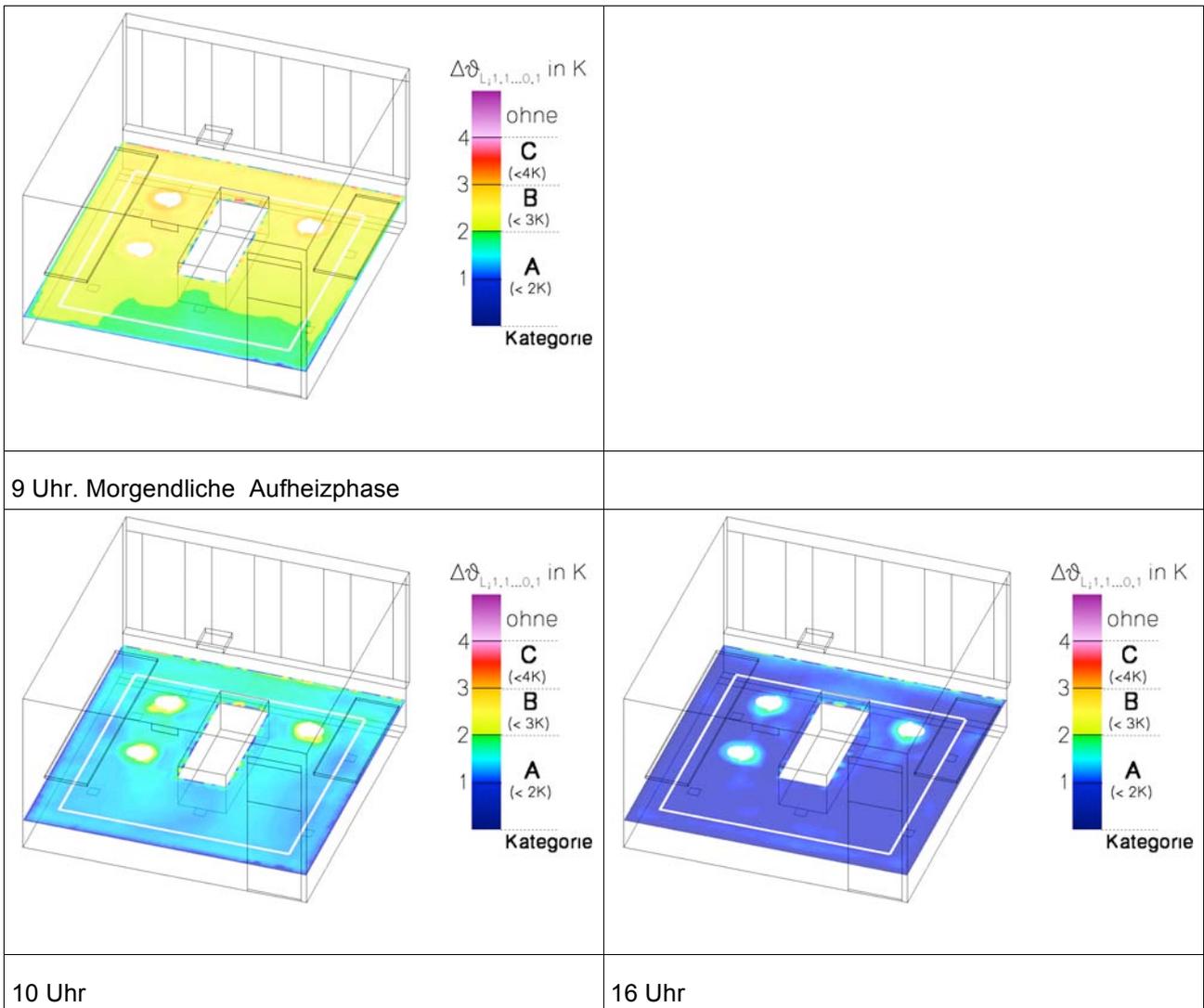
Var 17: PL4 F5A Sommer: Quelllüftung und Fußbodenkühlung



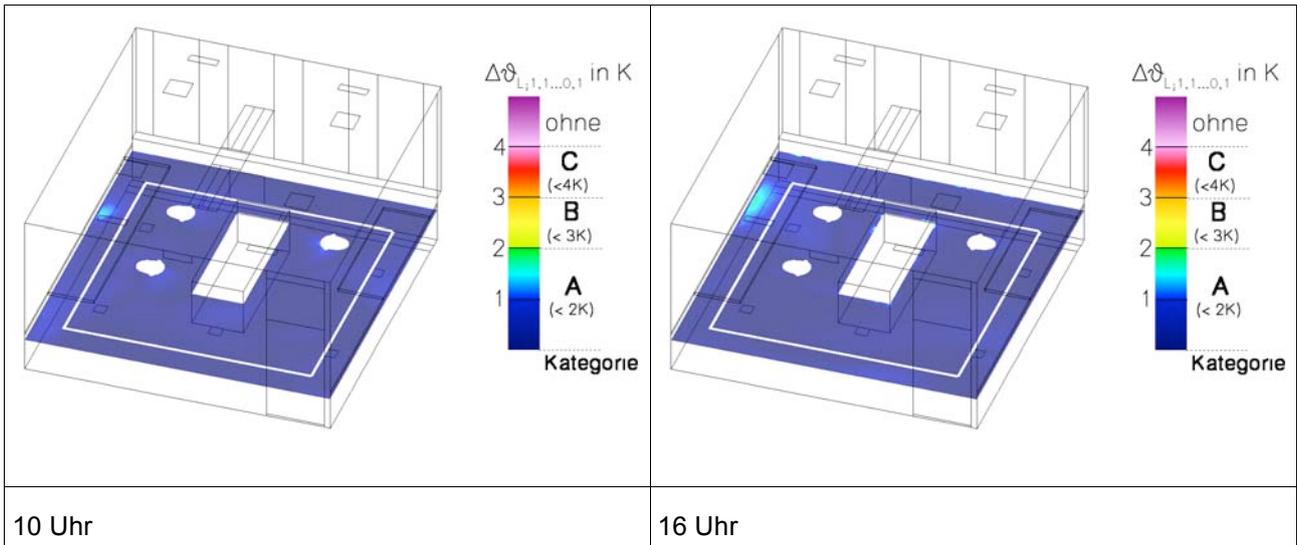
Var 18: PL4 F5A Winter: Quelllüftung und Fußbodenheizung



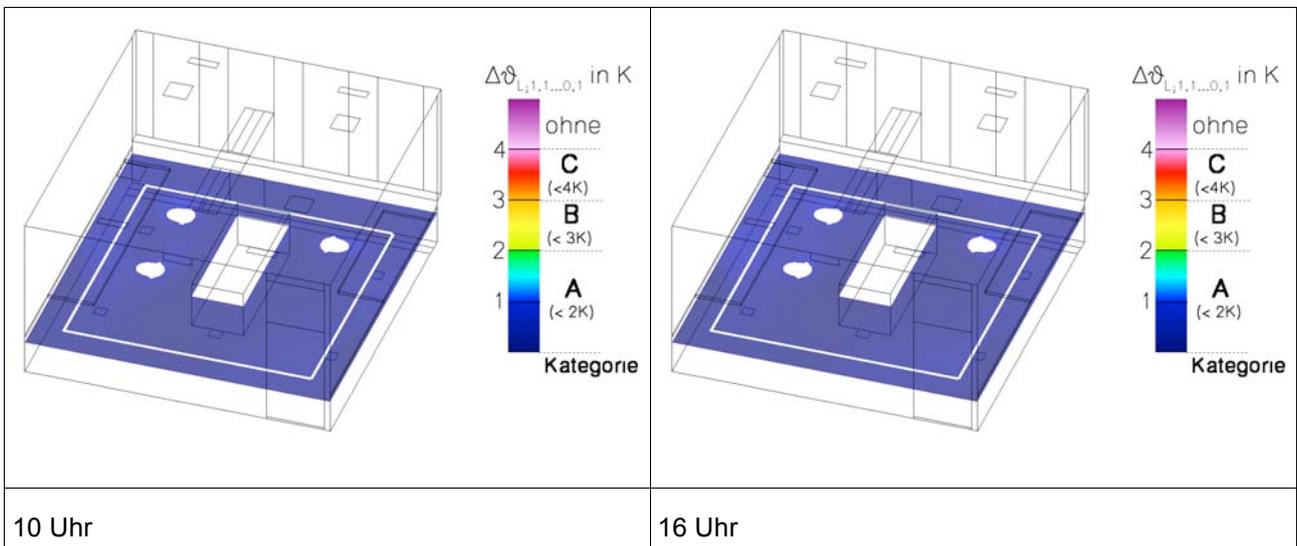
Var 19: PL2 L2 Sommer: Lüftungsgitter und Deckenfancoil



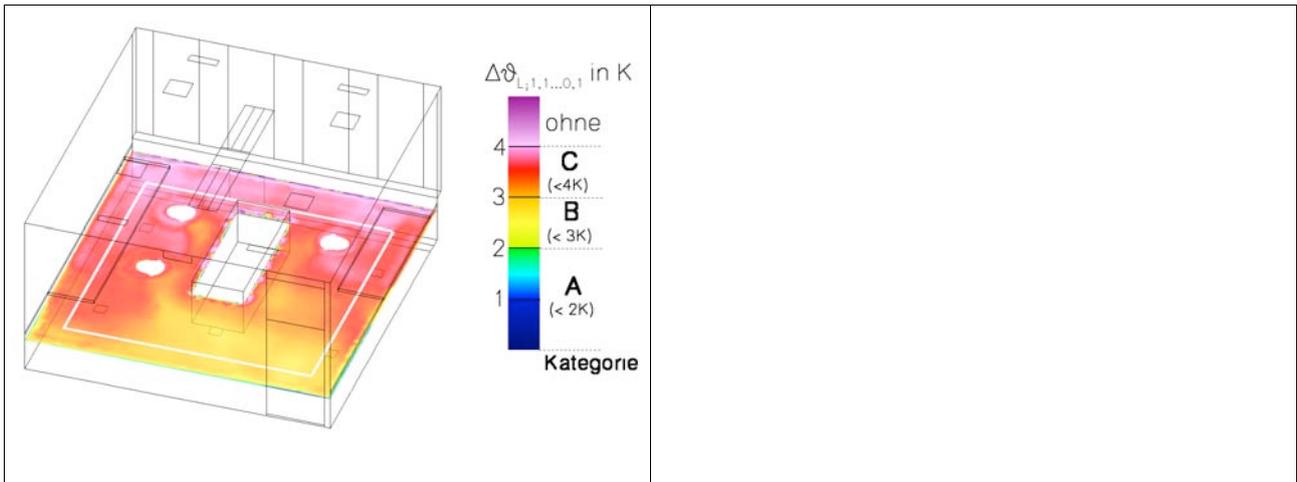
Var 20: PL2 L2 Winter: Lüftungsgitter und Deckenfancoil



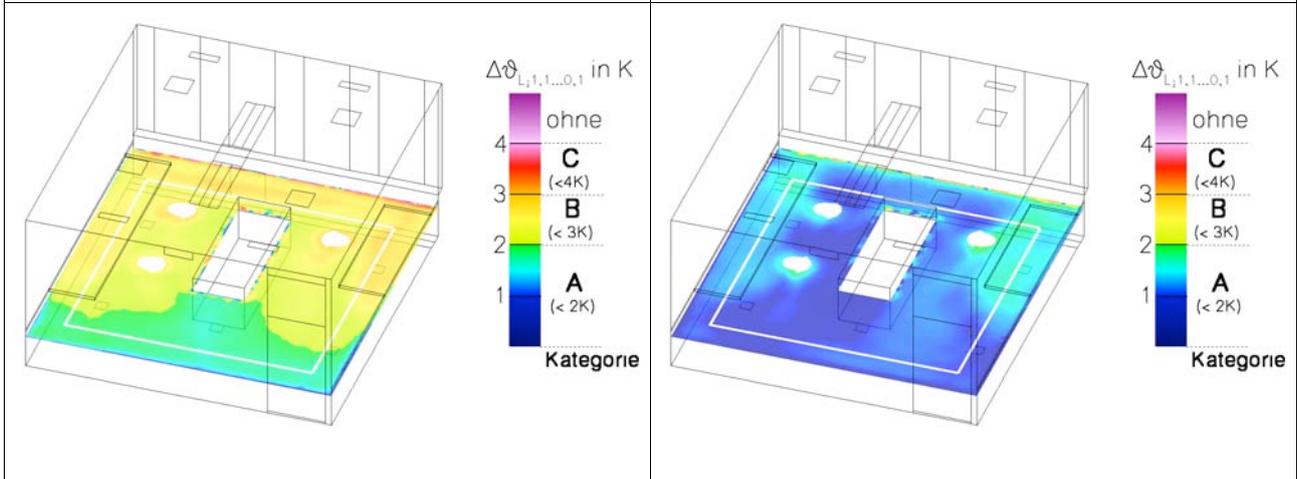
Var 21: L3 Sommer: Deckeneinbaugerät mit Drallauslässen



Var 22: FL1 Sommer: Induktionskühlgerät (Kühlbalken)

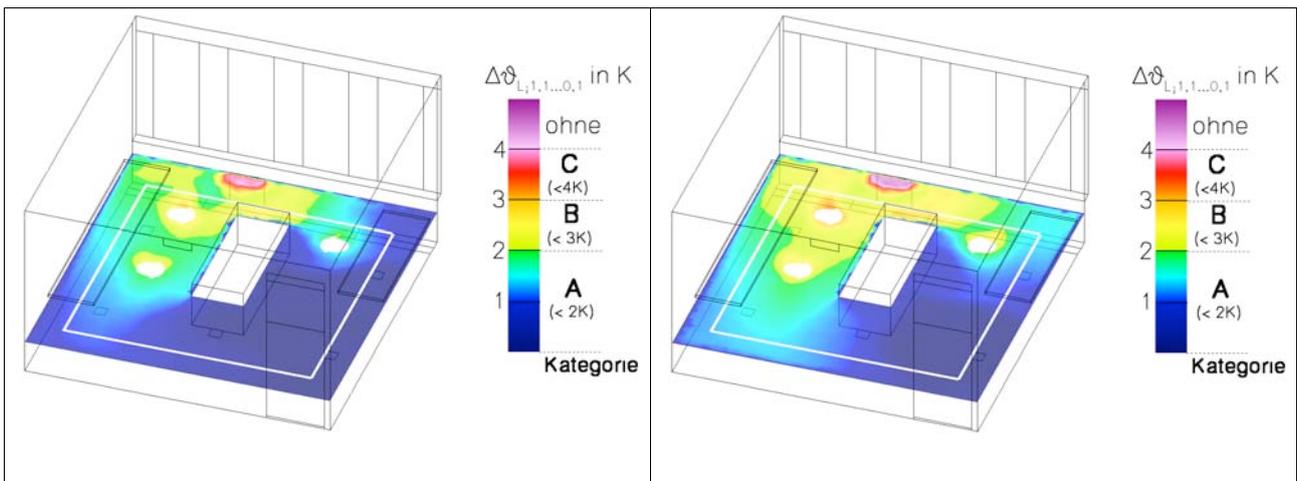


9 Uhr. Morgendliche Aufheizphase



10 Uhr 16 Uhr

Var 23: FL1 Winter: Induktionsheizgerät (Heizbalken)



14 Uhr 16 Uhr

Var 24: PL4 F3 Sommer: Kühlsegel mit Quellluftauslass

## 4.29. Einzelauswertung Strahlungsasymmetrie

Strahlungssaymmetrie ist eine der Kriterien für lokale Unbehaglichkeit, die die EN ISO 7730 ausweist. Es bestehen Grenzwerte der Komfortklasse A, B für Warme Decke, (5 K), Kühle Decke (14 K), Warme Wand (23 K) und Kühle Wand bzw. Fenster (10 K). Für Fußböden gibt es Grenzwerte der absoluten Temperaturen, nicht der Strahlungsasymmetrie.

Gezeigt werden jeweils Vertikalschnitte und Horizontalschnitte, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts), wenn nicht anders angegeben.

### 4.29.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Von den genannten Grenzwerten sind die für Warme Decken mit 5 K bei weitem die empfindlichsten. Sie können bei Deckenheizungen überschritten werden. Dies betrifft die Simulationsvarianten

3: PL5 F1D Winter: Drallauslässe im Boden und Putzheizdecke mit Kapillarrohmatte

7: PL4 F2A Winter: Quelllüftung und Betonkernaktivierung

14: PL5 F2A Winter: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung

16: PL2 F2A Winter: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung

20: PL2 L2 Winter: Lüftungsgitter und Deckenfancoil

23: FL1 Winter: Induktionsheizgerät (Heizbalken)

Bei keiner der genannten Varianten kommt es zu einer Überschreitung der zulässigen Strahlungsasymmetrie von < 5 K gegenüber einer warmen Decke, außer:

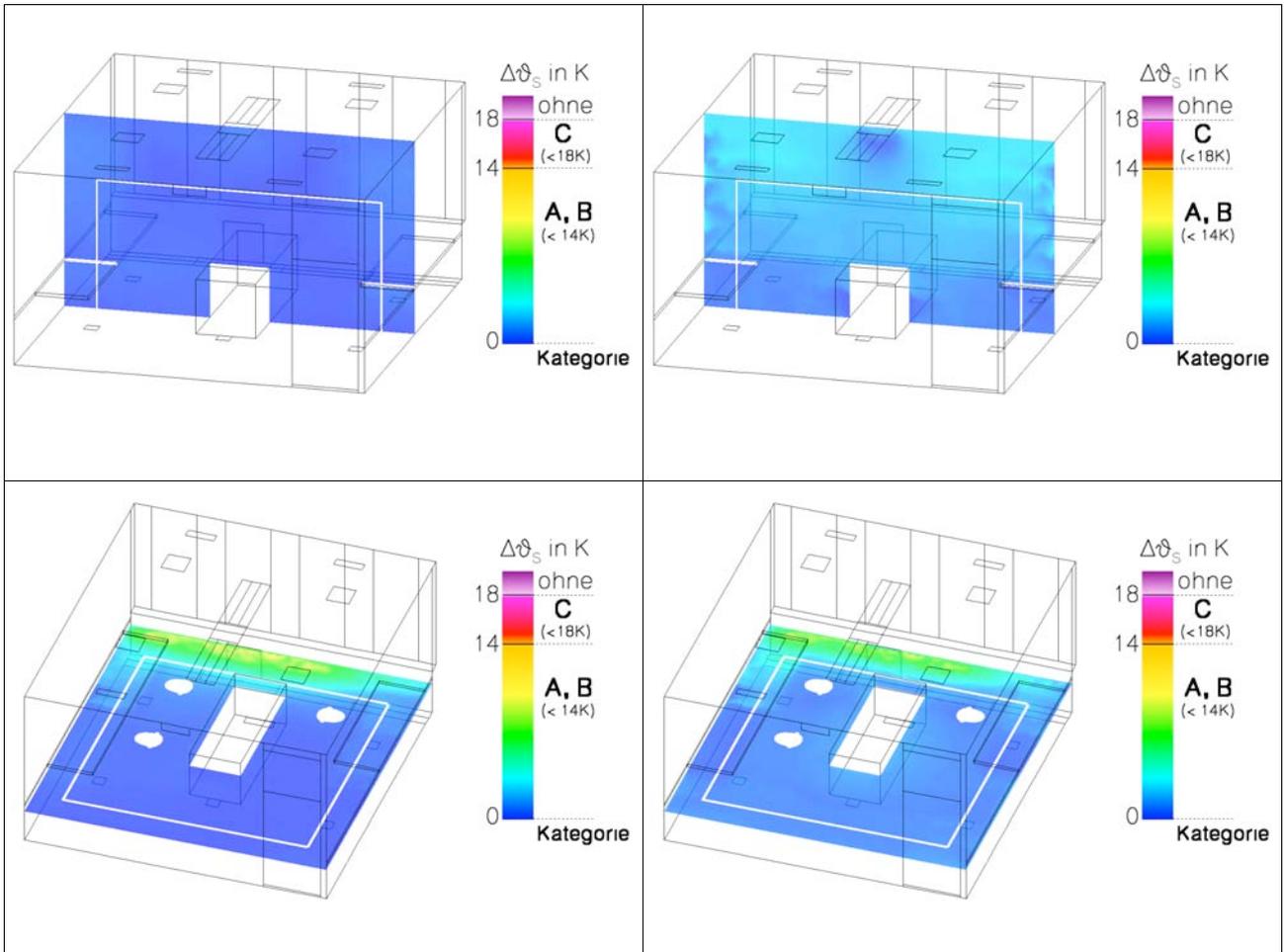
Variante 3: hier werden die Grenzwerte im deckennahen Bereich, außerhalb (oberhalb) des Aufenthaltsbereichs von Personen – am Vormittag bis 14 Uhr überschritten. Dies ließe sich durch bessere Regulierung vermeiden – früheres Einsetzen der Aufheizphase, um die Leistungsspitzen der Heizdecke zu brechen. Dies zeigt der Vergleich mit Variante 7 (Betonkernaktivierung) mit nur halb so großer flächenbezogener Leistung. Im unmittelbar fensternahen Bereich werden die Grenzwerte dauerhaft bis außerhalb der Komfortklasse C überschritten. Hier wirkt der Kontrast zwischen der warmen Decke und der Nähe der kühleren Fensterscheiben – Personen sind davon nicht betroffen.

Auch in Variante 20 kommt es nur in der morgendlichen Aufheizphase um 9 Uhr zu Überschreitungen der Grenzwerte lokal an der Decke außerhalb des Aufenthaltsbereichs von Personen.

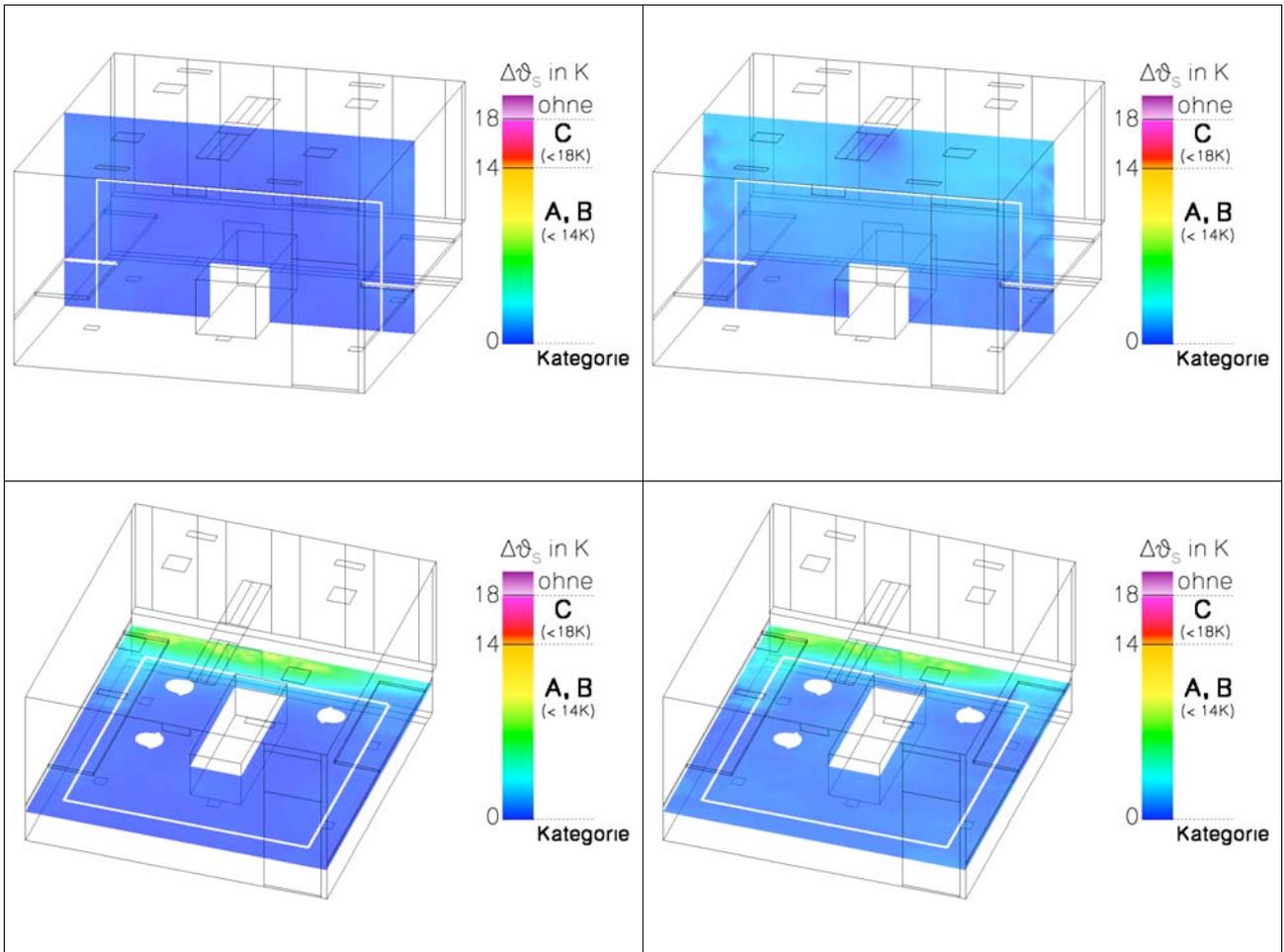
Ähnliches gilt für das Induktionsheizgerät der Varianten 23 das nur in der morgendlichen Aufheizphase lokalen Diskomfort erzeugt.

Die Werte der Strahlungsasymmetrie infolge kühler Decken sowie kühler oder warmer Wände sind in allen Varianten unterhalb der Grenzwerte für die Klasse A,B.

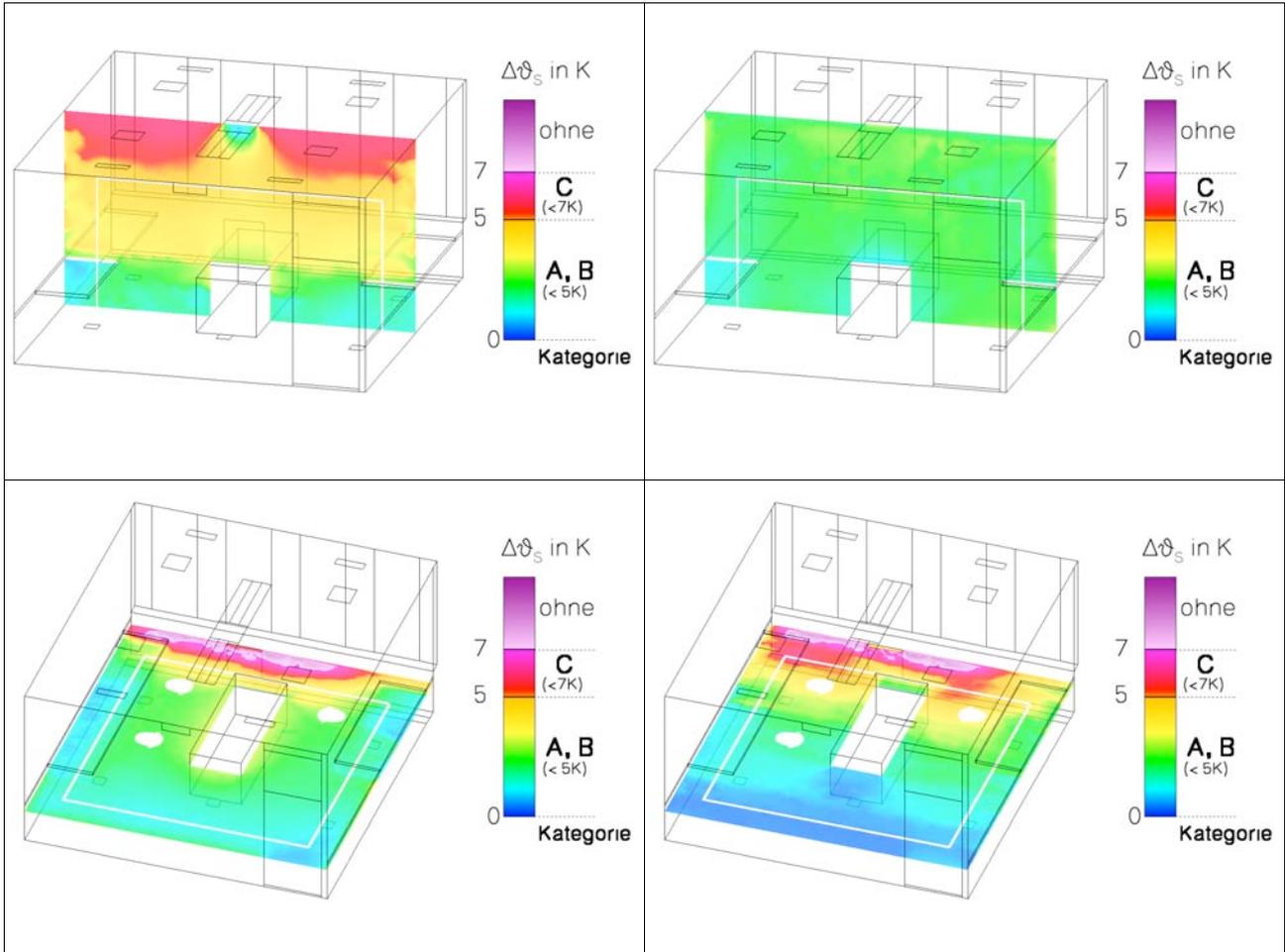
## 4.29.2 Übersicht über die Simulationsvarianten



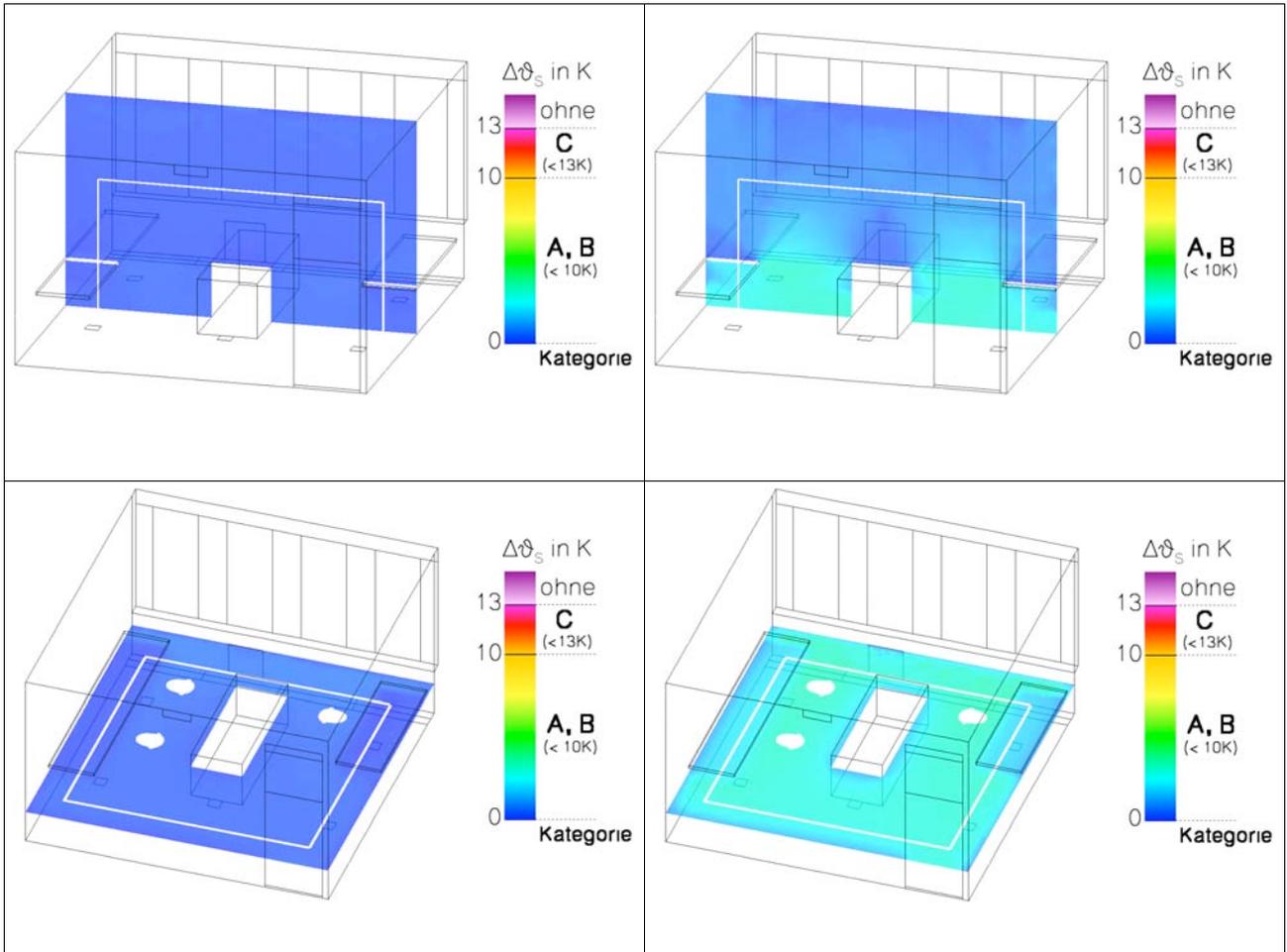
Var 1: PL4 F1D Sommer: Quelllüftung und Putzkühldecke mit Kapillarrohrmatte: kühle Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



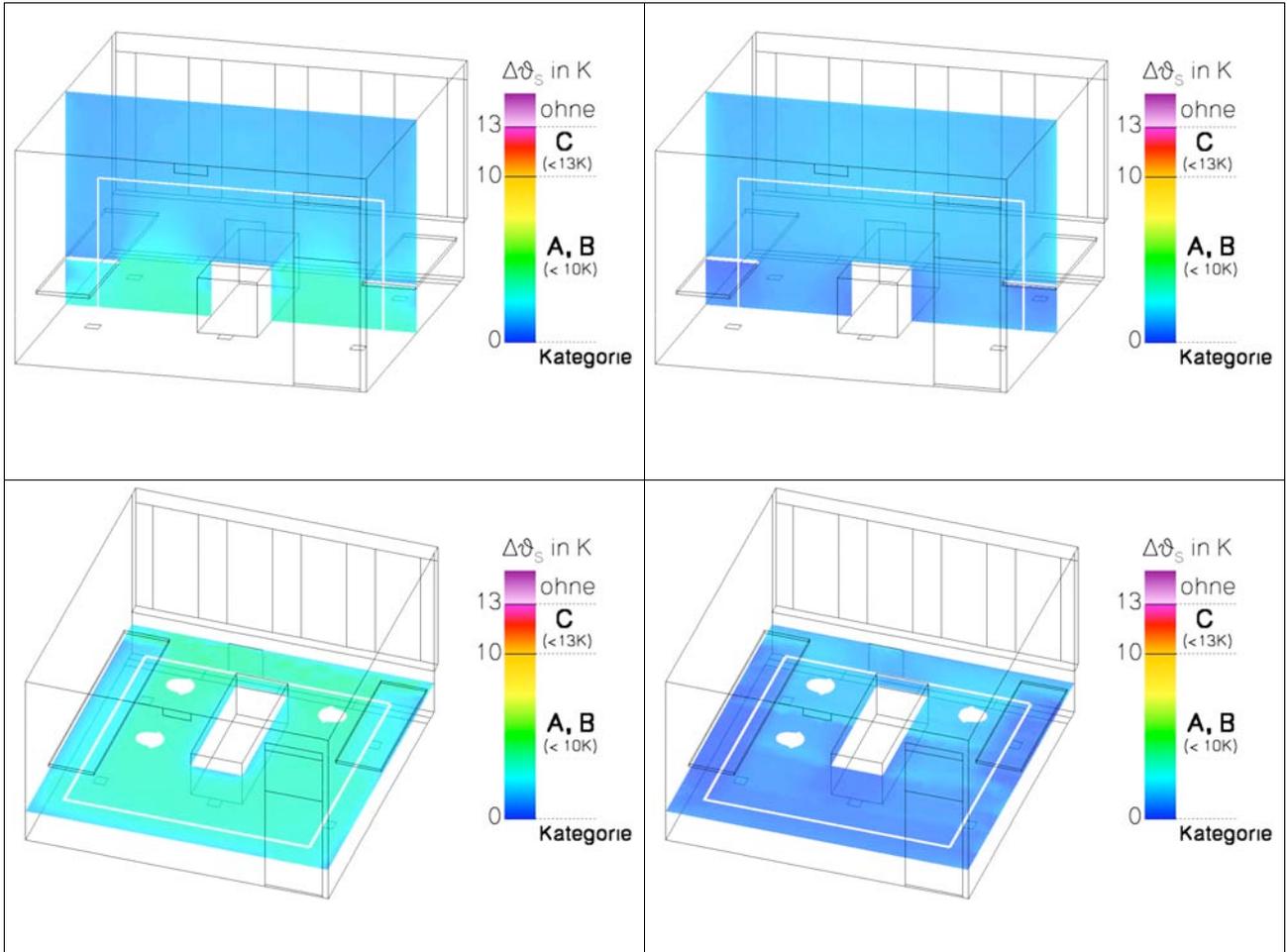
Var 2: PL5 F1D Sommer: Drallauslässe im Boden und Putzkühldecke mit Kapillarrohrmatte: kühle Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



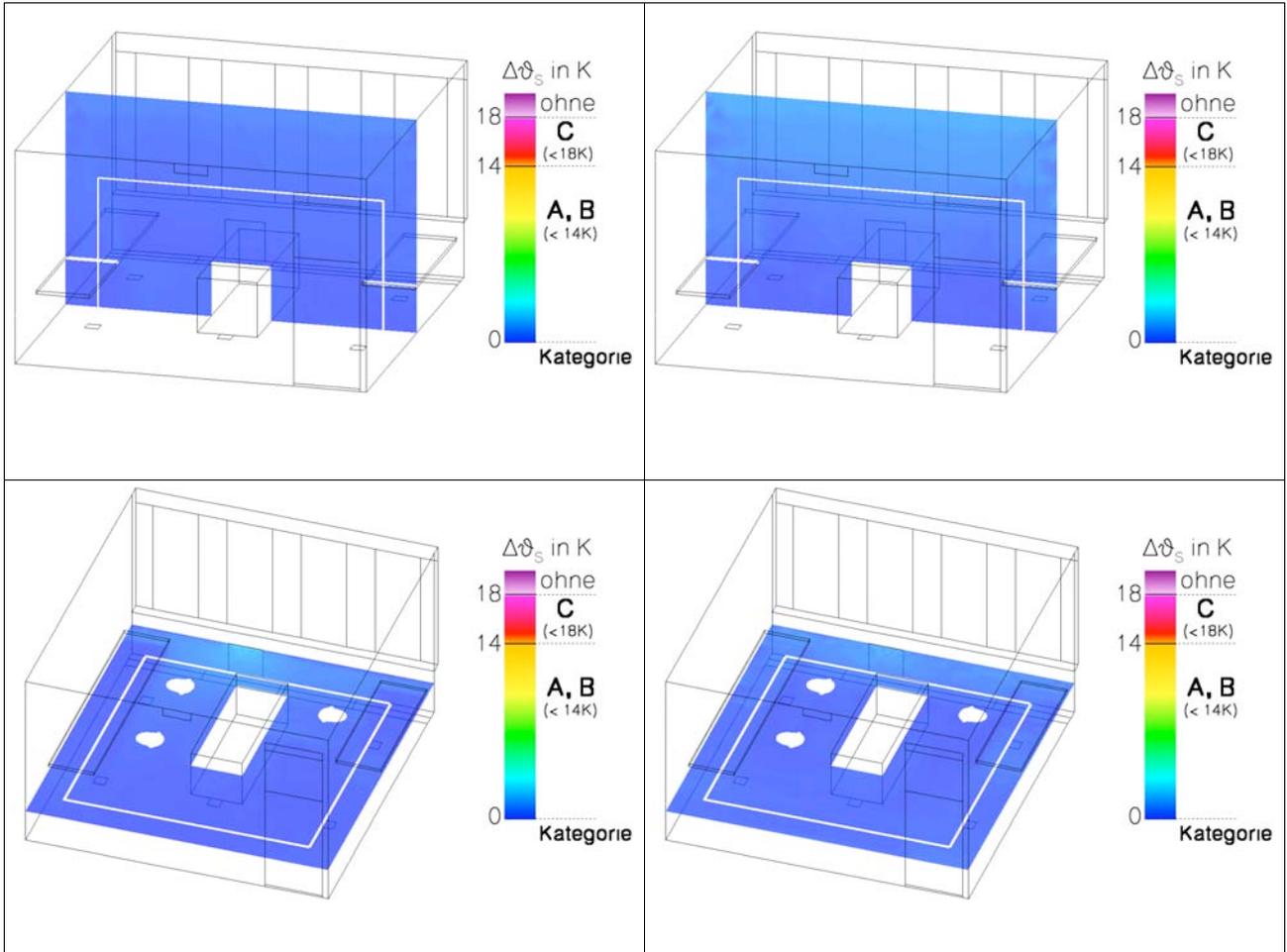
Var 3: PL5 F1D Winter: Drallauslässe im Boden und Putzheizdecke mit Kapillarrohrrmatte: warme Decke. Ab 14 Uhr sind alle Werte im Vertikalschnitt in Klasse A, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



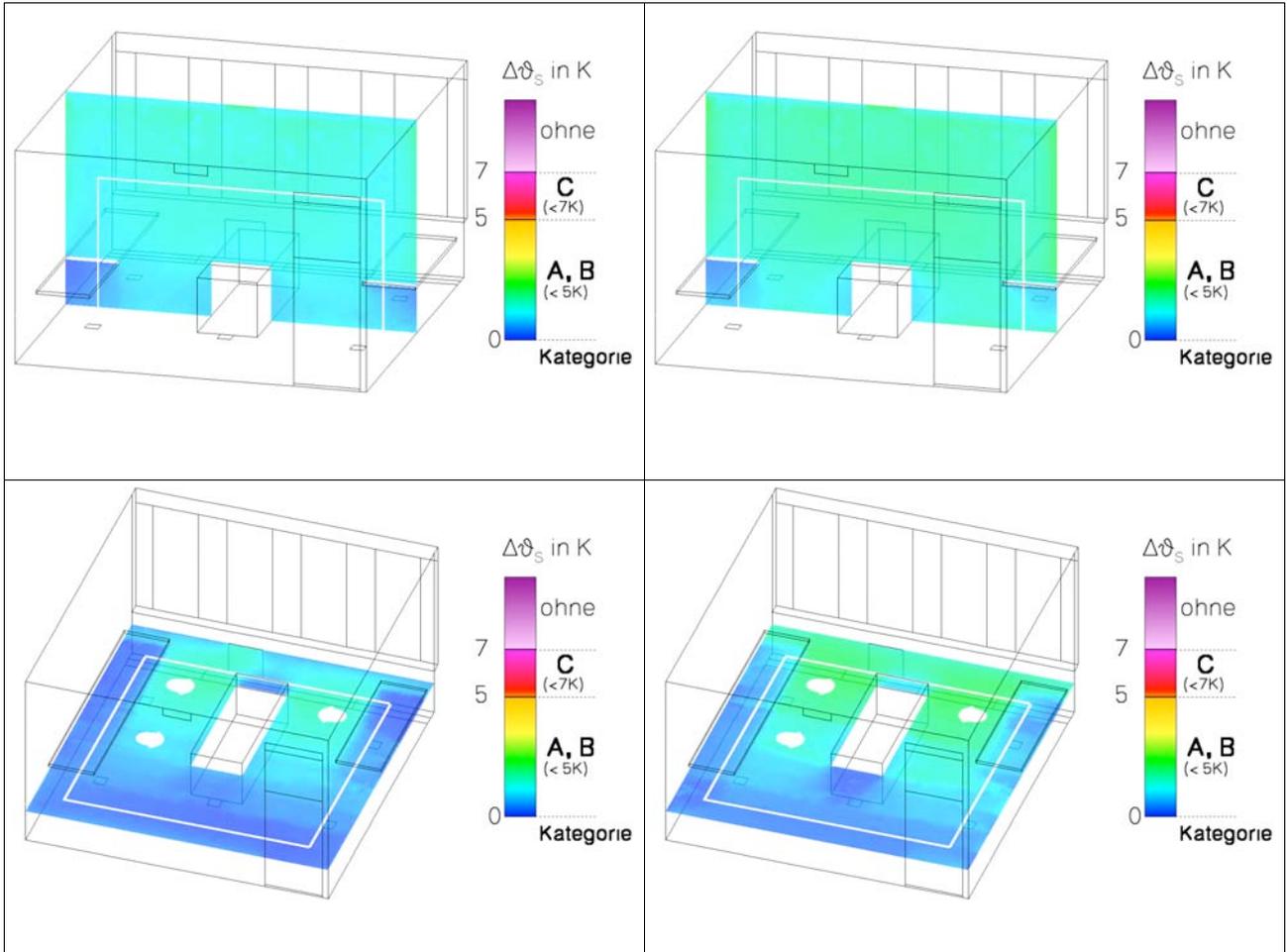
Var 4: PL2 F5A Sommer: Lüftungsgitter und Fußbodenkühlung: kühle Wand, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



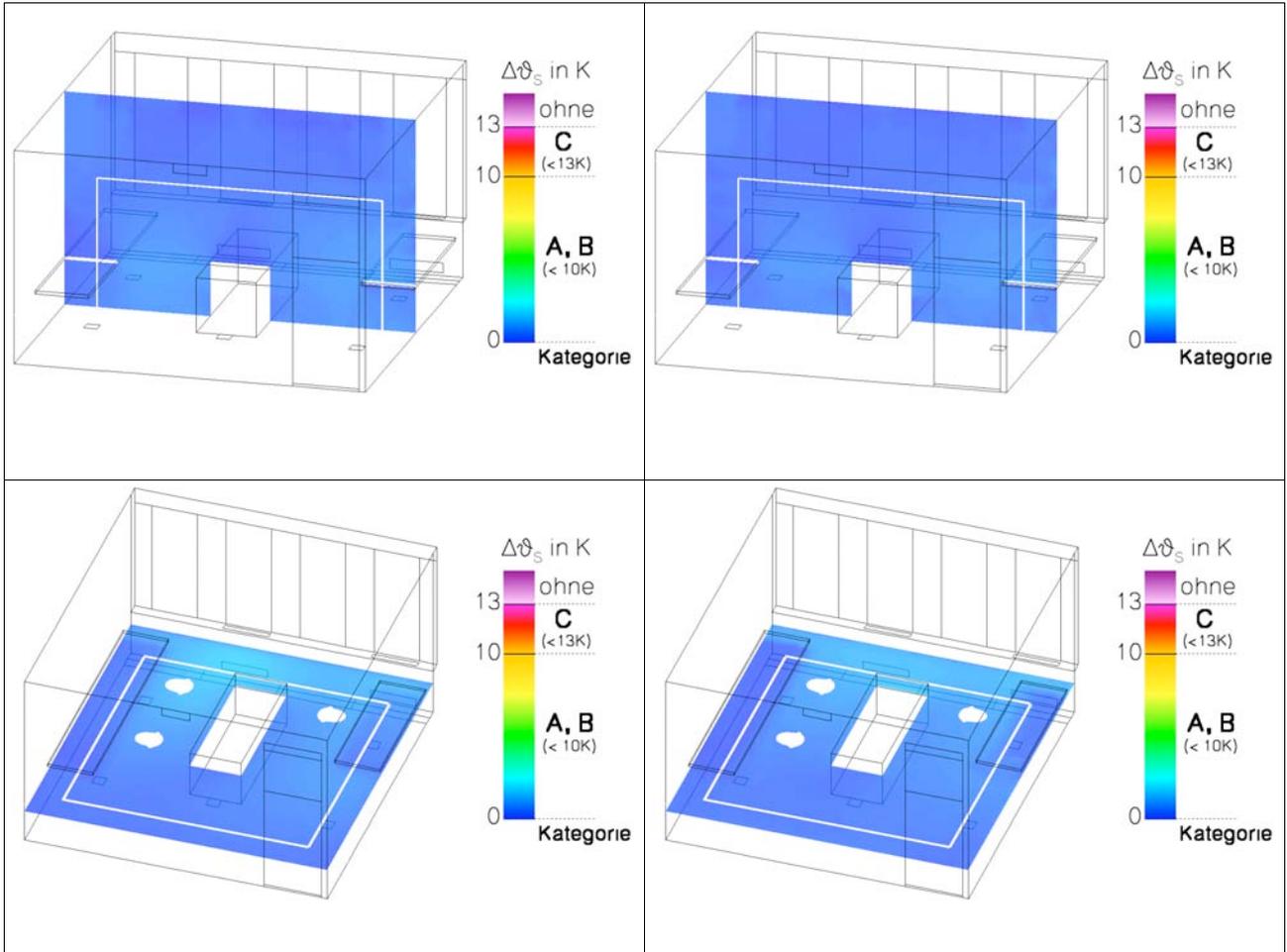
Var 5: PL2 F5A Winter: Lüftungsgitter und Fußbodenheizung: kühle Wand, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



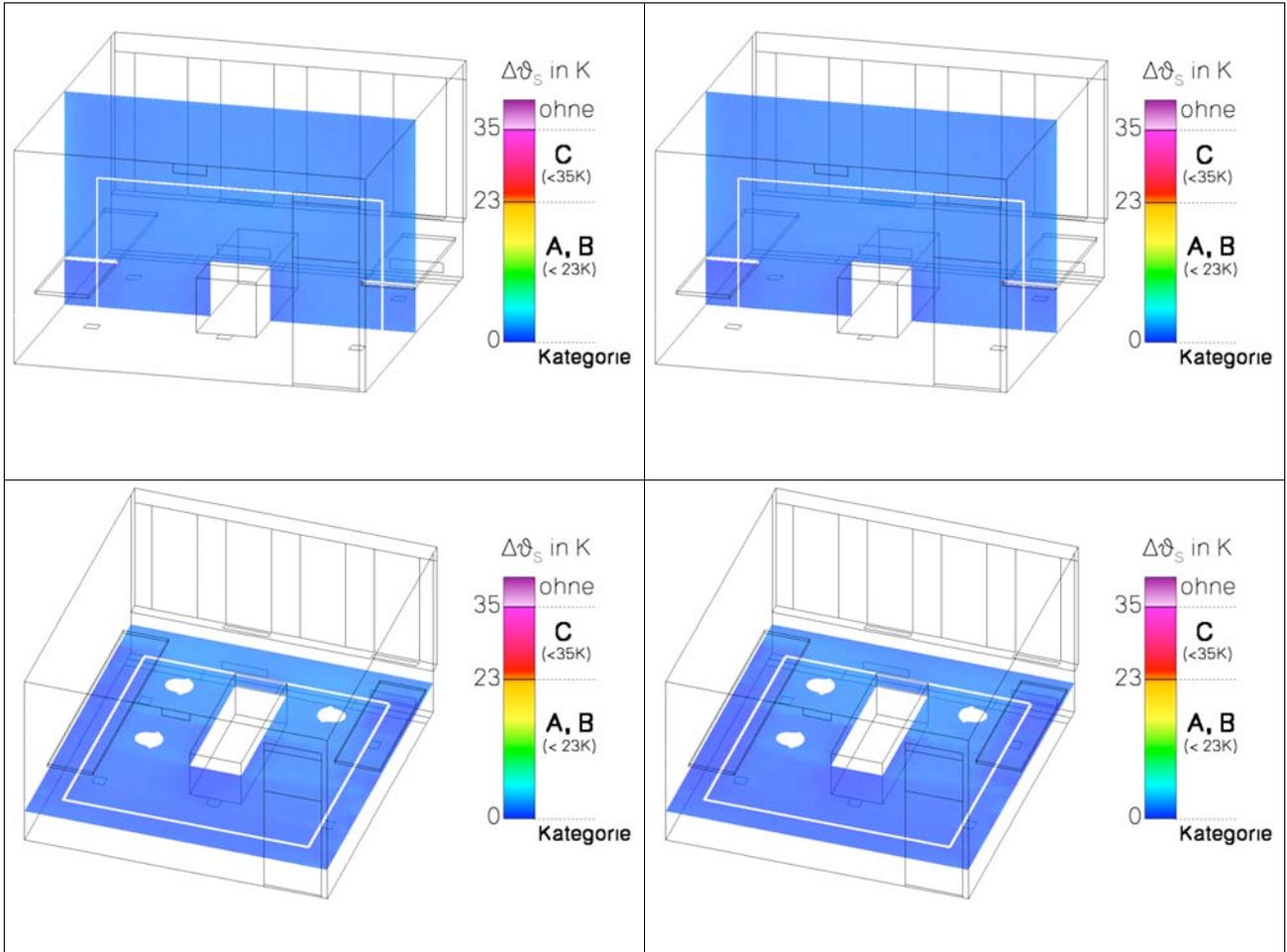
Var 6: PL4 F2A Sommer: Quelllüftung und Betonkernaktivierung: kühle Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



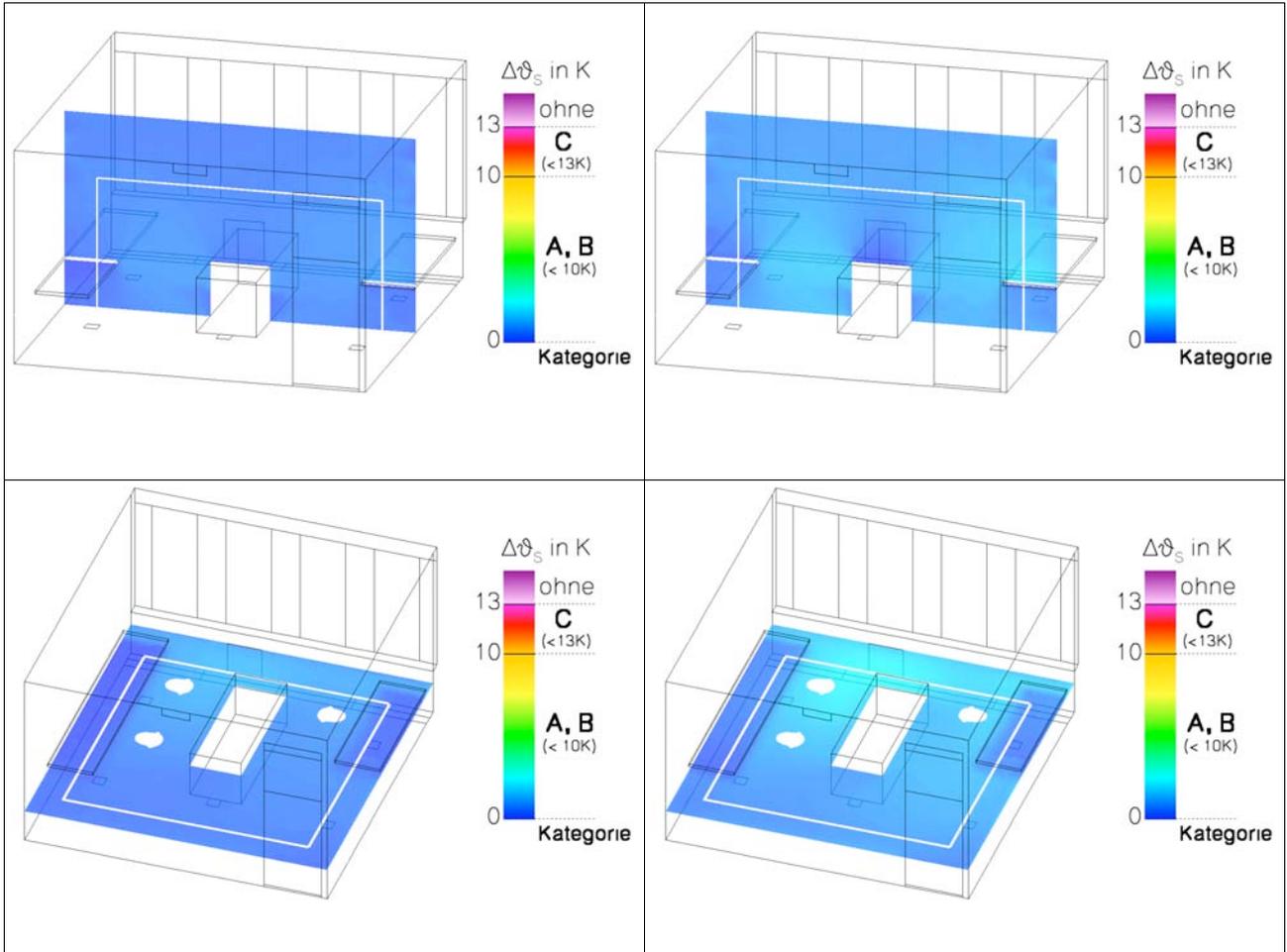
Var 7: PL4 F2A Winter: Quelllüftung und Betonkernaktivierung: warme Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



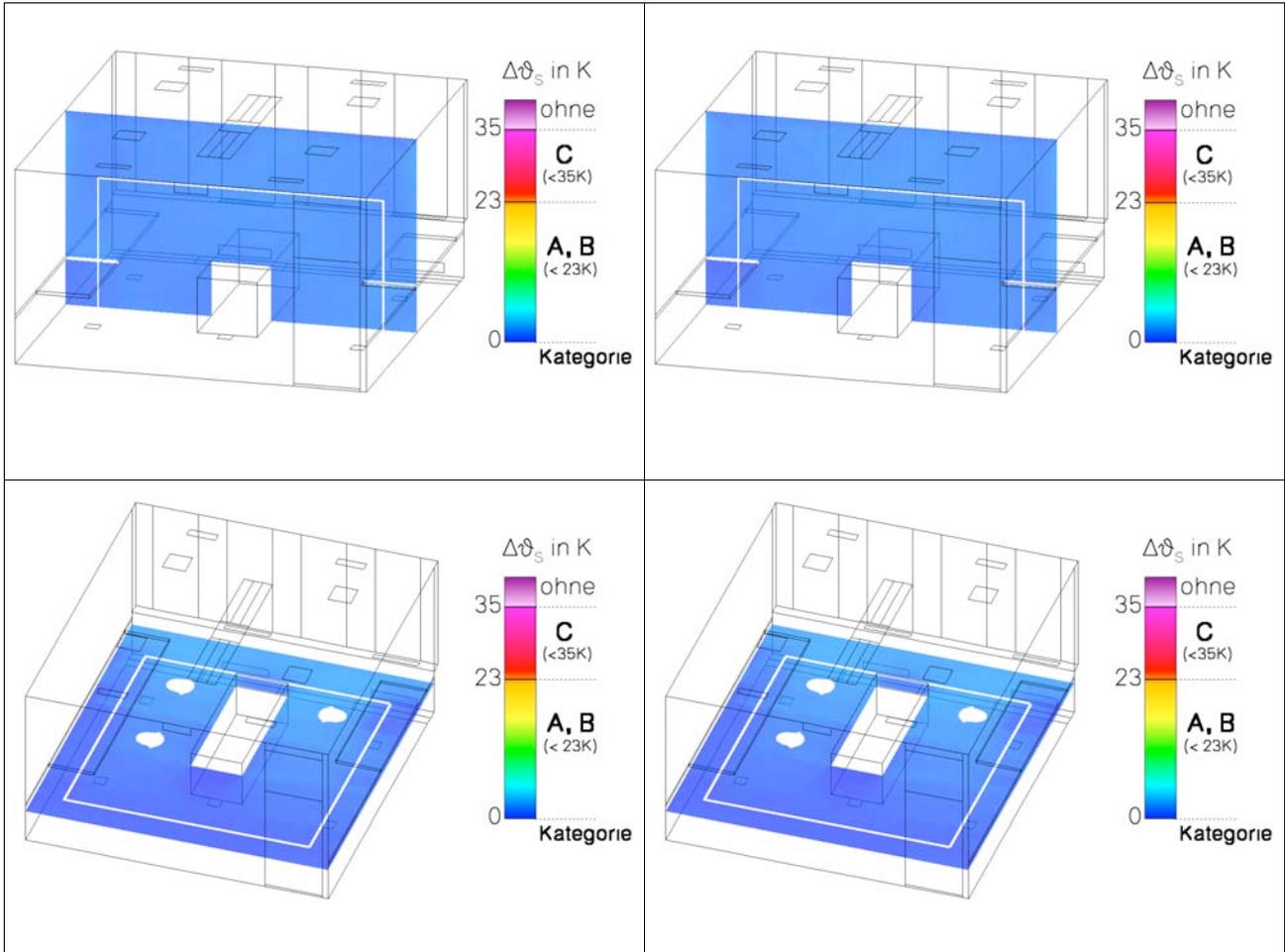
Var 8: PL2 L1A Sommer: Lüftungsgitter und Ventilator-konvektoren: kühle Wand, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



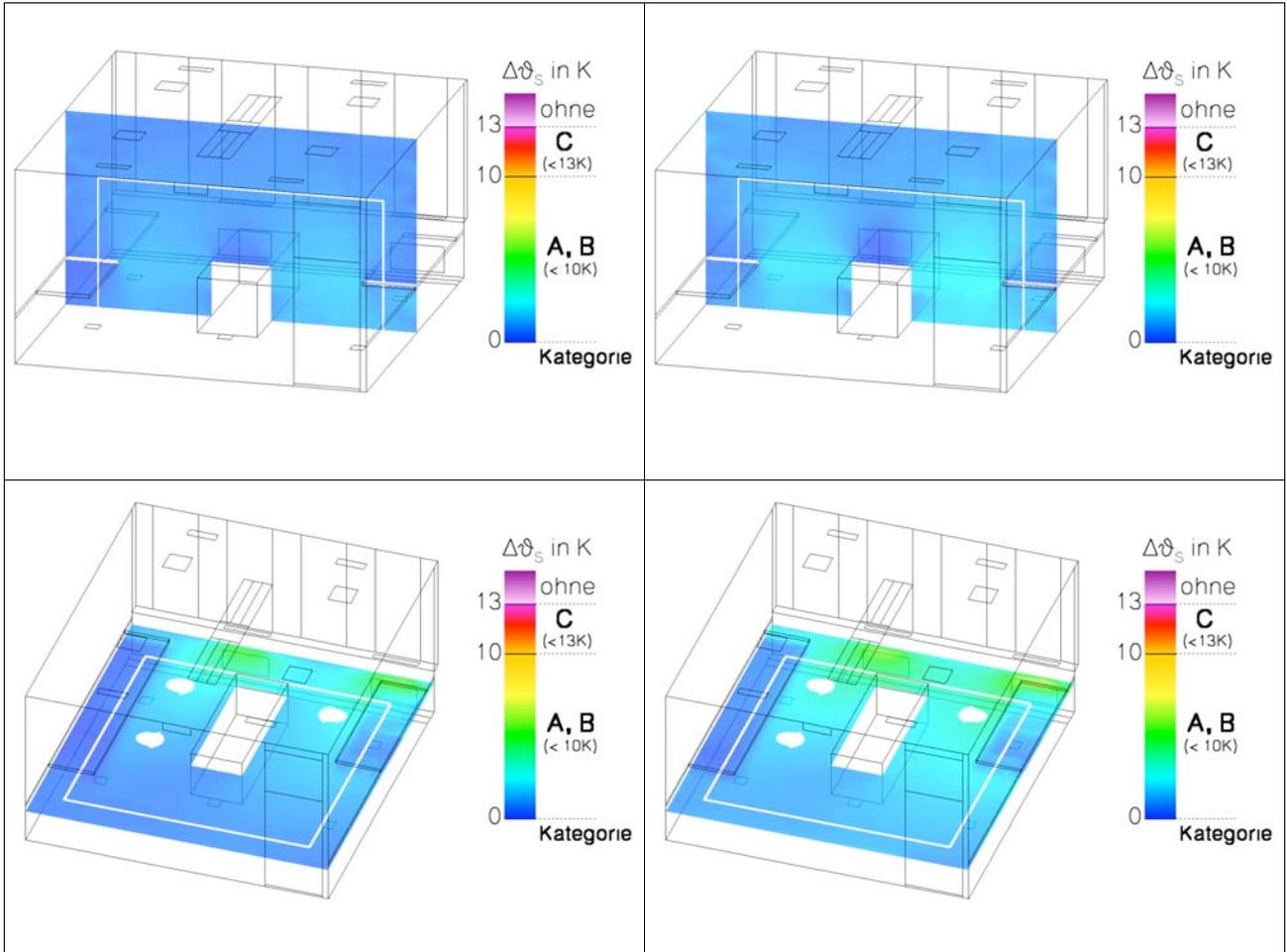
Var 9: PL2 L1A Winter: Lüftungsgitter und Ventilator-konvektoren: kühle Wand, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



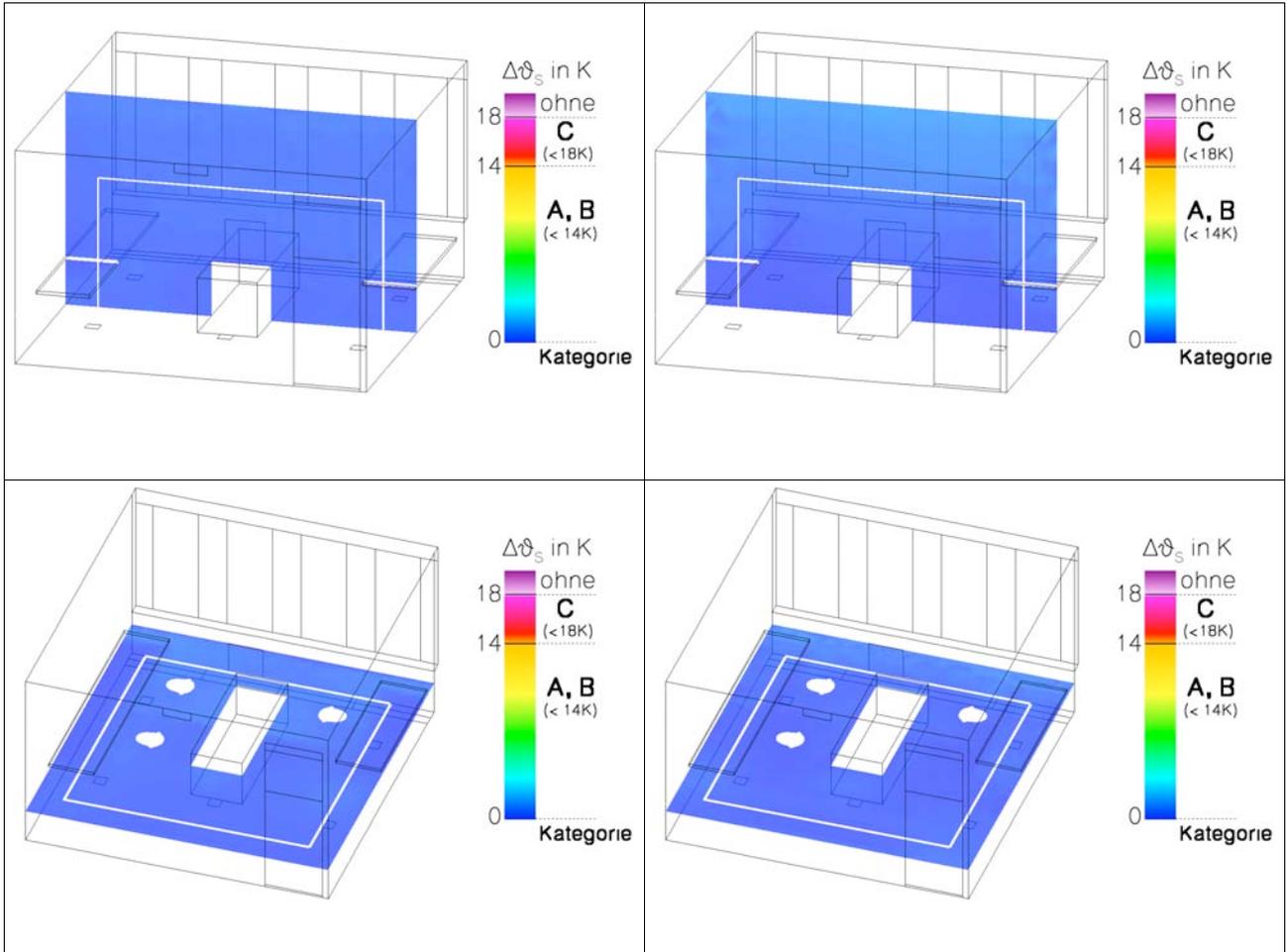
Var 10: L1A Sommer: Ventilator-konvektoren mit Primärluftanteil: kühle Wand, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



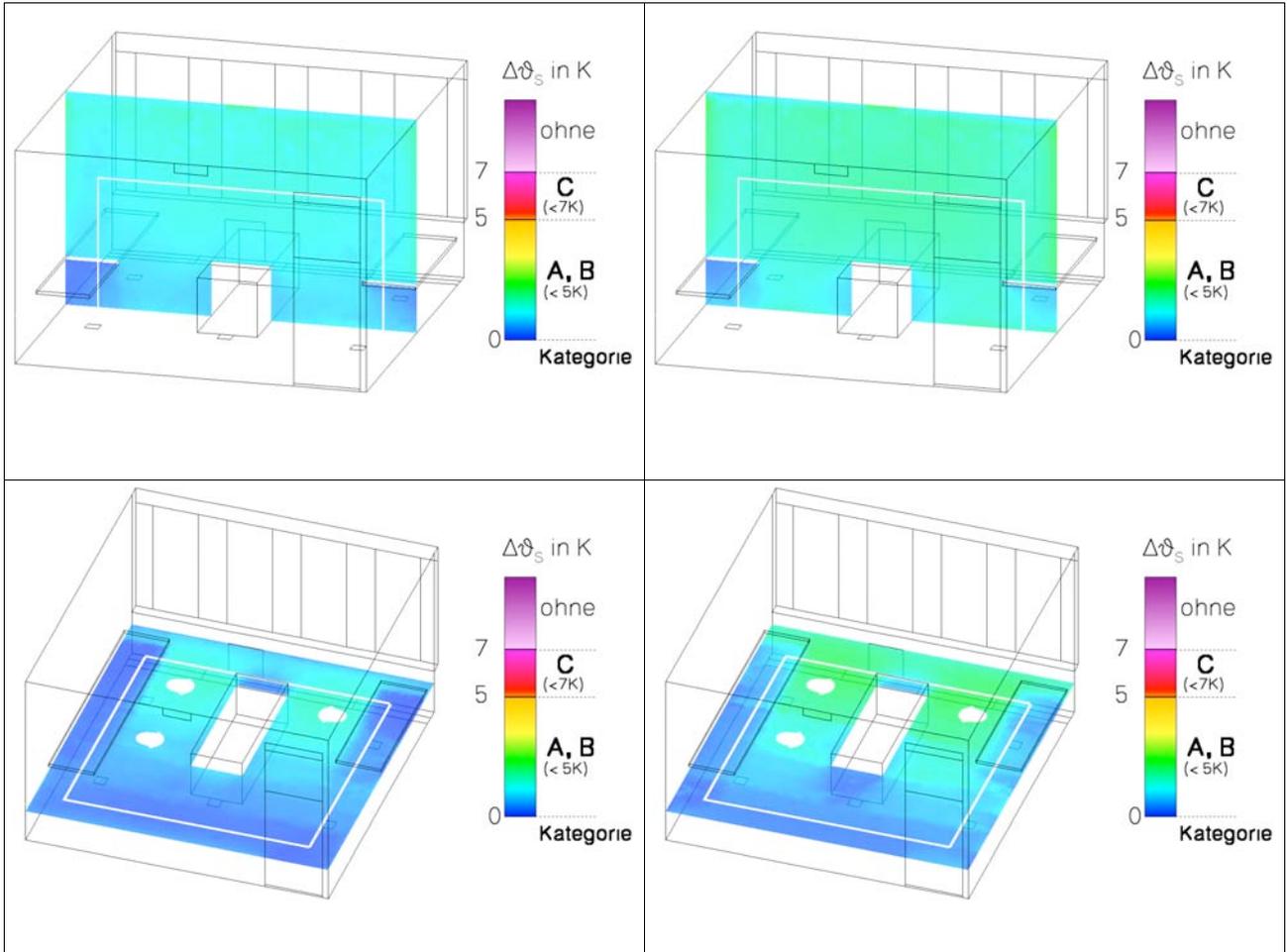
Var 11: L1A Winter: Ventilatorkonvektoren mit Primärluftanteil: warme Wand, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



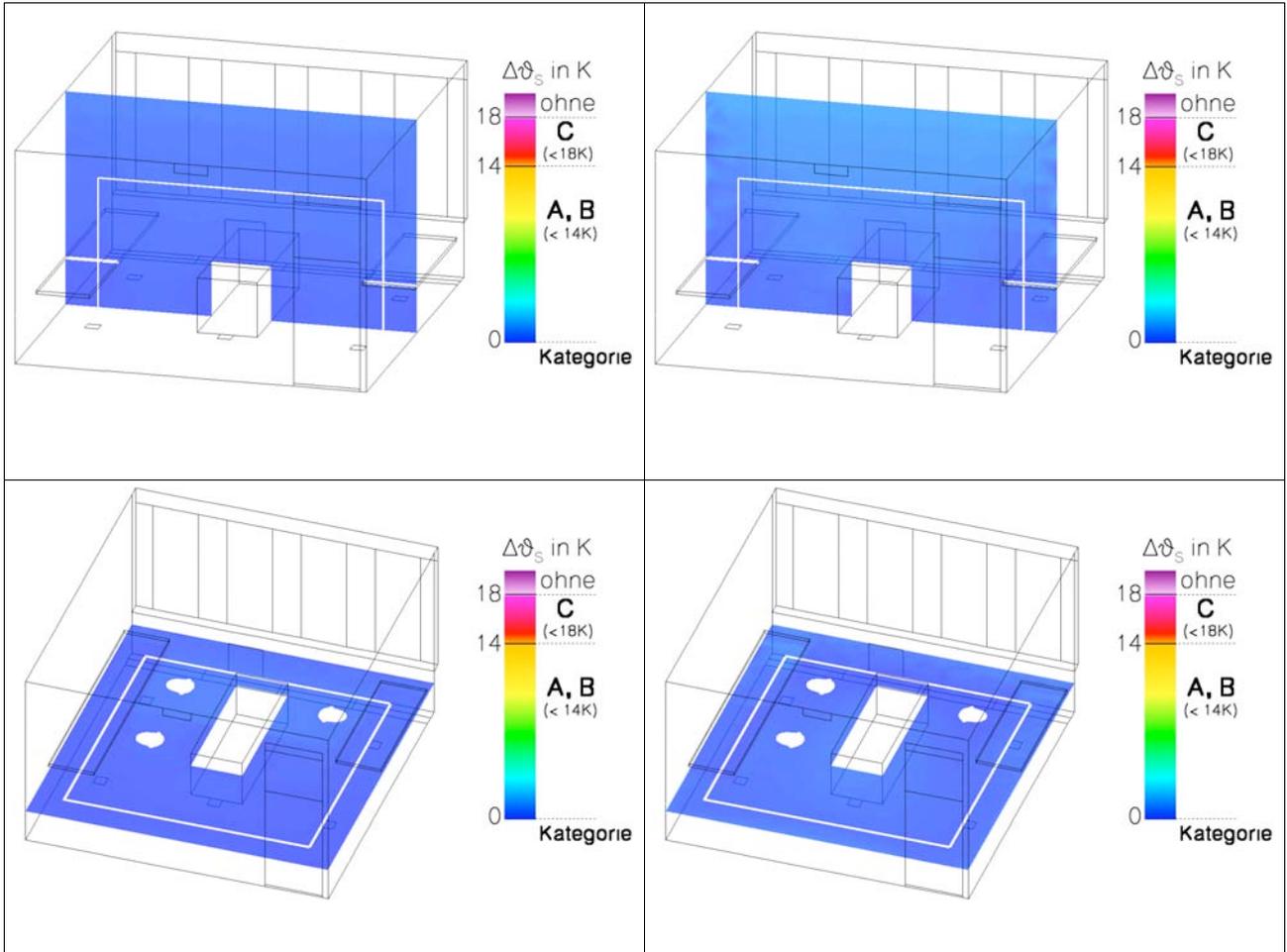
Var 12: L1B Sommer: Ventilator-konvektoren Komfortbrüstungsgeräte: kühle Wand, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



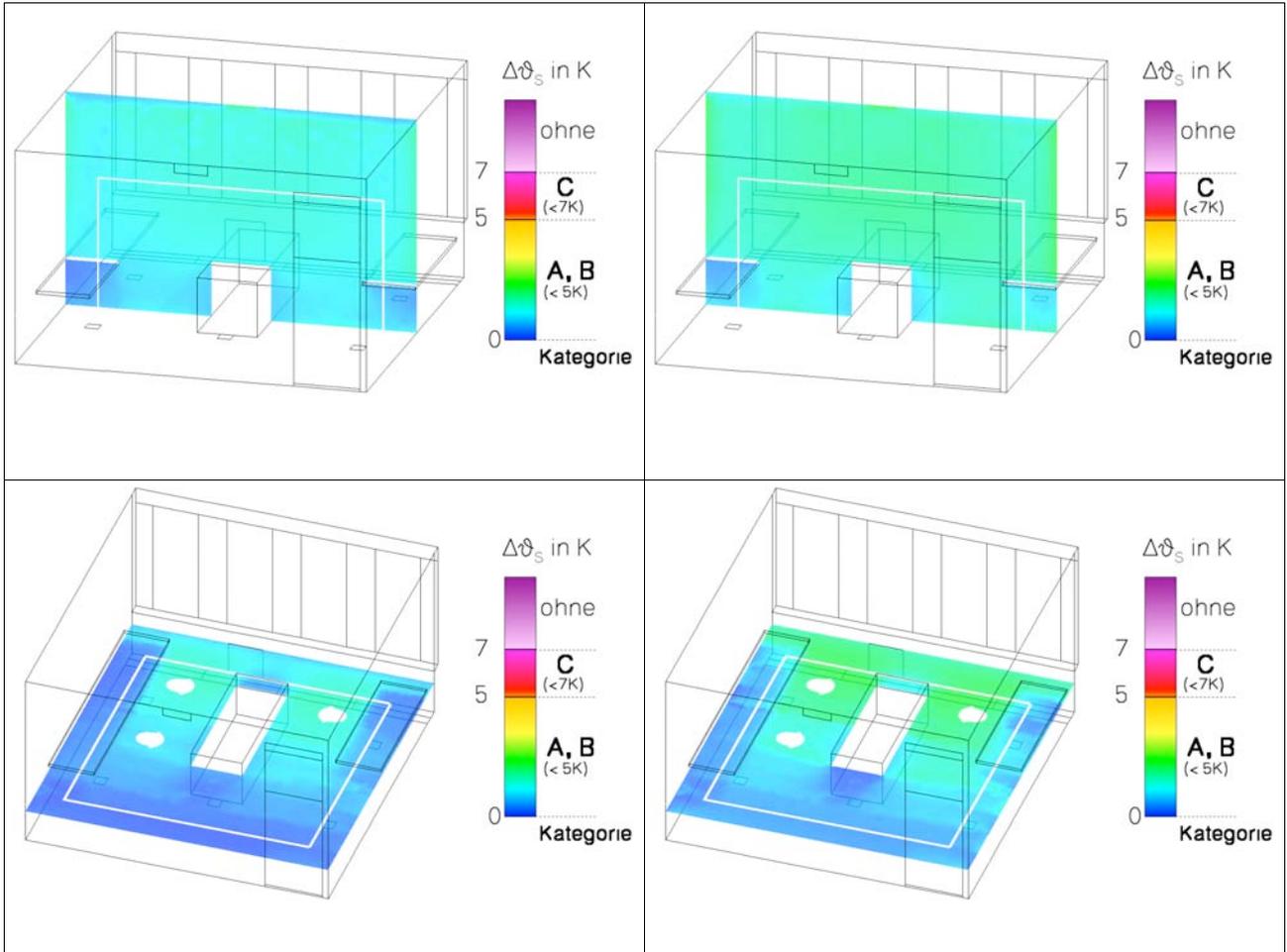
Var 13: PL5 F2A Sommer: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung: kühle Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



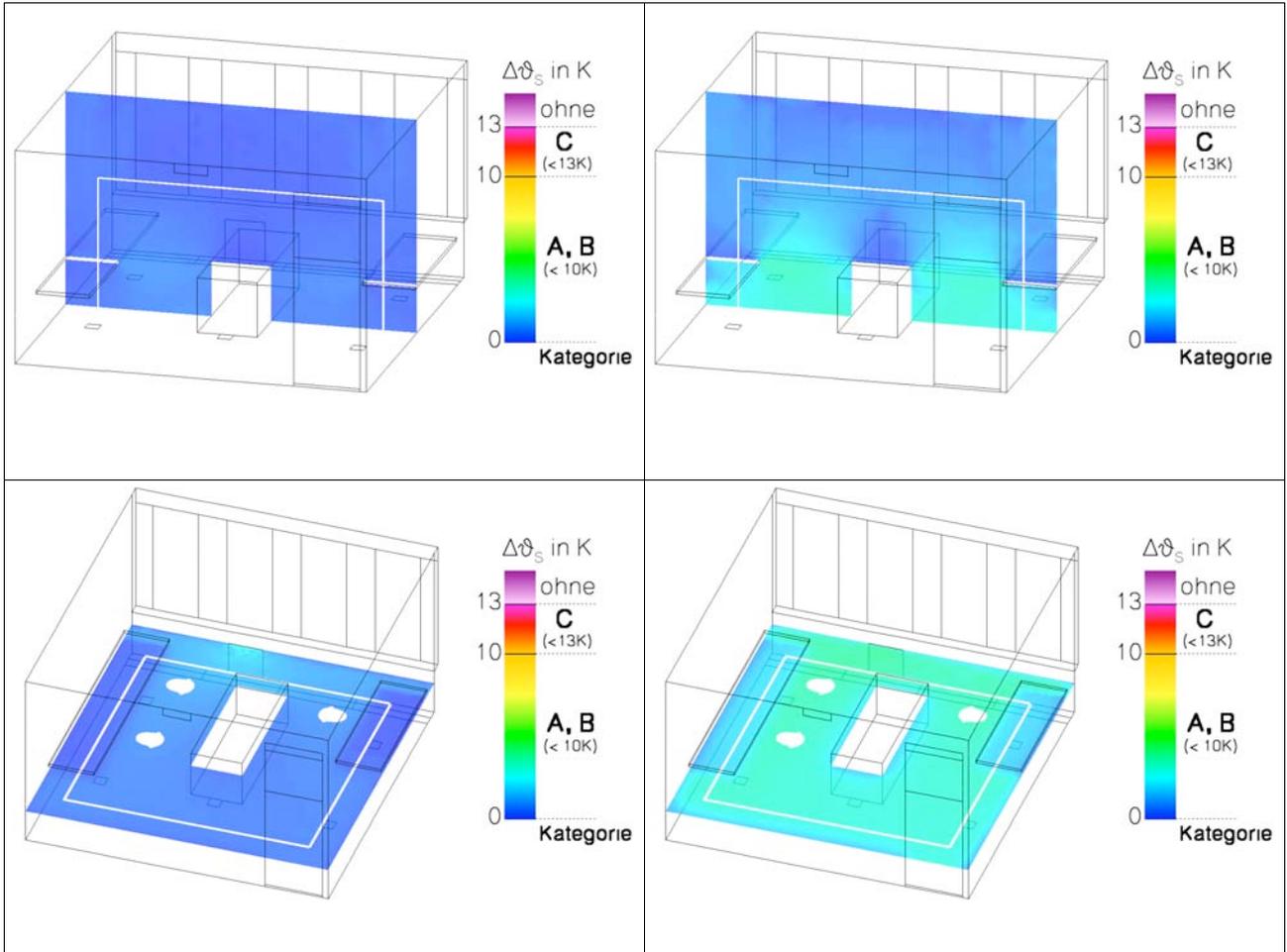
Var 14: PL5 F2A Winter: Drallauslässe im Boden und Betonkernaktivierung: warme Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



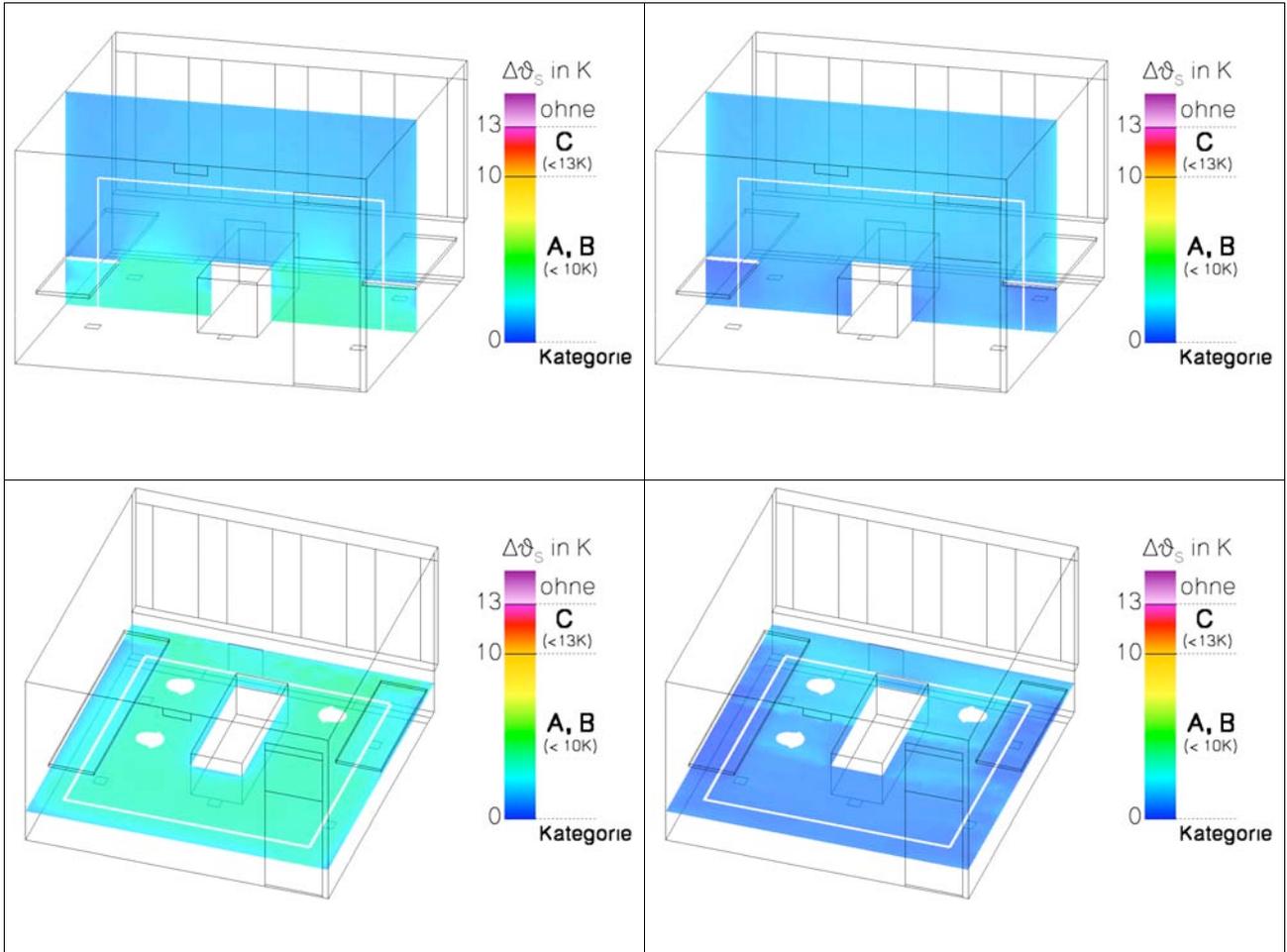
Var 15: PL2 F2A Sommer: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung: kühle Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



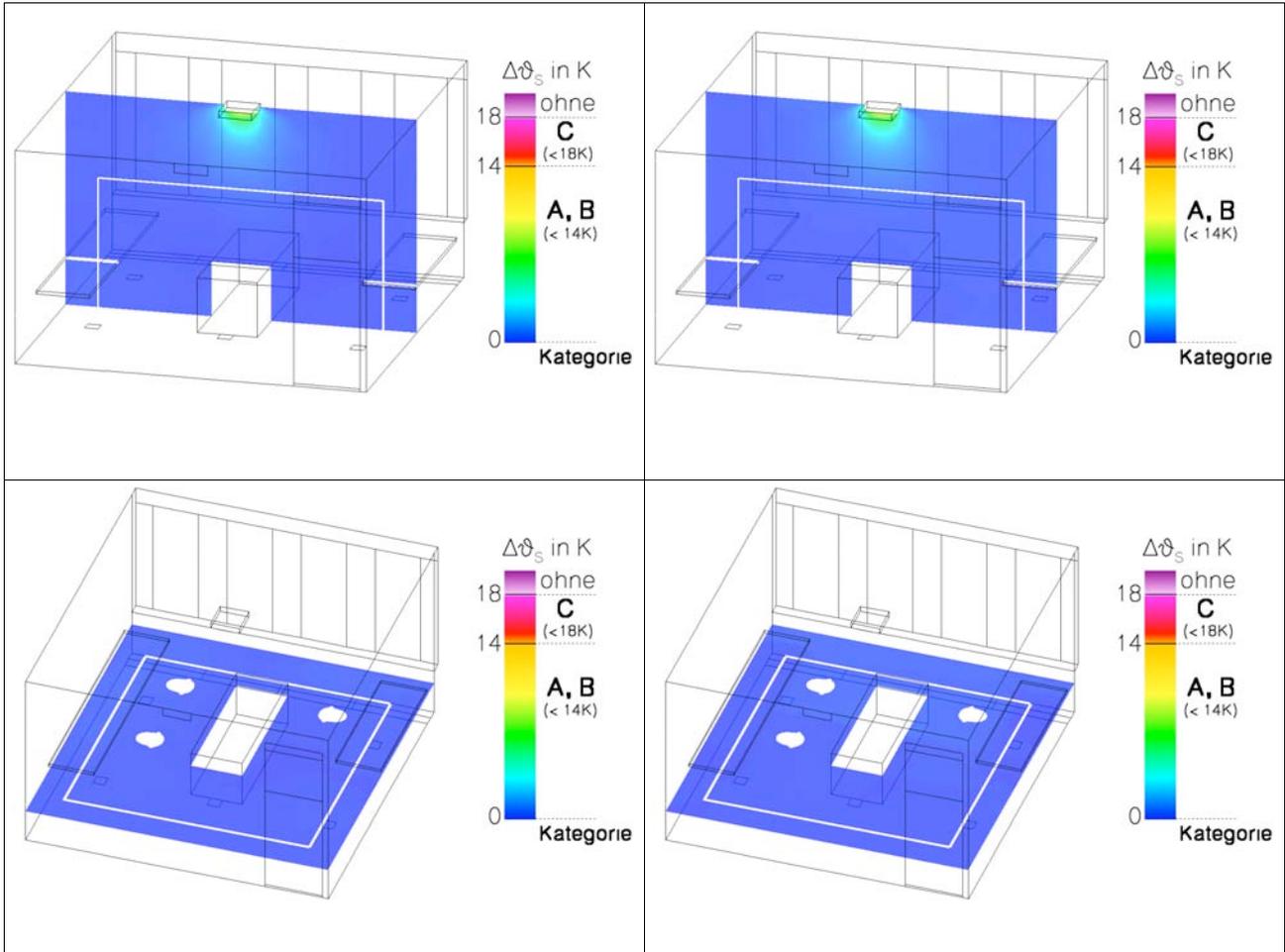
Var 16: PL2 F2A Winter: Lüftungsgitter und Betonkernaktivierung: warme Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



Var 17: PL4 F5A Sommer: Quelllüftung und Fußbodenkühlung: kühle Wand, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)

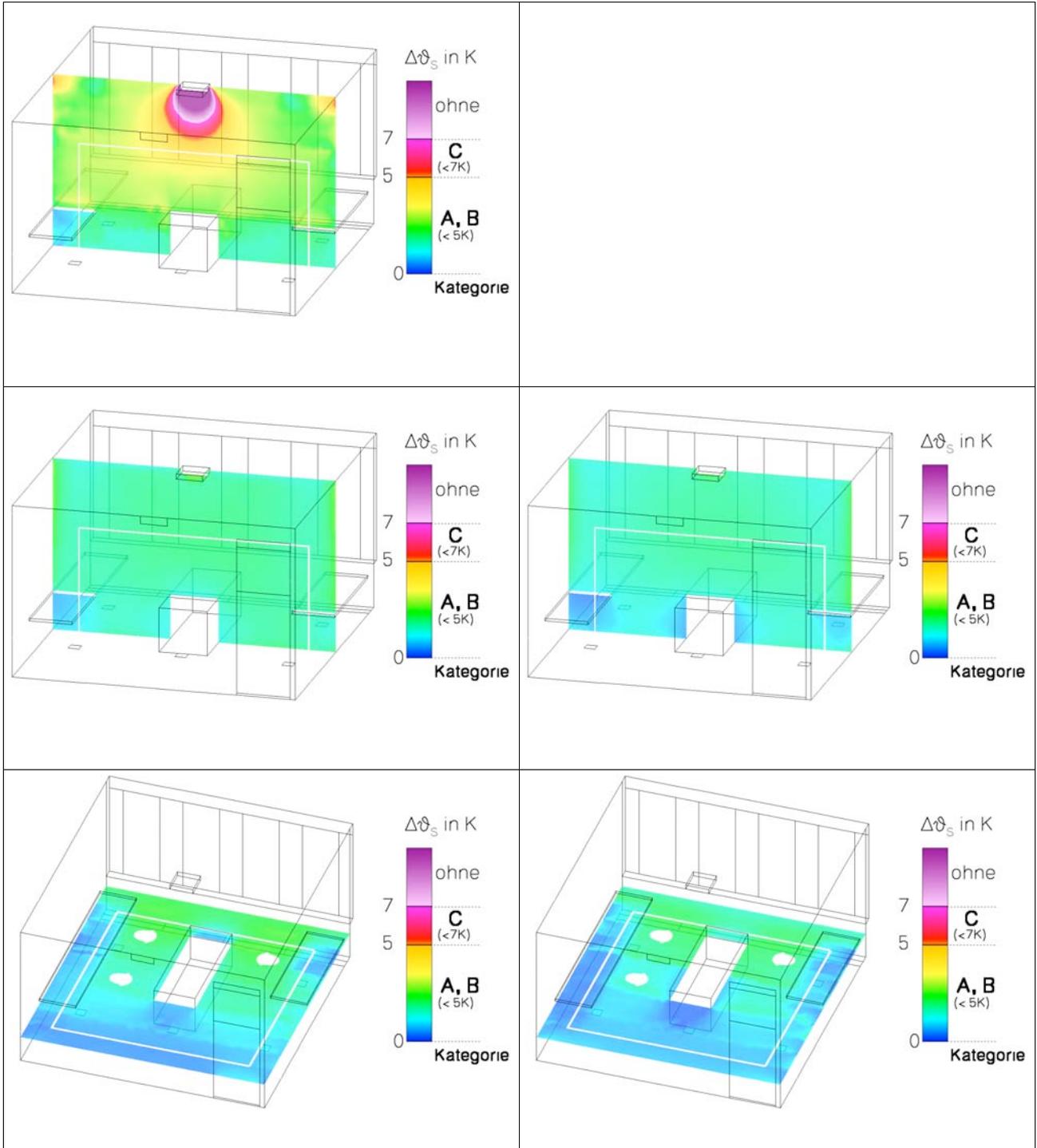


Var 18: PL4 F5A Winter: Quelllüftung und Fußbodenheizung: kühle Wand, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)

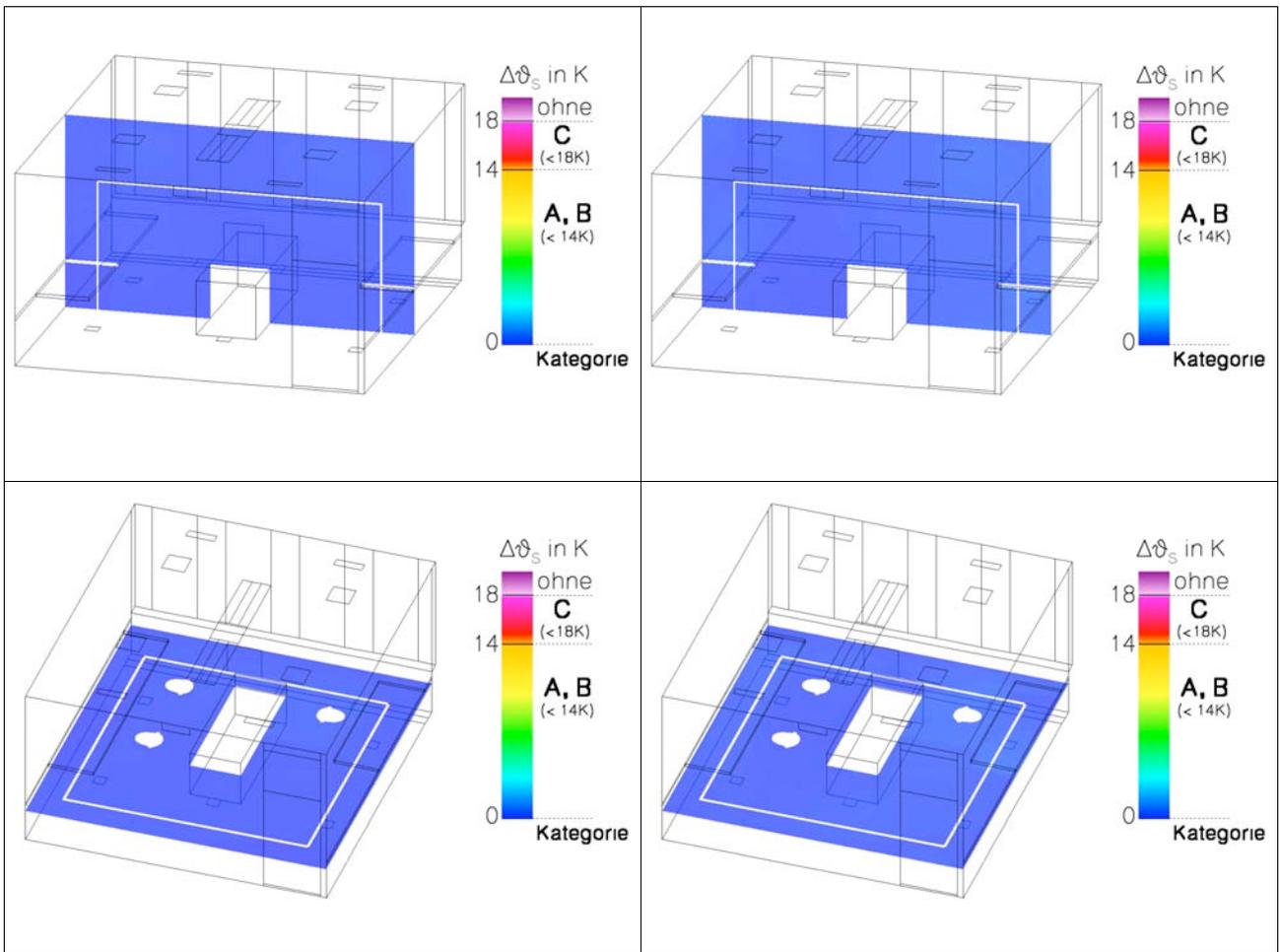


Var 19: PL2 L2 Sommer: Lüftungsgitter und Deckenfancoil: kühle Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)

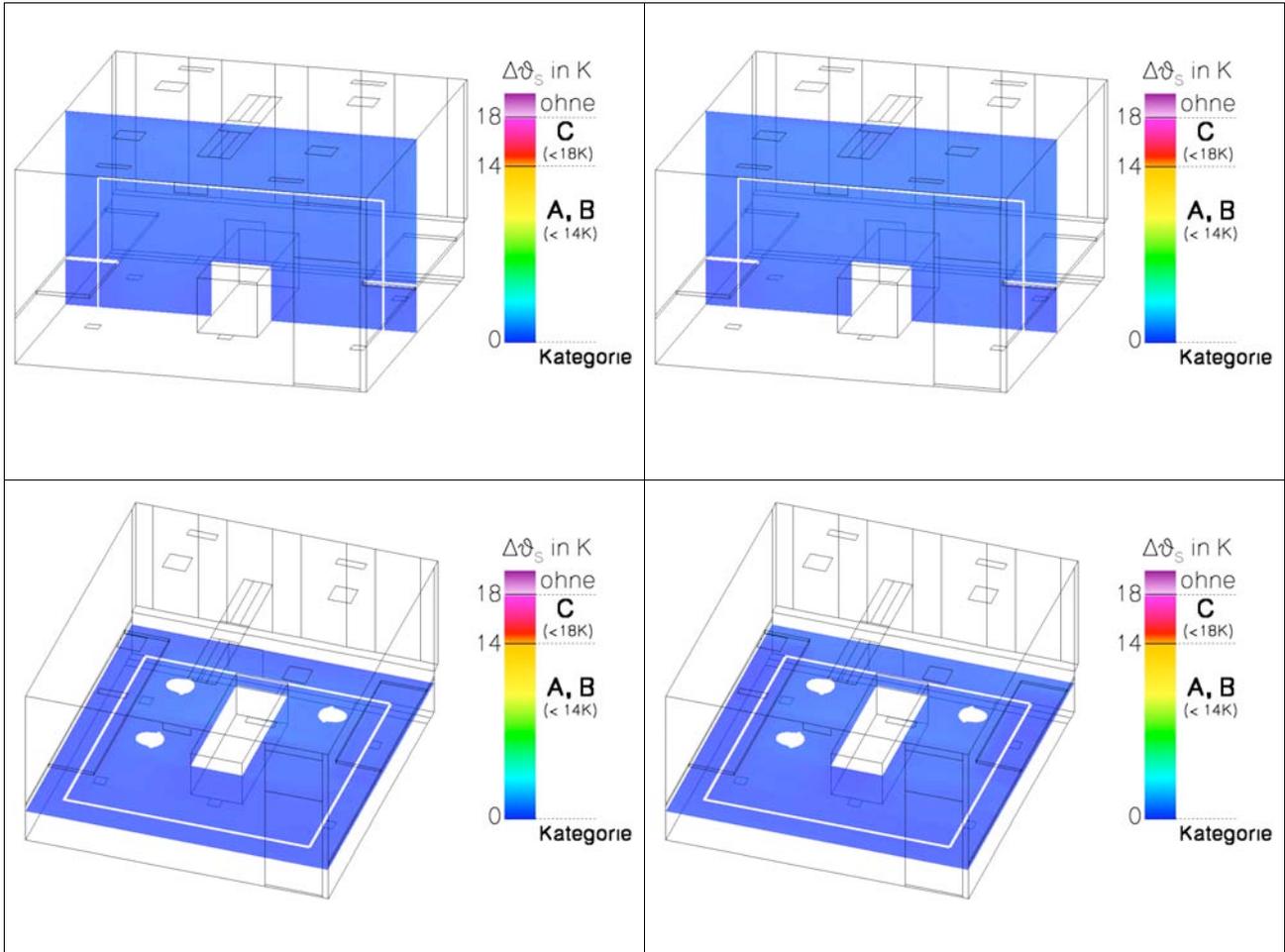
Zum Vergleich: 9 Uhr, morgendliche Aufheizphase



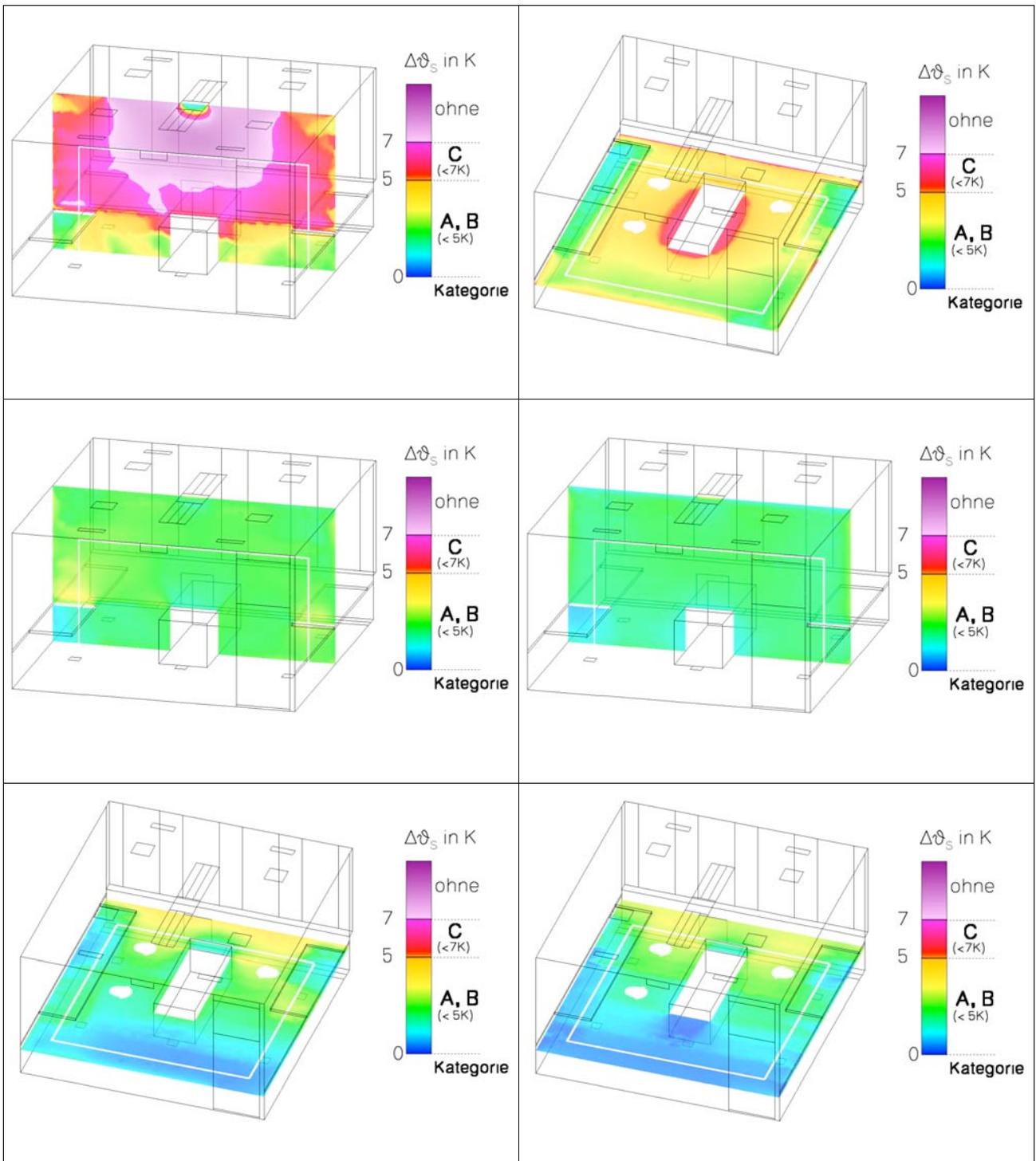
Var 20: PL2 L2 Winter: Lüftungsgitter und Deckenfancoil: warme Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



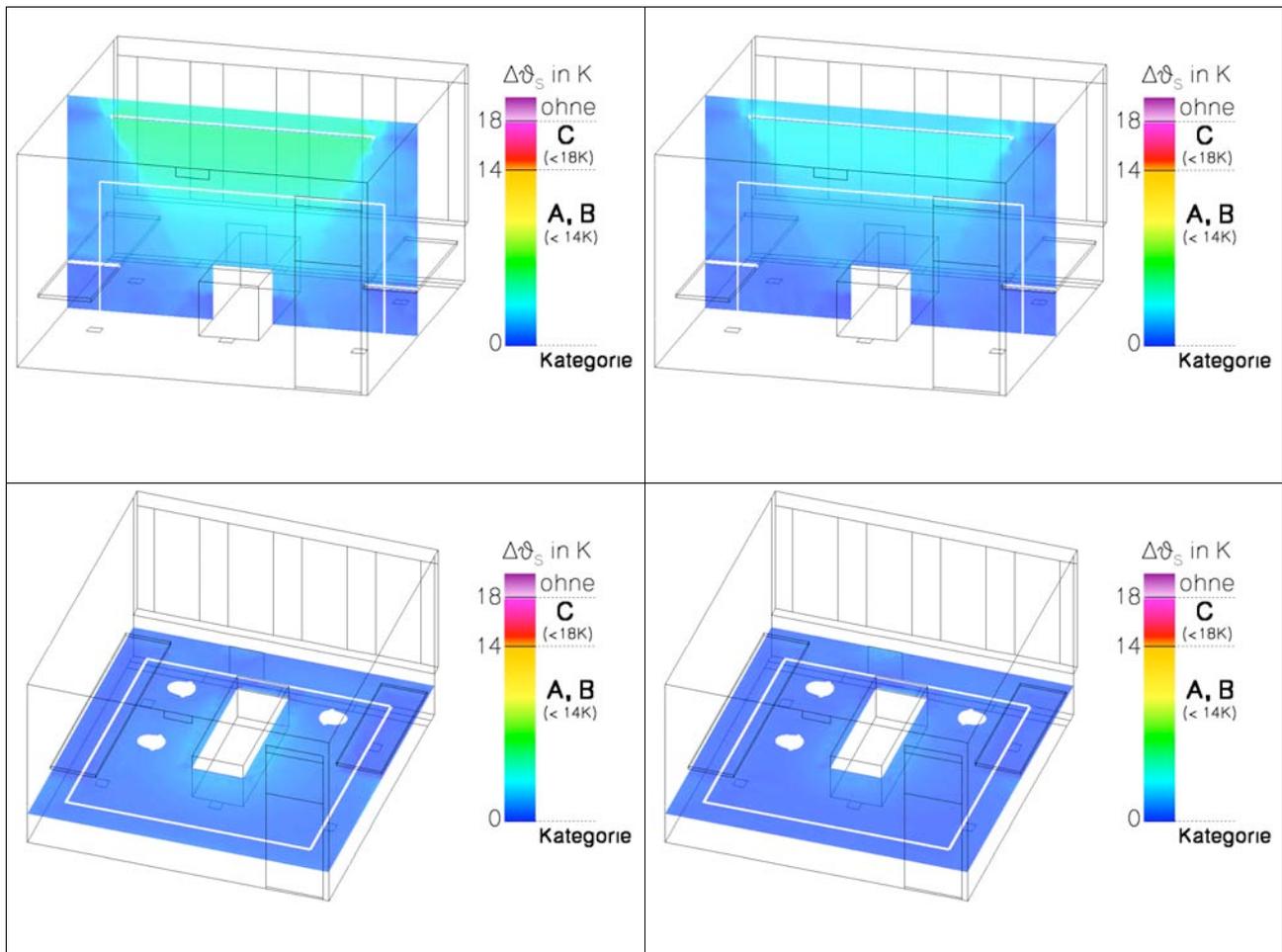
Var 21: L3 Sommer: Deckeneinbaugerät mit Drallausslässen: kühle Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



Var 22: FL1 Sommer: Induktionskühlgerät (Kühlbalken): kühle Decke, 10 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts)



Var 23: FL1 Winter: Induktionsheizgerät (Heizbalken): warme Decke. Mitte und unten links: 10 Uhr, rechts 16 Uhr, ganz oben: zum Vergleich die morgendliche Aufheizphase um 9 Uhr.



Var 24: PL4 F3 Sommer: Kühlsegel mit Quellluftauslass. 14 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts): kühle Decke

## 4.30. Einzelbesprechung der Haustechnikvarianten

### 4.30.1 Vorbemerkung

Jede der im Modellraum simulierten Haustechnikvarianten besteht aus Einrichtungen zur Frischluftzufuhr und -verteilung und aus Einrichtungen zum Heizen oder Kühlen. Die Abluftabsaugung ist einheitlich oberhalb der Tür angeordnet und variiert nicht.

Die Funktion der Heiz- und Kühleinrichtungen werden nach der aggregierten Komfortbewertung Predicted Mean Vote (PMV), ergänzt durch Detailanalysen der Temperaturen der Luft, der Raumbooberflächen und, kombiniert, der operativen Temperaturen, bewertet. Dazu kommen der zeitliche Verlauf der Temperaturentwicklung im Tagesverlauf.

Die Funktionen Frischluftzufuhr und -verteilung werden getrennt davon nach den Kriterien Luftaustausch (Luftalter),  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen, insbesondere am Ort der simulierten Personen und nach Zugluftisiko, vor allem im Bereich der Knöchel der Personen in 0,10 m Höhe über dem Fußboden, bewertet.

Bei einigen Varianten sind die Funktionen Frischluftzufuhr und -verteilung und Heizung oder Kühlung in einem Gerät vereint. Trotzdem werden die Funktionen auch in diesen Fällen getrennt besprochen.

## 4.30.2 Einbringen von Wärme oder Kälte in den Raum über Deckenflächen

### Putzkühldecken, Putzheizdecken (F1D)

Im Sommer (1, 2) werden die Kühldecken erst ab Mittag aktiviert. Dennoch kommt es in den folgenden drei Nachmittagsstunden zu leichter Überwärmung. Mit einer Senkung der Solltemperatur am Sensor, die zu früherer Aktivierung der Kühldecke führen würde, müsste dieses geringfügige Problem verschwinden. Im Winter (3) wird die Solltemperatur erst um 12 Uhr erreicht. Auch hier sollte entweder die Frischluft morgens zunächst mit Übertemperatur eingeblasen werden, bevor wieder auf Untertemperatur umgestellt wird, oder die Decken sollten früher am Morgen (vor 6 Uhr) aktiviert werden.

### Betonkernaktivierung (F2A)

Der Unterschied zwischen Putzdecke und Betonkernaktivierung liegt in der größeren Kühlleistung der Putzdecke ( $80 \text{ W/m}^2$  gegenüber  $40 \text{ W/m}^2$ ), die über einen kürzeren Zeitraum abgegeben wird (6–20 Uhr gegenüber 0–20 Uhr).

Der große Vorteil der Betonkernaktivierung ist die höhere Speicherfähigkeit: nach dem simulierten Wochenende im Winter ist der Raum am Montag morgens um 5 K wärmer als bei anderen Kühlflächen wie der Putzkühldecke. Die große Trägheit des Systems und die inneren Lasten führen im Laufe des Tages wieder zu einer leichten Überheizung des Raumes.

### Kühlsegel<sup>21</sup> (F3)

Die Zonen niedriger  $\text{CO}_2$ -Konzentration sind Richtung Fenster verschoben. Das Kühlsegel nimmt einen Teil der Deckenfläche ein und verfügt mit  $150 \text{ W/m}^2$  über rund die doppelte flächenbezogene Kühlleistung der Putzkühldecke ( $80 \text{ W/m}^2$ ) und die rund 4fache der aktivierten Betondecke ( $40 \text{ W/m}^2$ ). Kleinere Fläche und intensivere Kühlung bringen eine größere thermisch induzierte Luftbewegung mit sich. Es zeigt sich ein Kaltluftabfall an den Seitenwänden und an der rückwärtigen Kante des Kaltluftsegels, die zu Luftvermischung führen.

### Zusammenschau Deckenflächenheizungen und -kühlungen

Alle betrachteten Deckenflächensysteme sind in der Lage einen sehr guten thermischen Komfort zu realisieren. Sie zeigen alle die Besonderheit einer hohen Trägheit, die vorausschauende Regulierung erfordert. Die Schaltung mittels eines Sensors in der Decke selbst oder zwischen den Arbeitsplätzen, wie in den Simulationen vorgesehen, ist optimierbar durch

- Variationen der Über- oder Untertemperierung der Zuluft (erhöht den Primärenergieverbrauch, siehe thermische Simulationen),
- Solltemperaturänderung zum Verschieben der Aktivierungszeitpunkte,
- Steuerung durch Außentemperatursensoren und
- Einbeziehung der Wettervorhersage.

---

<sup>21</sup> Die Variante Heizsegel wurde nicht untersucht

## **4.30.2 Einbringen von Wärme oder Kälte in den Raum über Fußböden**

### **Fußbodenheizung oder -kühlung unter Trockenestrich (F5A)**

Im Sommer (4, 17) reicht die Kühlwirkung der Fußböden mit  $30 \text{ W/m}^2$  nicht ganz aus da sie erst gegen 10 Uhr vormittags einsetzt. Wenn die Zuluft bodennah (17) eingebracht wird, ist die Überwärmung geringer als bei deckennahe Zuluft einbringung (4). Auch hier, wie bei den Deckenkühlungen, wird eine mehr vorausschauende Regelung (niedrigere Solltemperaturen am Sensor zur früheren Aktivierung des Systems) benötigt.

Im Winter (5, 18) wird die Solltemperatur rasch erreicht und dann auch bald überschritten. Wieder verbessert die bodennahe Quelllüftung die Situation der Überwärmung. Auch hier könnte eine vorausschauende Regelung des trägen Systems, die zu einem früheren Abregeln der Anlage führt, Verbesserung bringen.

## **4.30.3 Einbringen von Wärme oder Kälte in den Raum über Umluft**

Dazu gehören:

- Ventilatorconvektoren in der Brüstung (L1A), simuliert in Var. 8, 9
- Ventilatorconvektoren mit Primärluftanteil in der Brüstung (L1A), simuliert in Var. 10, 11
- Komfortbrüstungsgeräte (L1B), simuliert in Var. 12
- Deckenfancoil (L2), simuliert in Var. 19, 20
- Deckeneinbaugerät (L3), simuliert in Var. 21
- Induktionskühl- oder -heizgerät, Kühl- oder Heizbalken an der Decke (FL1), simuliert in Var. 22, 23

Im Gegensatz zu den untersuchten Flächenheizungen und -kühlungen sind die Luftheizungs- und -kühl-systeme sehr flink und, wie es aussieht, für die geringe Kühllast eines Passivhaus-Büros, überdimensioniert. Alle, bis auf eine (FL1, Var 22) sind bereits in der ersten Leistungsstufe in der Lage, die gewünschten Temperaturen im Winter wie im Sommer rasch zu erreichen. Danach takteten sie im Sommer stark – ein Zeichen der Überdimensionierung. Eine Ausnahme ist das Komfortbrüstungsgerät (12) das mit geringerer Kapazität ohne Taktung durchläuft. Im Winter müssen sie nur vor Beginn der Nutzungszeit und nach ihrem Ende betrieben werden. Der Nachteil liegt im Sommer in der erzeugten Luftbewegung (Zuglufttrisiko) und möglicherweise in den Betriebsgeräuschen, die hier aber nicht untersucht wurden. Im Winter fällt dieser Nachteil weg, da die Ventilatoren nur außerhalb der Nutzungszeit in Betrieb sein müssen.

## **4.30.4 Frischlufteinbringung durch Quelllüftung unterhalb Fensterfassade (PL4)**

Die Quelllüftung PL4 wurde in den Varianten 1, 6, 7, 17, 18, 24 simuliert. Mit Quelllüftung gelingt es im Sommer wie im Winter in allen simulierten Konfigurationen, einen hervorragenden Luftaustausch zu erzielen. Die meist niedrigen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen zeigen, dass mit Quelllüftung meist eine Verdrängungslüftung realisiert werden kann. Wo, wie bei den Varianten 18 und 24, höhere  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen auftreten, lässt sich das auf Vermischung der Zuluft mit Raumluft zurückführen, die bei Fußbodenheizung (18) aufgrund der Fallströmung an den kühleren Fensterscheiben vorkommt und beim Kühlsegel vielleicht mit der gegenüber Putzkühldecke und Betonkernaktivierung doppelt so hohen

Kühlleistung (1000 W) erklärt werden kann, die die Ursache einer größeren Luftbewegung unterhalb des Segels sein könnte.

Zugluft im Knöchelbereich der Arbeitsplätze (0,1 m Höhe) tritt nicht auf. Ausnahme ist Variante 18, bei Fußbodenheizung, die eine Fallströmung an den kühleren Fensterscheiben begünstigt, welche die Zuluftströmung von der Brüstung in den Raum verstärkt.

#### **4.30.5 Frischlufteinbringung durch Drallauslässe im Fußboden (PL5)**

Drallauslässe PL5 wurden in den Varianten 2, 3, 13, 14 simuliert. Mehr noch als selbst die Quellbelüftung können Drallluftdüsen im Boden einen hervorragenden Luftaustausch und niedrige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gewährleisten. Zugluft ist bei den untersuchten Konfigurationen kein Problem. Die in Kombination mit Quellbelüftung problematischen Konfigurationen mit Fußbodenheizung und mit Kühlsegel sind mit Drallluftdüsen nicht untersucht worden.

#### **4.30.6 Frischlufteinbringung durch Lüftungsgitter mittig oben an Rückwand (PL2)**

Zuluftgitter PL2 wurden in den Varianten 4, 5, 8, 9, 15, 16, 19, 20 simuliert. Zuluftgitter erzeugen im Sommer eine Art Zuluft“wasserfall“, sofern die Luft mit Untertemperatur eingebracht wird (4, 15). Die Zuluft mischt sich mit der Raumluft, Ergebnis sind höhere CO<sub>2</sub>-Werte als bei Verdrängungslüftungen. Zugluftrisiko im Bodenbereich besteht in unseren Simulationen bei den Arbeitsplätzen nicht, näher der Rückwand unterhalb des Luftgitters aber schon.

Wird die Zuluft isotherm eingebracht (8, 19) so bleibt sie im oberen deckennahen Bereich des Raumes. Dort kann sie zum Luftaustausch nicht beitragen, es kommt vielmehr zu Kurzschlüssen der Luftführung mit der Absaugung über der Türe an der selben Wand. Ventilatoren an der Decke (19) können sodann den Luftaustausch induktiv erzwingen, mit den Nachteilen stärkerer Luftvermischung (Induktion) und Zegerscheinungen in Bodennähe. Sind die Ventilatoren in der Brüstung angeordnet (8), erreichen sie nur die untere Raumhälfte. Das Zugluftrisiko ist beträchtlich. Der Luftaustausch bleibt schlecht.

Im Winter bleibt die stets isotherm eingebrachte Zuluft zunächst im deckennahen Bereich. Was weiter geschieht, hängt von der Art der Heizung und von den Ventilatoren, wenn vorhanden, ab. Ohne Betrieb der Ventilatoren (die im Winter nur außerhalb der Nutzungszeit in Betrieb sind, 9, 20) oder mit Fußbodenheizung (5) entwickelt sich eine Luftwalze, mit der die Zuluft an den kühleren Fensterscheiben herabgleitet und im Bodenbereich für Luftaustausch, aber auch für Zugluft (5, 9, aber nicht: 20!) sorgt. In Kombination mit Betonkernaktivierung der Decke (16) bildet sich aufgrund der warmen Decke keine Luftwalze, die Zuluft bleibt oben, ein Kurzschluss zu Luftabsaugung ist gegeben, der Luftaustausch ist schlecht.

Zusammenfassend verhalten sich die Varianten 4, 15 im Sommer relativ günstig, im Winter die Varianten 5, 9 und 20. Nur eine der simulierten Kombinationen ist – mit Abstrichen – im Sommer *und* im Winter geeignet, für guten Luftaustausch, geringe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Zugfreiheit zu sorgen: Var 4 und 5, mit Fußbodenheizung und -kühlung, die aber wieder – siehe oben – in der Disziplin Wärme- oder Kältezuführung nicht so gut abschneidet.

#### **4.30.7 Frischlufteinbringung durch Ventilatorkonvektor mit Primärluftanteil (L1A)**

Ventilatoren mit Primärluftanteil L1A wurden in den Varianten 10, 11 simuliert. Das Gerät profitiert von der bodennahen Zuluft einbringung im Brüstungsbereich, die ähnlich einer Quelllüftung wirkt. Die Probleme einer deckennahen Lufteinbringung wie im Falle des Lüftungsgitters (PL2) werden so vermieden. Allerdings muss die eingebrachte Luft, im Gegensatz zur Quelllüftung, auch die Wärme oder Kälte in den Raum einbringen. Damit muss das bewegte Luftvolumen 5 Mal so hoch sein (Primärluftanteil 21 %), wie bei Quelllüftung. Entsprechend sind im Sommer Zugluftprobleme gegeben. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind im Sommer wie im Winter infolge der Durchmischung von Zuluft und Raumluft höher.

#### **4.30.8 Frischlufteinbringung durch Komfortbrüstungsgeräte mit (erhöhtem) Primärluftanteil (L1B)**

Das Komfortbrüstungsgerät L1B, simuliert in Var 12 hat gegenüber dem Brüstungsgerät L1A einen höheren Primärluftanteil (50 % statt 21 %), also ein geringeres bewegtes Luftvolumen, läuft dafür aber durchgehend ohne Takten. Aber auch das gegenüber Quellbelüftung verdoppelte Luftvolumen bringt schon Zugluftprobleme, die zum Vorschlag Anlass geben, das Gerät doch lieber takten zu lassen, kurzzeitige Zugluft werde besser vertragen. Das Prädikat „Komfort“ scheint somit im Vergleich zu Ventilator Kollektoren (L1A) begründet, aber im Vergleich zu Quelllüftung (PL4) und Drallauslässen (PL5) doch zu relativieren.

#### **4.30.9 Frischlufteinbringung durch Deckeneinbaugerät mit Drallauslässen (L3)**

Das Deckeneinbaugerät L3, simuliert in Var 21 unterscheidet sich von den Brüstungsgeräten durch den Einbauort. Die isotherme Zuluft einbringung an der Decke funktioniert im Sommer, wie auch beim Lüftungsgitter (PL2), nicht! Mit Ventilatorfunktion, die im Sommer gegeben ist, kann ein guter, aber nicht sehr guter Luftaustausch erreicht werden. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind, wie stets bei Induktionslüftungen, höher. Zugluft risiko besteht.

Im Winterbetrieb, der nicht simuliert wurde, ist ein besserer Luftaustausch infolge einer Luftwalze, induziert durch die kühleren Scheiben, zu erwarten. Vergleiche Varianten 9 und 20.

#### **4.30.10 Frischlufteinbringung durch Kühl- oder Heizbalken an der Decke mit Primärluftanteil (FL1)**

Der Kühl- und Heizbalken FL1, simuliert in den Var 22, 23 hat den Einbauort mit dem Deckeneinbaugerät (L3) und dem Deckenfancoil (L2) gemeinsam. Wie das Komfortbrüstungsgerät (L1B) hat er einen größeren Primärluftanteil (33 %) als die zuvor genannten Geräte.

Im Sommer sind der Luftaustausch gut, die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind im Bereich des bei Induktionslüftung Erwartbaren, und das Zugluft risiko ist gegeben.

Im Winter stellen sich gemäß der Einbaulage des Gerätes Luftwalzen parallel zu den Seitenwänden des Raumes ein, die für guten zugfreien Luftaustausch sorgen. In der frühmorgendlichen Aufheizphase außerhalb der Nutzungszeiten ist hingegen der Luftaustausch unterbrochen: es bildet sich ein stabiles Warmluftpolster an der Decke aus.

#### 4.30.11 Zusammenfassung der Ergebnisse zu Frischlufteinbringungen

Die untersuchten Systeme lassen sich einteilen in

- Bodennahe Quellluftsysteme und Drallausslassdüsen im Boden, die für die Wärme- und Kälteabgabe separate Systeme benötigen
- Deckennah an der Rückwand angeordnete Luftgitter, die ebenfalls separate Systeme für die Wärme- und Kälteabgabe benötigen
- Kombinierte Systeme zur Lufteinbringung, Heizung und Kühlung, bodennah im Brüstungsbereich
- Kombinierte Systeme zur Lufteinbringung, Heizung und Kühlung, an der Decke.

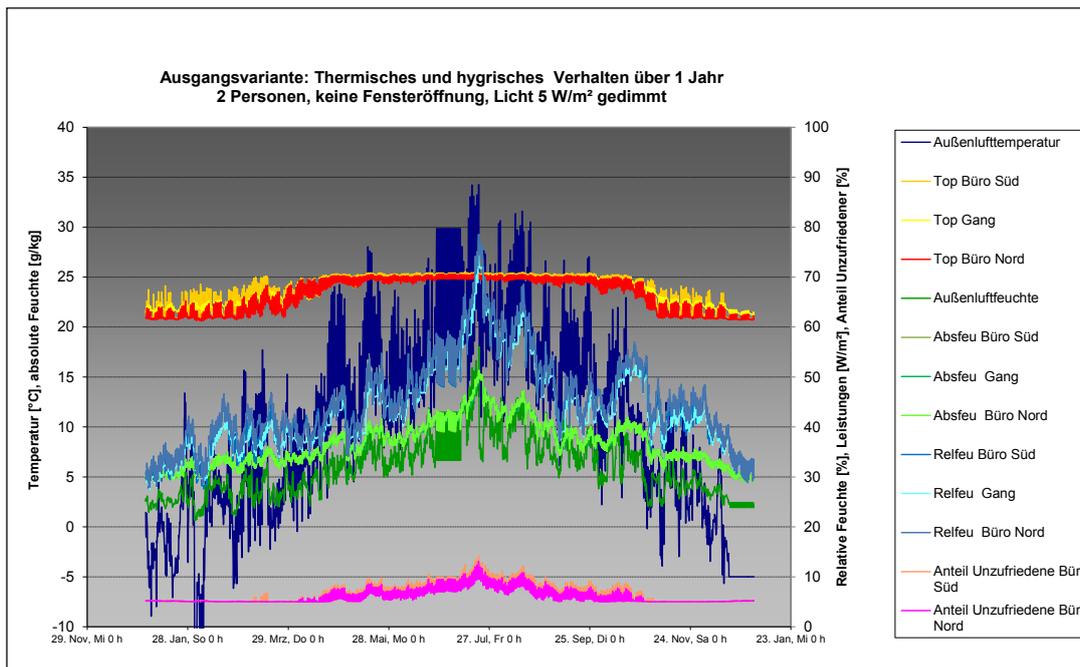
Alle Systeme verhalten sich im sommerlichen Kühlbetrieb markant anders als im winterlichen Heizbetrieb. Bodennahe Lufteinbringung ist deckennaher überlegen, weil die Zuluft thermisch an den Personen und Geräten aufsteigt und so im Raum verteilt wird. Es ist kein mechanischer Aufwand für die Luftverteilung gegen die natürliche Konvektion notwendig, der immer mit Zugluftrisiko verbunden ist. Die Vermischung der Zuluft mit der Umluft ist minimiert.

Die Trennung von Zuluft einbringung und den Funktionen der Heizung und Kühlung ist dem Zusammenfassen dieser Funktionen überlegen, weil für direkte Heizung und Kühlung der Luft stets viel größere Luftmengen benötigt werden. Die von uns untersuchten Geräte bewegen das doppelte bis das fünffache Luftvolumen gegenüber einfachen Primärlufteinbringungen. Diese größeren Luftmengen bringen in fast jedem Fall Zugluftrisiko mit sich und verschlechtern die Luftqualität, weil Zuluft und vorhandene Raumluft gemischt werden (oft ablesbar an den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen).

## 5. Ergebnisse Thermische Simulationen

### 5.1. Ergebnisse zur Ausgangsvariante Passivbüro\_00

Das Passivbüro\_00 stellt eine bereits optimierte Ausführung eines Passivbüros dar, das mit einer im Raum operierenden idealen Heizung und Kühlung ausgerüstet ist. Sie entspricht somit einer „idealen“ Luftheizung, die Zuluft, Wärme und Kälte homogen dem gesamten Raumvolumen zuführt, somit in Bezug auf die durchgeführten Strömungssimulation die Variante mit Deckenfancoil abbildet. Um die Leistungen niedrig zu halten, wird durchgeheizt und -gekühlt. Tageslichtnutzung und Beleuchtung entsprechen den Tageslichtsimulationen mit außenliegender Jalousie, die intelligent gesteuert ist, somit ein hohes Maß an Tageslichtautonomie bietet. Ein innenliegender Blendschutz wird vor allem im Winterhalbjahr an den Süd-, West- und Ostfenstern genutzt.



Die Dynamik des gesamten Jahres zeigt deutlich, dass die Heizsaison knappe 5 Monate in Anspruch nimmt, während das Sommerhalbjahr sich auf 7 Monate dehnt.

Im Südbüro ergeben sich erwartungsgemäß bereits im Winter Temperaturen deutlich über 21 °C, diese können aber noch gut über die Regelung des Sonnenschutzes unter 25 °C gehalten werden. Mit Anpassung der Bekleidung ist im Winterhalbjahr fast durchwegs thermischer Komfort der Klasse A möglich.

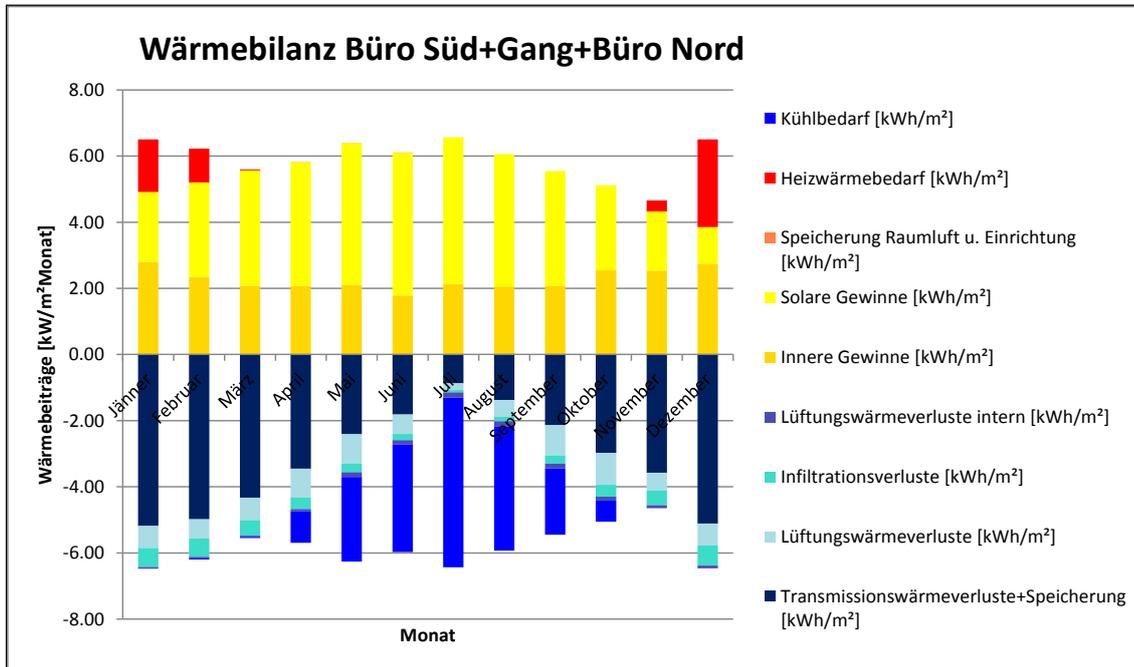
Thermische Behaglichkeit				
Predictive Mean Vote		pmv1	pmv2	pmv3
Min:		-0.12	-0.11	-0.11
Max:		0.66	0.58	0.62
		Std.[h]	Std.[h]	Std.[h]
<-2	unzufrieden	0	0	0
-2 < -1	unzufrieden	0	0	0
-1 < -0.7	unzufrieden	0	0	0
-0.7 < -0.5	C	0	0	0
-0.5 < -0.2	B	0	0	0
-0.2 < 0	A	999	1117	1063
0 < 0.2	A	220	206	247
0.2 < 0.5	B	1190	1249	1219
0.5 < 0.7	C	201	38	81
0.7 < 1	unzufrieden	0	0	0
1 < 2	unzufrieden	0	0	0
>2	unzufrieden	0	0	0

Thermische Behaglichkeit				
Anteil Unzufriedener		ppd1	ppd2	ppd3
Min:		5.00	5.00	5.00
Max:		14.17	12.10	13.12
		Std.[h]	Std.[h]	Std.[h]
<6	A	1245	1369	1339
6 < 10	B	1117	1186	1170
10 - 15	C	248	55	101
15 - 20	unzufrieden	0	0	0
20 - 25		0	0	0
25 - 30		0	0	0
30 - 35		0	0	0
35 - 40		0	0	0
40 - 45		0	0	0
45 - 50		0	0	0
> 50		0	0	0

Zone 1: Südbüro, Zone 2. Gang, Zone 3: Nordbüro

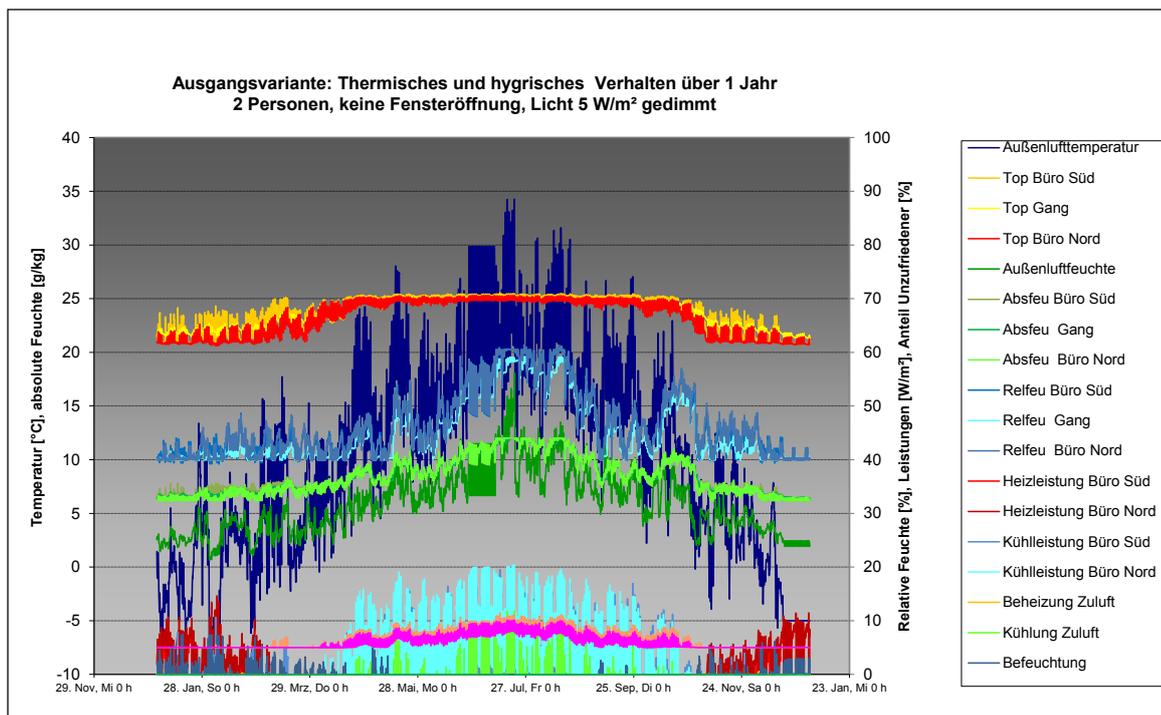
Im Sommer steigen die empfundenen Temperaturen über 25 °C und die relative Feuchte auf fast 80 %, bzw. auf 15 g/kg absolute Feuchte. Trotz dieser kurzfristig schwülen Bedingungen ergibt die Bewertung gemäß ÖNORM EN ISO 7730 maximal Klasse C.

Die Wärmebilanz im Raum stellt sich wie folgt dar:



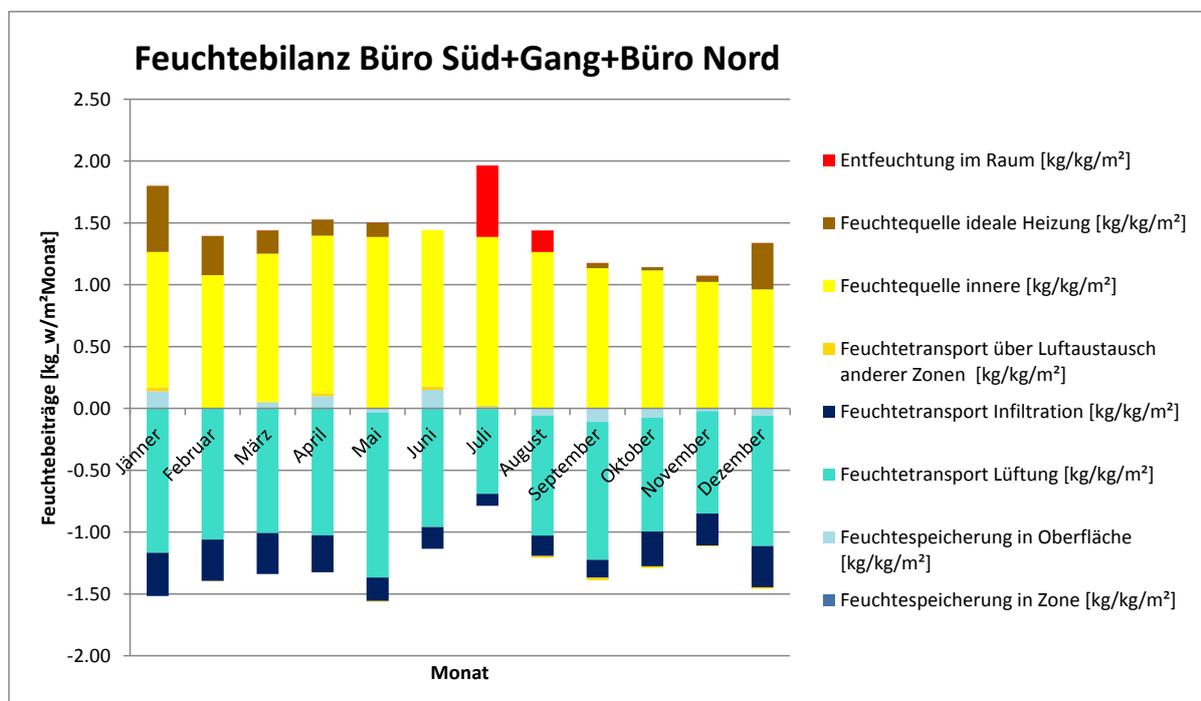
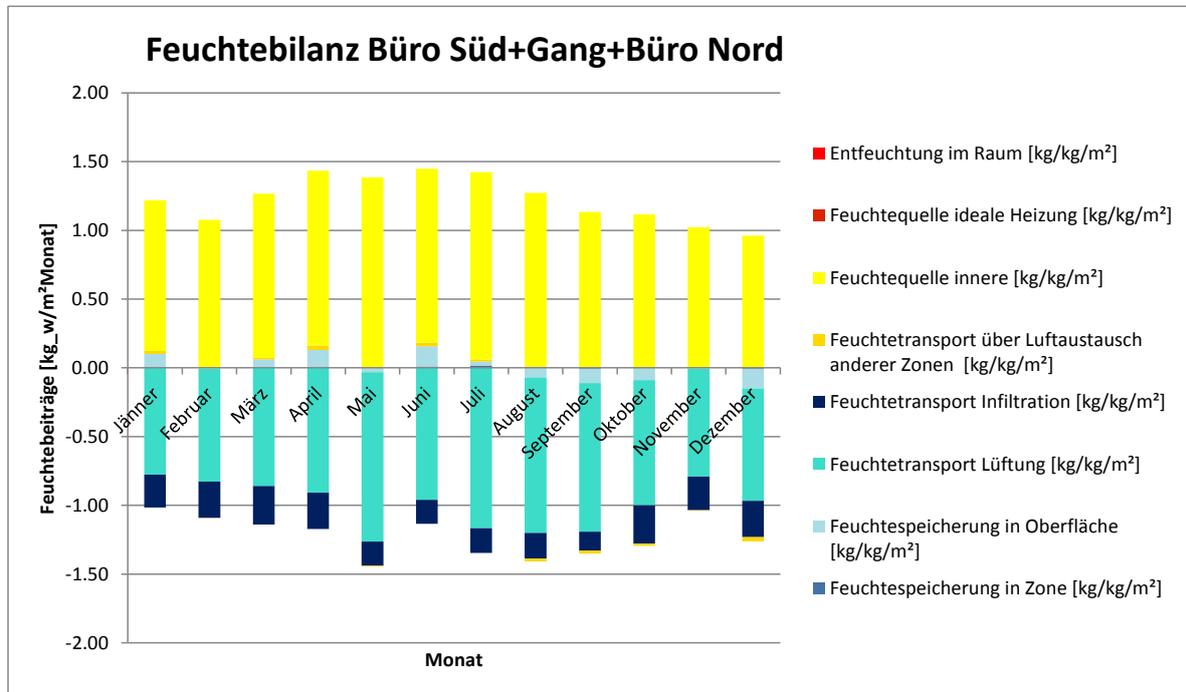
Deutlich wird, wie gering die Wärmeströme Beheizung und Kühlung im Vergleich zu den „natürlichen“ Wärmeströme sind.

Mit einer aktiven Entfeuchtung der Büroräume kann Klasse B eingehalten werden (siehe unten). Der Aufwand an Beheizung und Kühlung ist im folgenden Diagramm dargestellt, wobei hier eine ideale Befeuchtung (Mindestfeuchte 40 %) und Entfeuchtung (maximale absolute Feuchte 12 g/kg) im Einsatz ist.



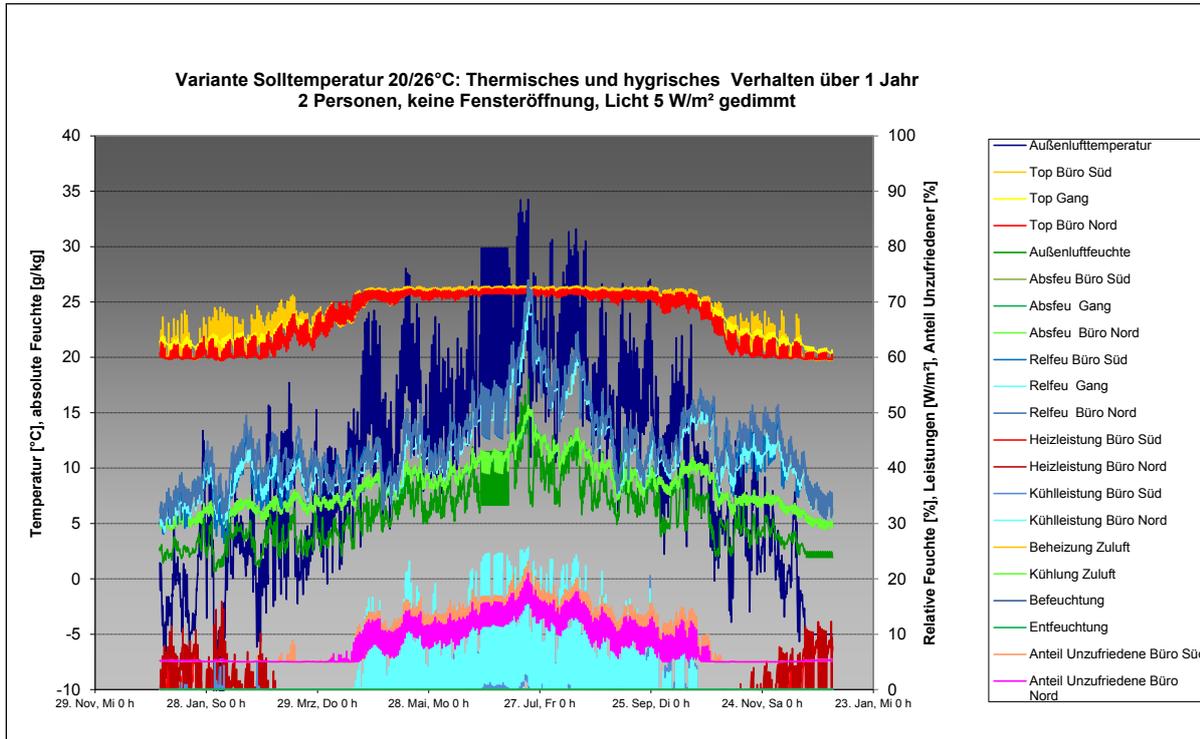
Gemäß ÖNORM EN ISO 7730 kann, von wenigen Stunden abgesehen, Klasse B eingehalten werden.

Die folgenden Diagramme stellen die Feuchtebilanz mit und ohne Be-/Entfeuchtung dar.

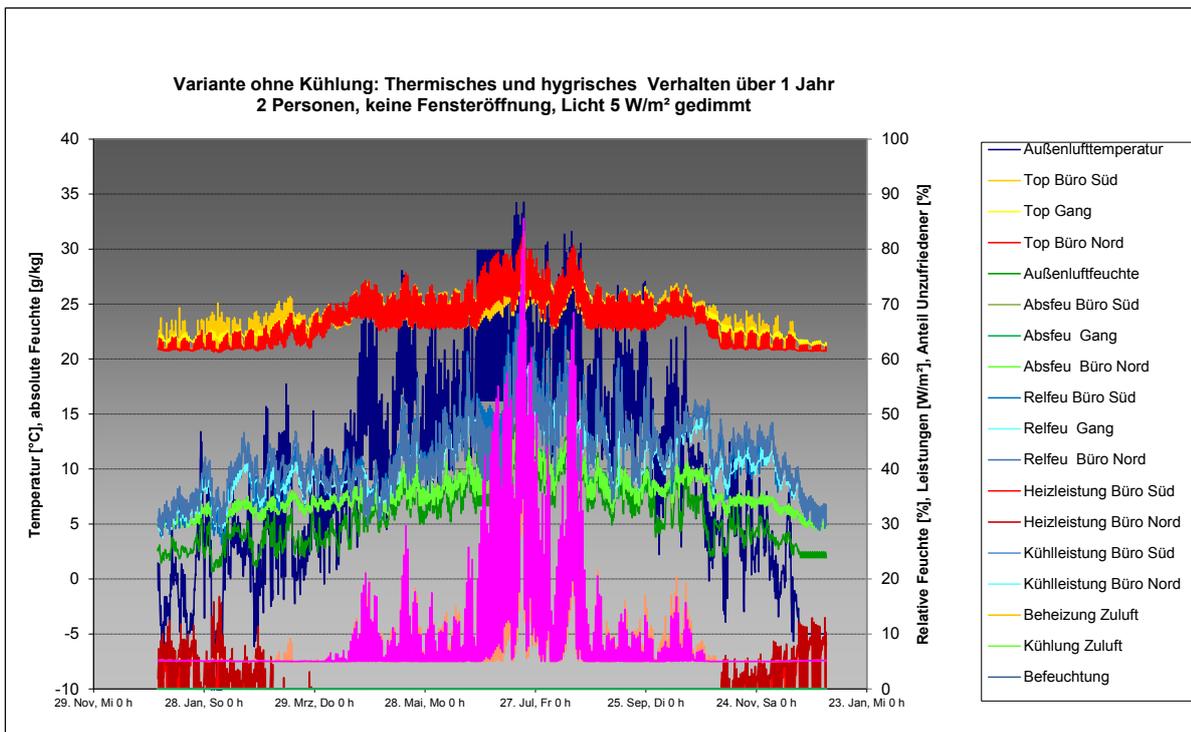


Auch hier wird deutlich, dass im Vergleich zu den aktiv gesteuerten Be- und Entfeuchtungsströmen die „natürlichen“ deutlich stärker sind.

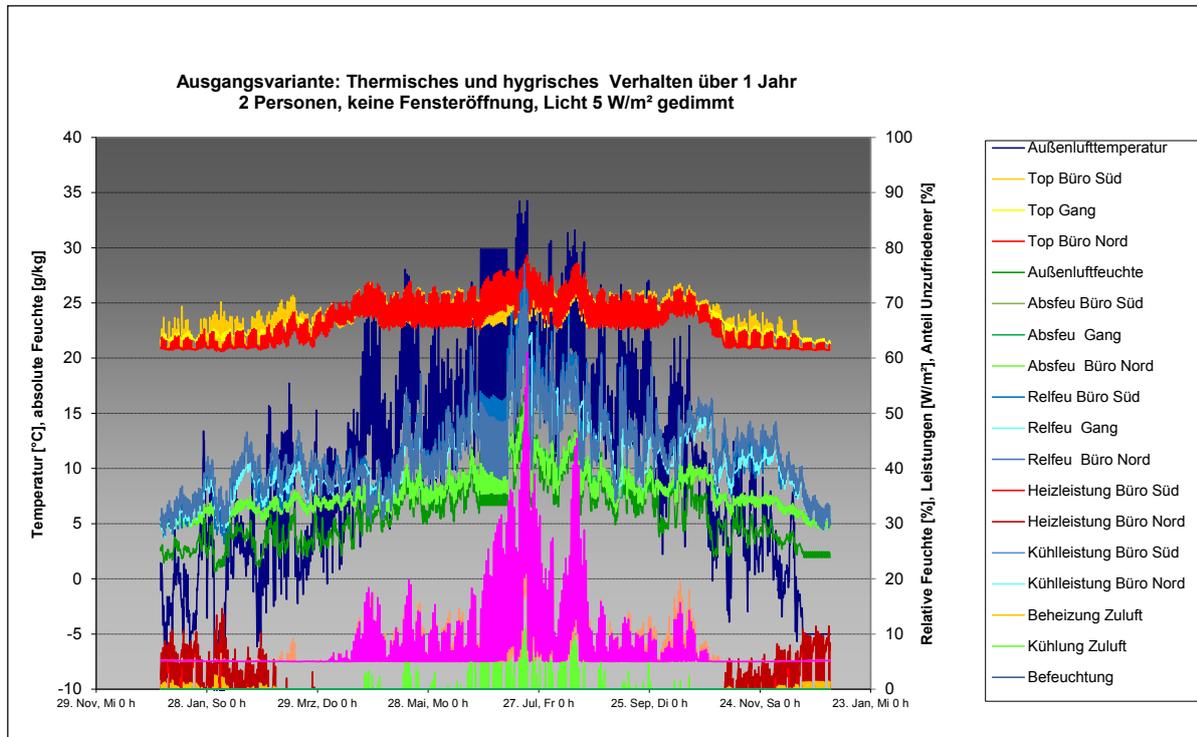
Eine Ausdehnung der Minimal- und Maximalsolltemperaturen auf 20 ° bzw. 26 °C scheidet Heiz- und Kühlperiode deutlich stärker auseinander. Über 1 Monat im Frühling wie auch im Herbst können ohne Heizung und Kühlung behaglich gestaltet werden.



Durch die hohen Temperaturen in den heißen Wochen wird im Sommerhalbjahr nur Klasse C erreicht, in ganz heißen Perioden sind mit der angenommenen Kleidung (Bekleidungsstärke = 0.6 clo) unbehagliche Zustände zu erwarten.

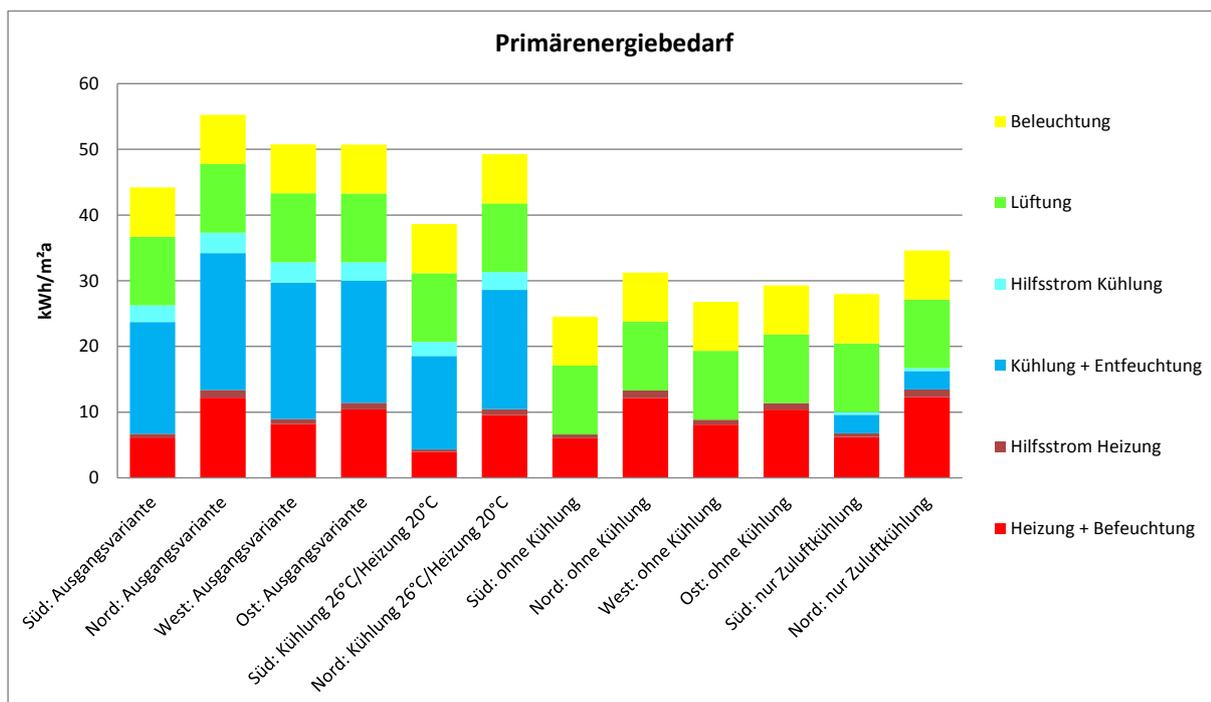
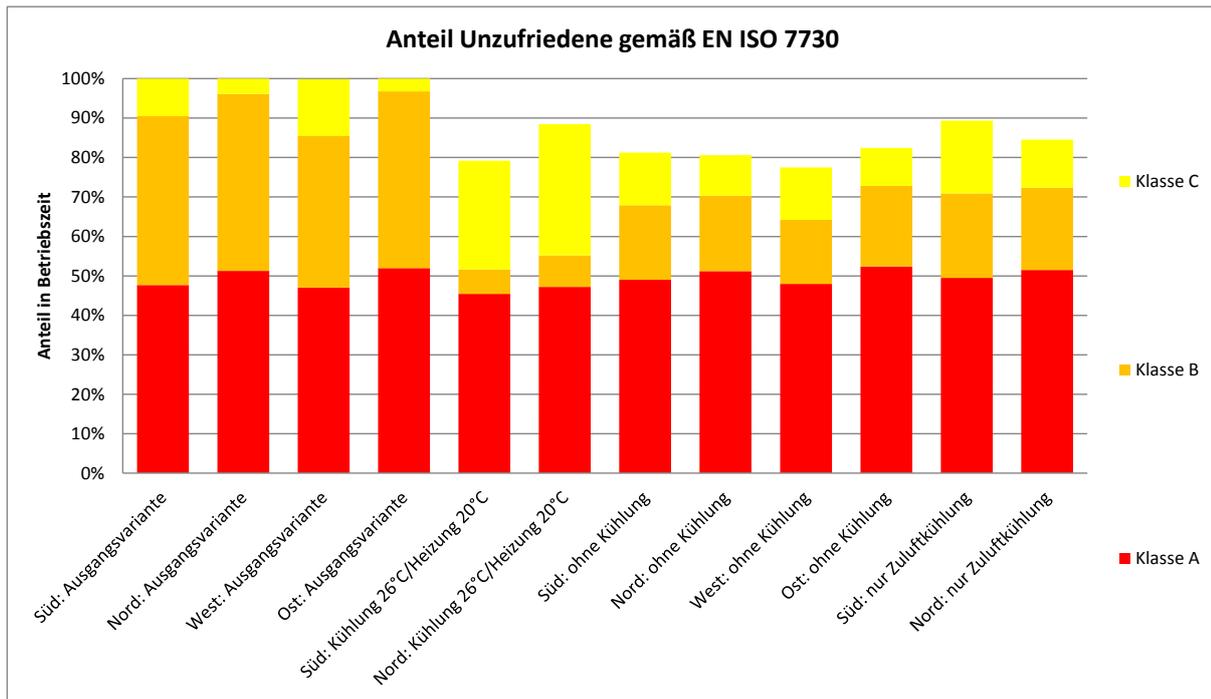


Ohne aktive Kühlung, mit alleiniger Nachtkühlung ergeben sich in den heißen Perioden bis zu 80 % Unzufriedene. Deutlich wird, dass unbehagliche Raumzustände vor allem mit sehr warmen Außenlufttemperaturen verbunden sind, in den meisten Fällen sind Raumlufttemperaturen über 22 °C erforderlich.

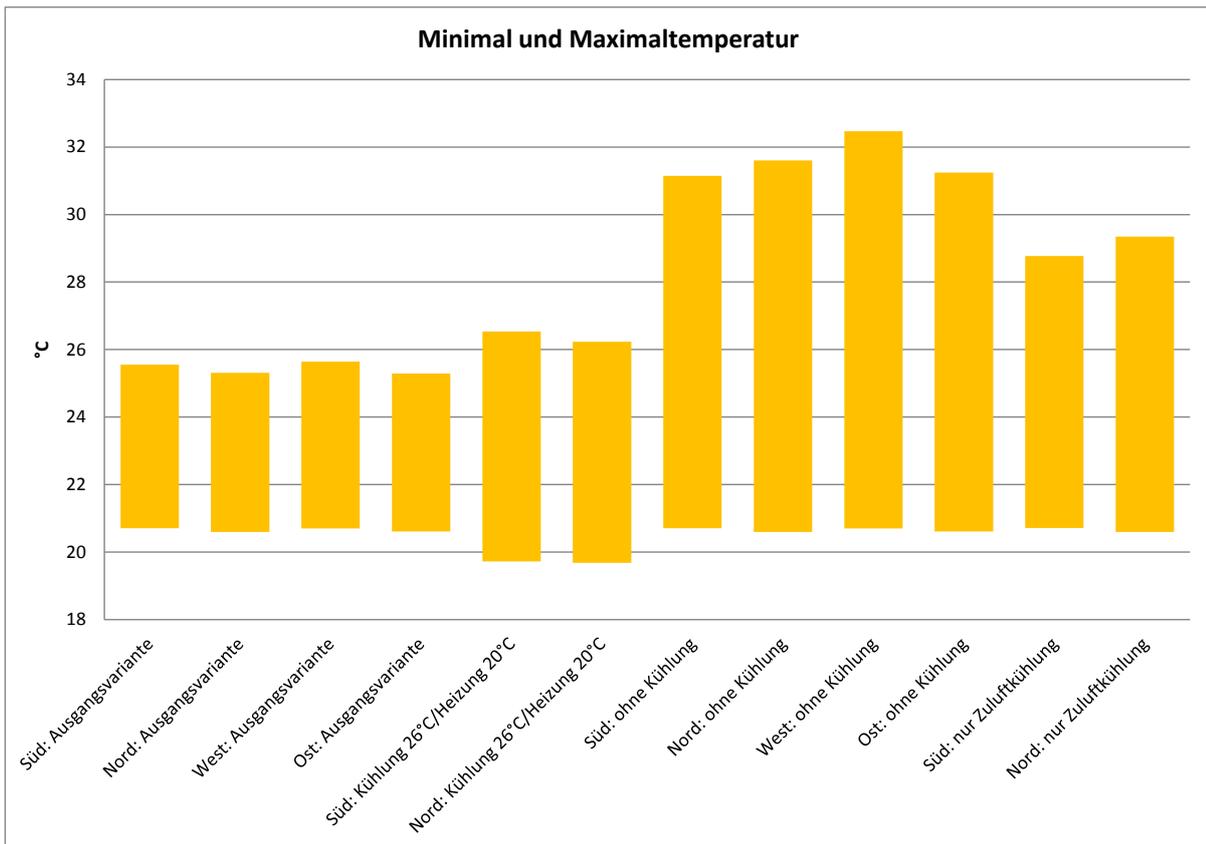
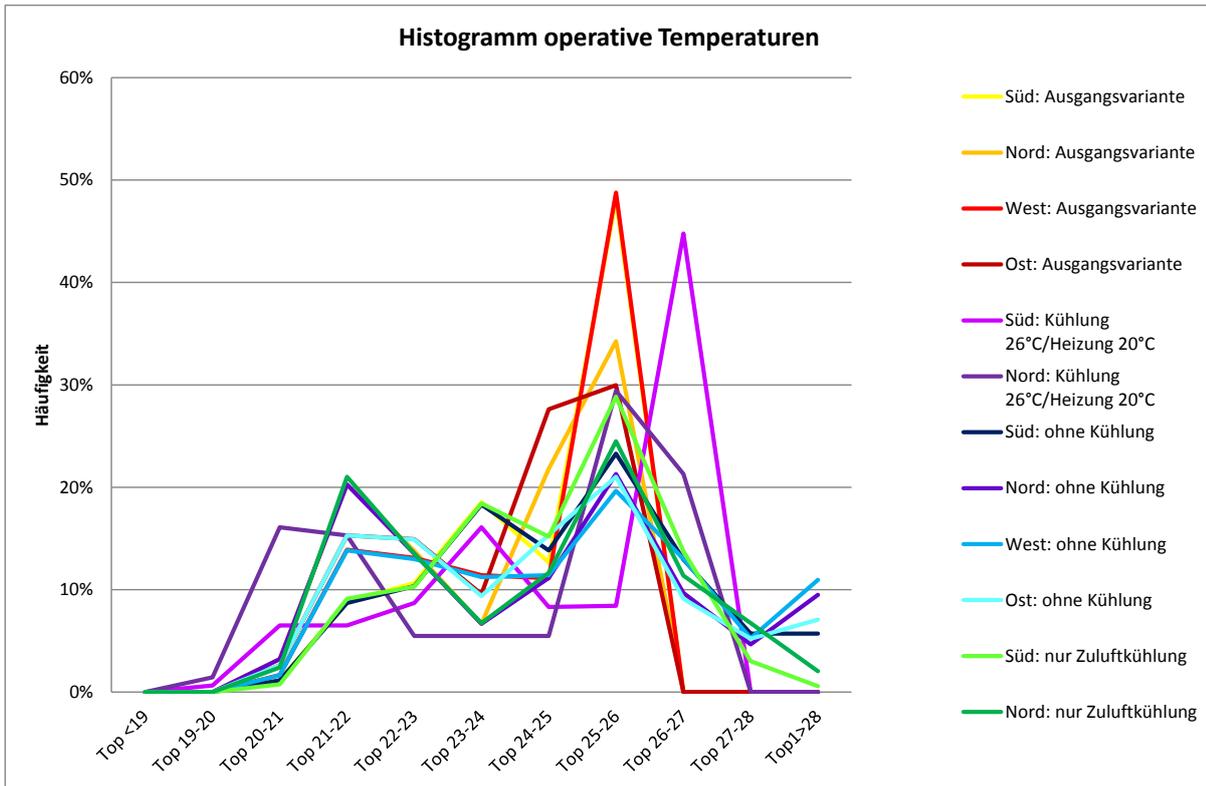


Setzt man eine Zuluftkühlung ein, die jedenfalls maximale Zulufttemperaturen von 20 °C garantiert, können die Spitzen deutlich reduziert werden. Es verbleiben allerdings trotzdem unbehagliche Zustände in den Hitzeperioden.

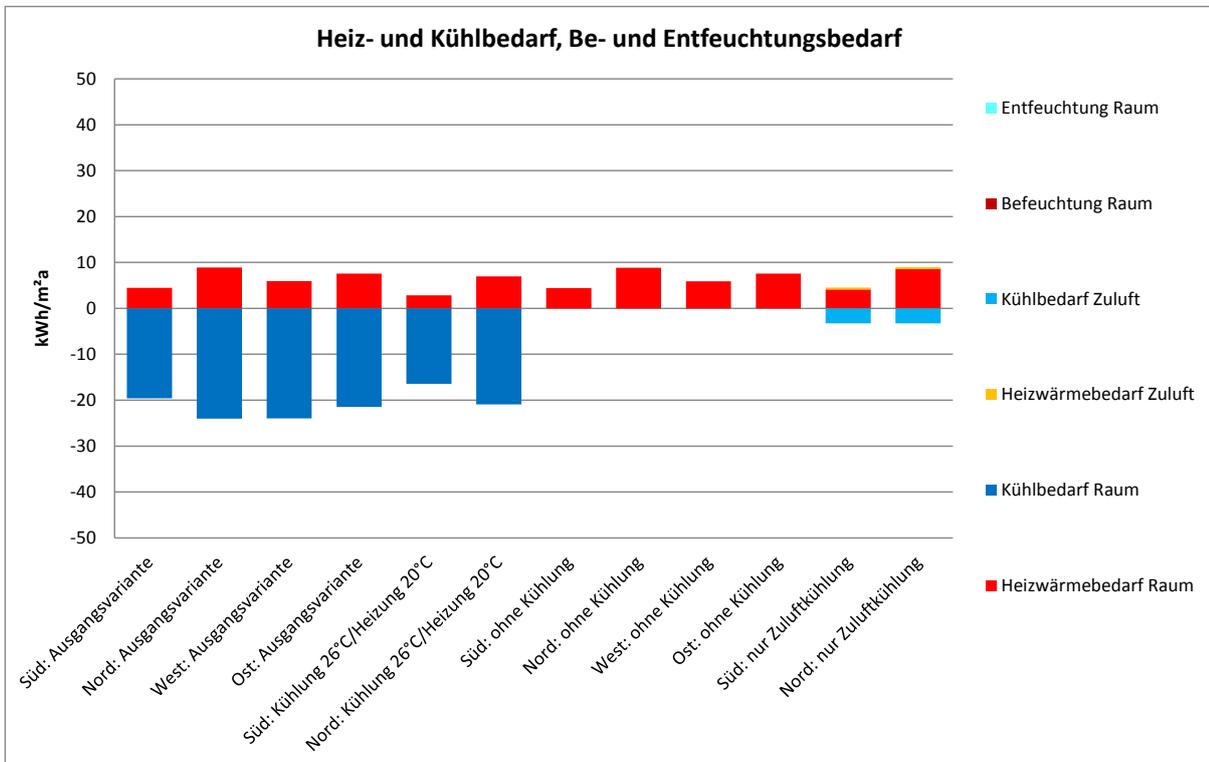
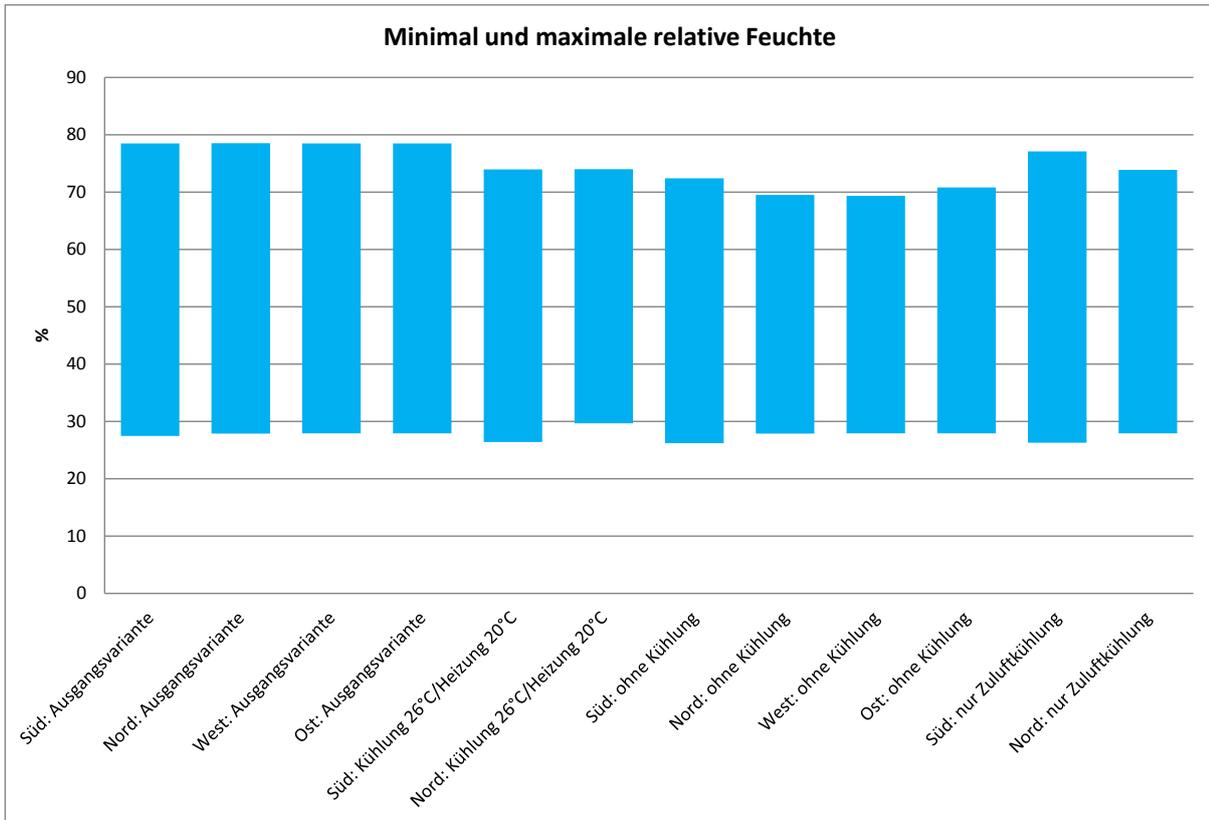
Eine Zusammenschau der Ergebnisse geben die folgenden Abbildungen:

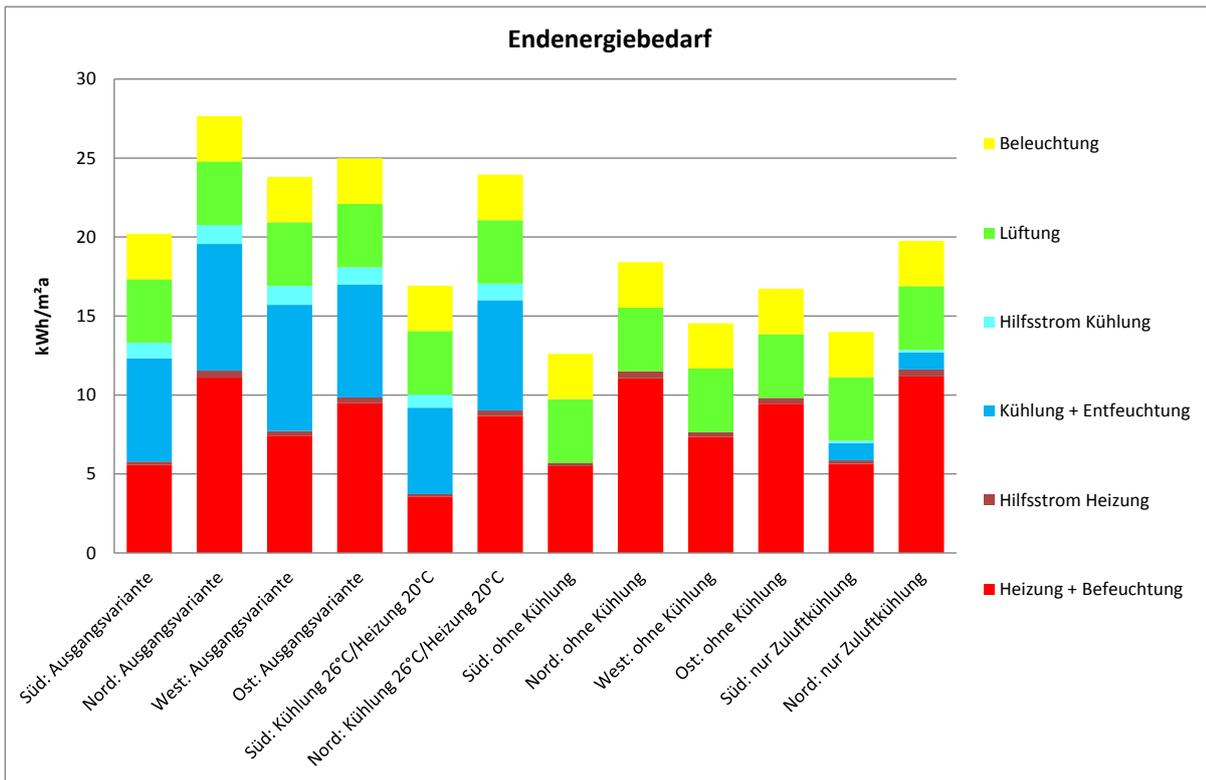


- Die Aufweitung des Solltemperaturbandes bringt eine Primärenergieeinsparung von ca. 10 %
- Der Verzicht auf eine Kühlung führt fast zu einer Halbierung des Primärenergiebedarfs, wobei der Anteil an unbehaglichen Raumzuständen von 0 % auf ca. 20 % ansteigt (ca. 520 Stunden im Jahr)
- Die Kühlung der Zuluft auf 20 °C (ohne den Luftwechsel zu erhöhen oder Umluftanteile beizumischen!!) bringt eine Erhöhung von ca. 20 % Primärenergiebedarf, während der Anteil an unbehaglichen Stunden nur leicht absinkt (ca. 5 %)



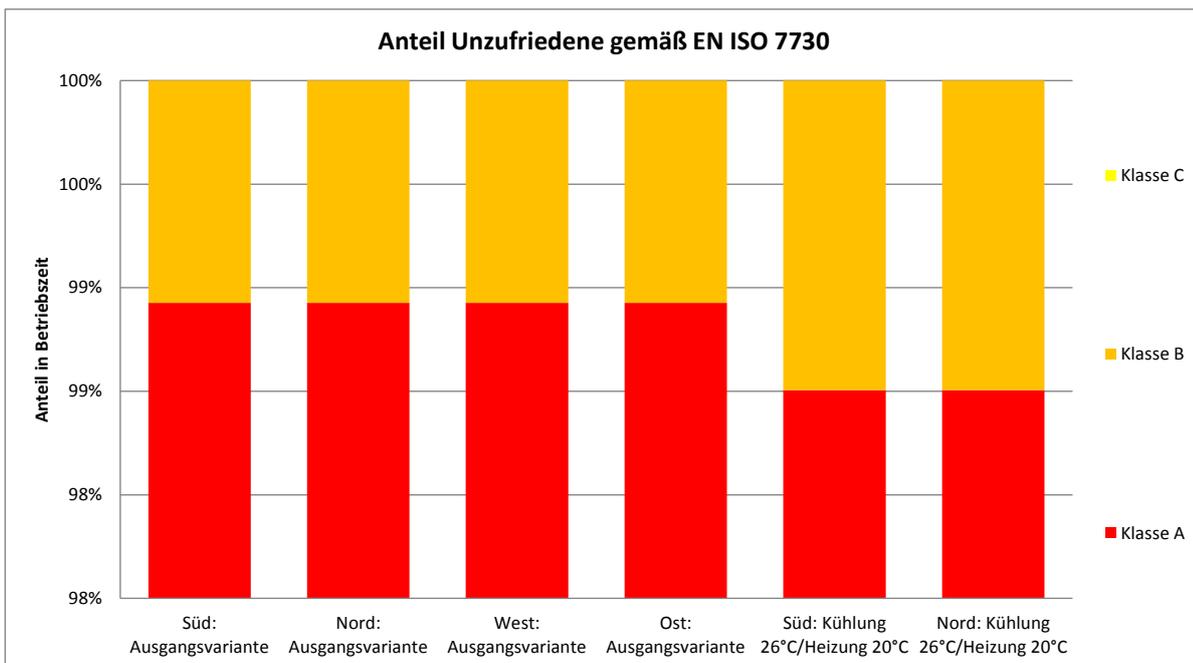
- Die operativen Temperaturen steigen ohne aktive Kühlung stark an.
- Durch die Zuluftkühlung können die Anzahl an unbehaglichen Zuständen zwar kaum reduziert werden, die maximalen Temperaturspitzen können allerdings deutlich reduziert werden.





Insgesamt sind durch einen Verzicht oder eine deutliche Reduzierung der aktiven Kühlung deutlich Reduktionen des Primärenergiebedarfs erreichbar. In warmen Perioden ist allerdings mit unbehaglichen Raumzuständen gemäß ÖNORM EN ISO 7730 zu rechnen.

Durch eine Lockerung der Bekleidungs Vorschriften auf 0,26 clo im Sommer kann der Komfort noch auf maximal Klasse B gesteigert werden:

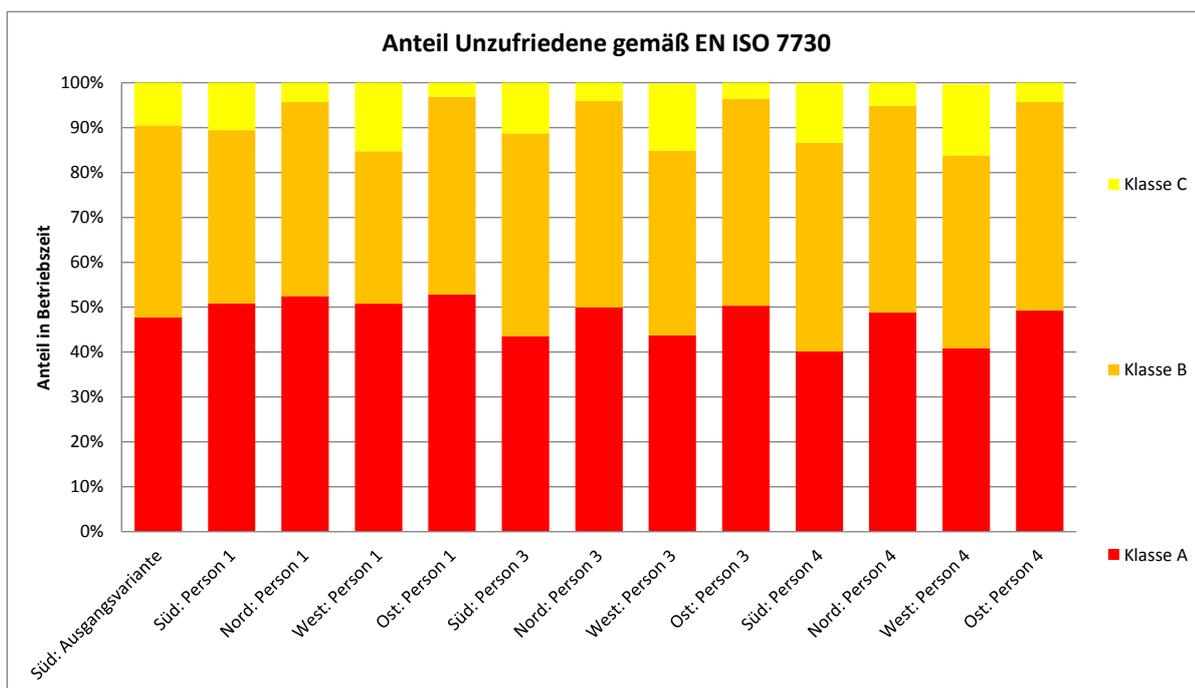


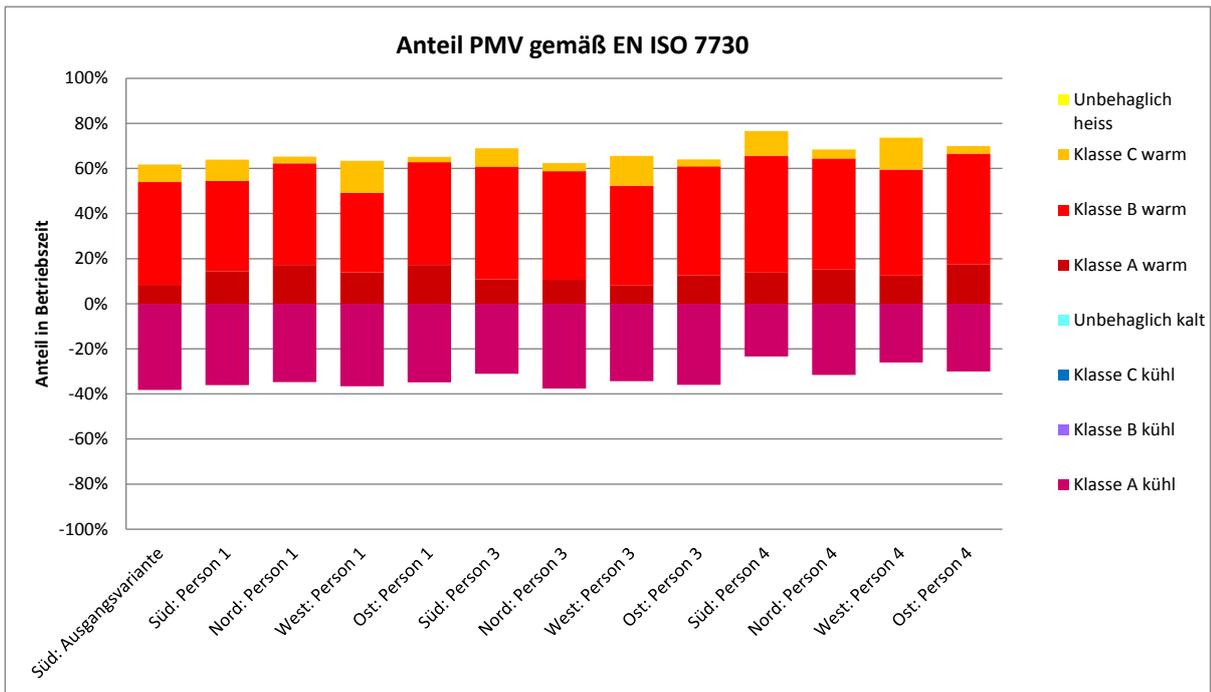
## 5.2. Ergebnisse Nutzung und Architektur

### 5.2.1. Varianten Personenbelegung

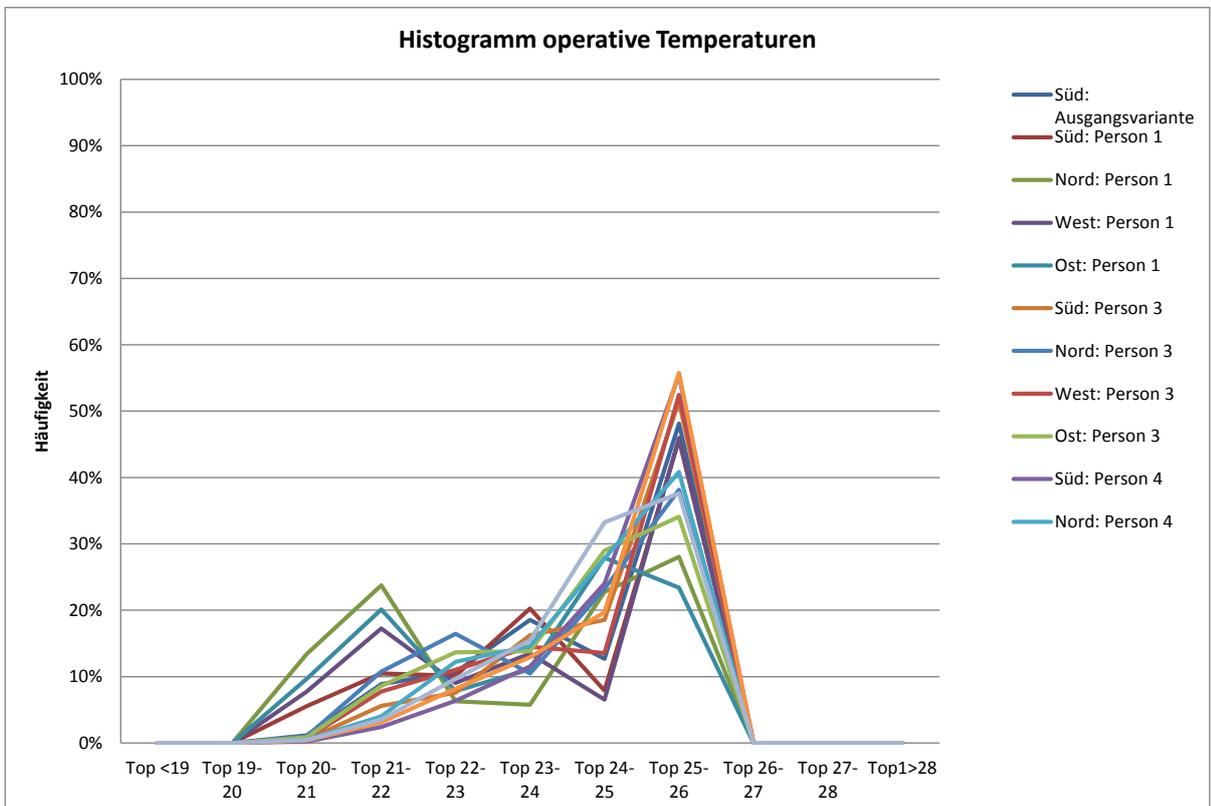
Mit der Anzahl der Personen, die in den untersuchten Büroräumen ihren Arbeitsplatz haben, steigen der Bedarf an Frischluft, ebenso die in den Raum abgegebene Wärme und Feuchte. Die folgenden Belegungsdichten wurden im Detail untersucht:

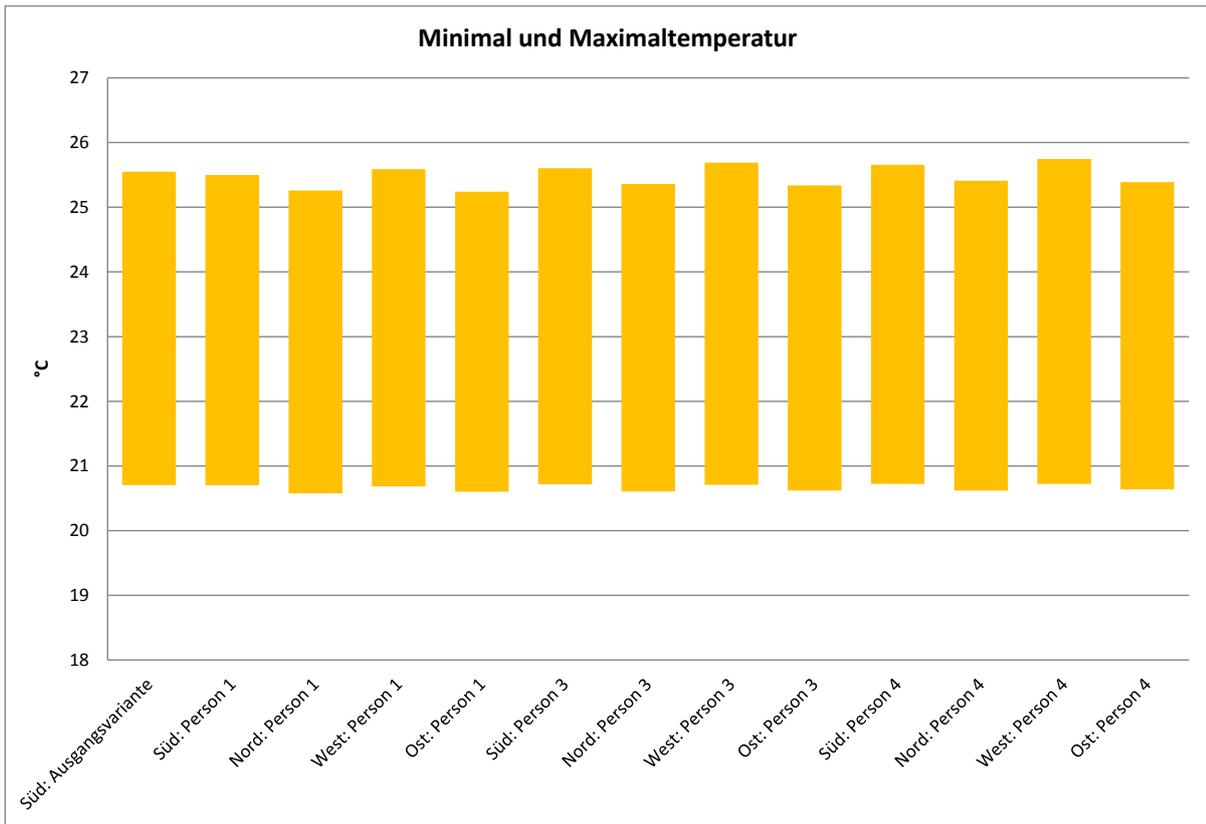
Arbeitsplatzdichte	Anzahl Personen	Arbeitsplatzdichte m <sup>2</sup> /Person	Wärmeabgabe sensibel W/m <sup>2</sup>	Feuchteabgabe g/m <sup>2</sup>	
2 Personen	2.0	13.0	6.2	3.8	Passivhausbüro_00
1 Person	1.0	26.0	3.1	1.9	
3 Personen	3.0	8.7	9.2	5.8	
4 Personen	4.0	6.5	12.3	7.7	



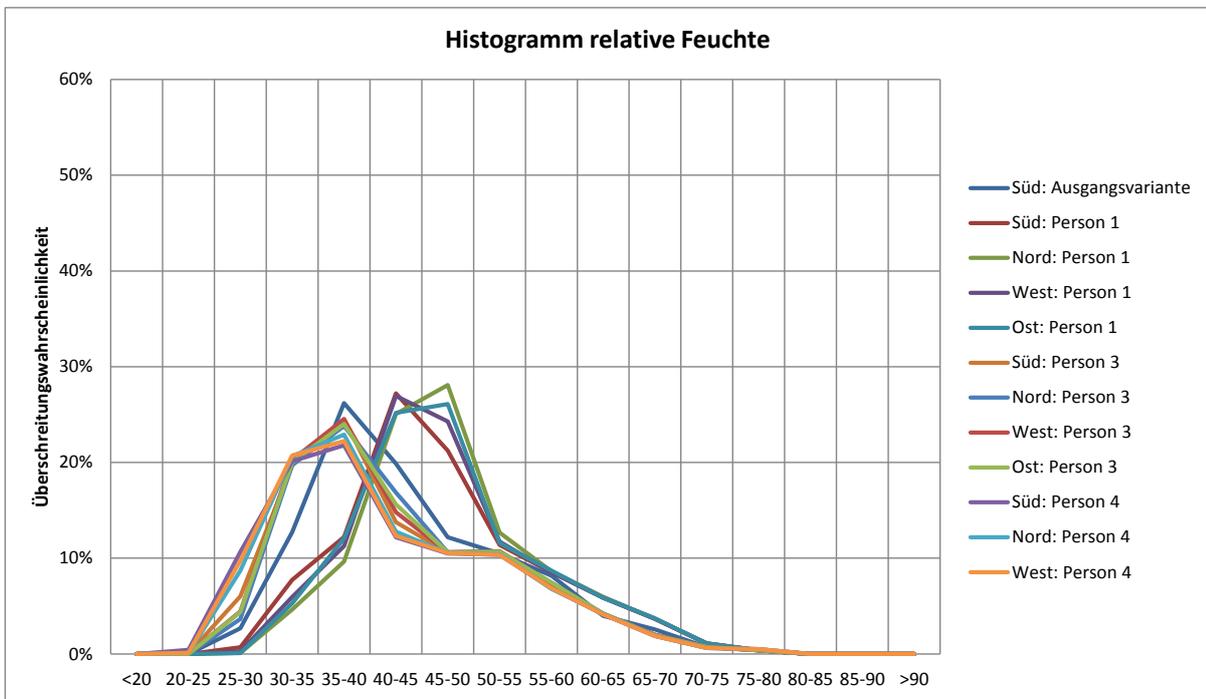


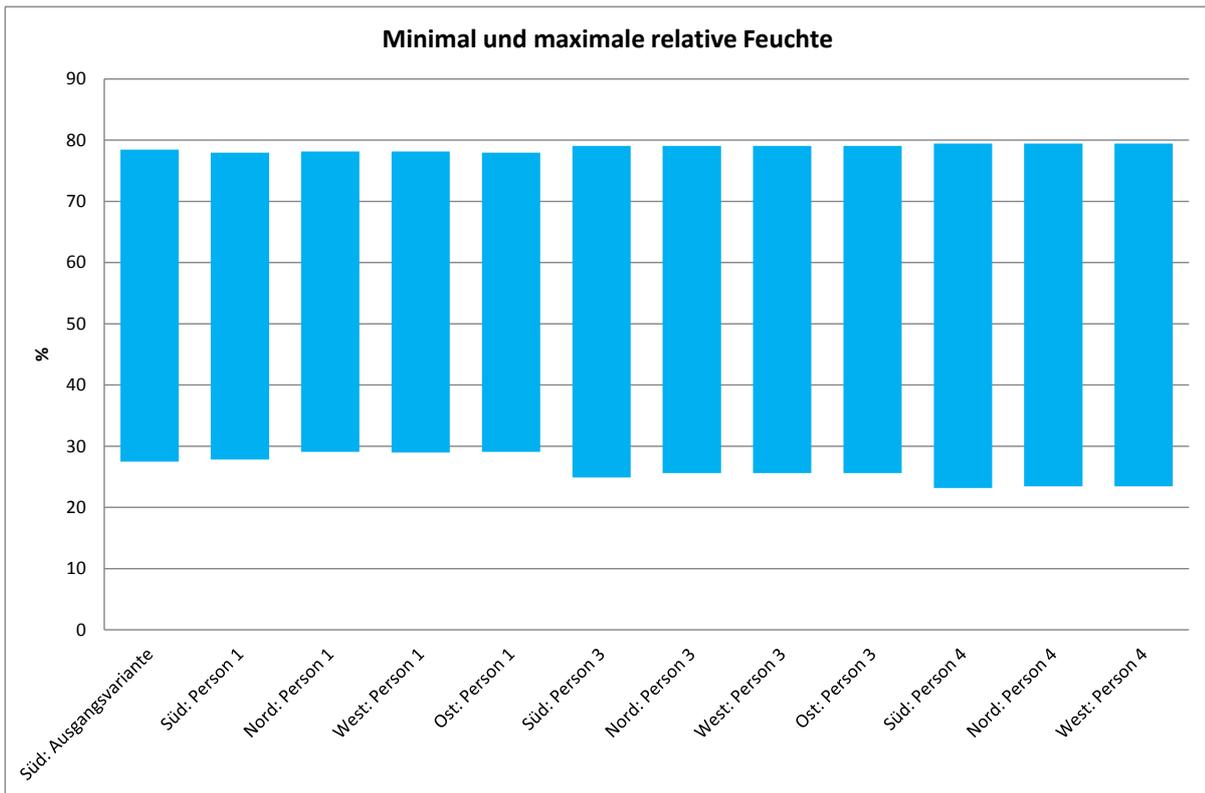
- Ein hoher Grad an Behaglichkeit kann in allen Belegungsvarianten sichergestellt werden
- Die Unterschiede zwischen den besten (Bürraum Nord oder Ost, 1 Person) und den ungünstigsten Büroräumen (Bürraum West, 4 Personen) sind verhältnismäßig gering. Nur in letzterer Variante treten an 11 Stunden im Jahr unbehaglich warme Zustände auf.



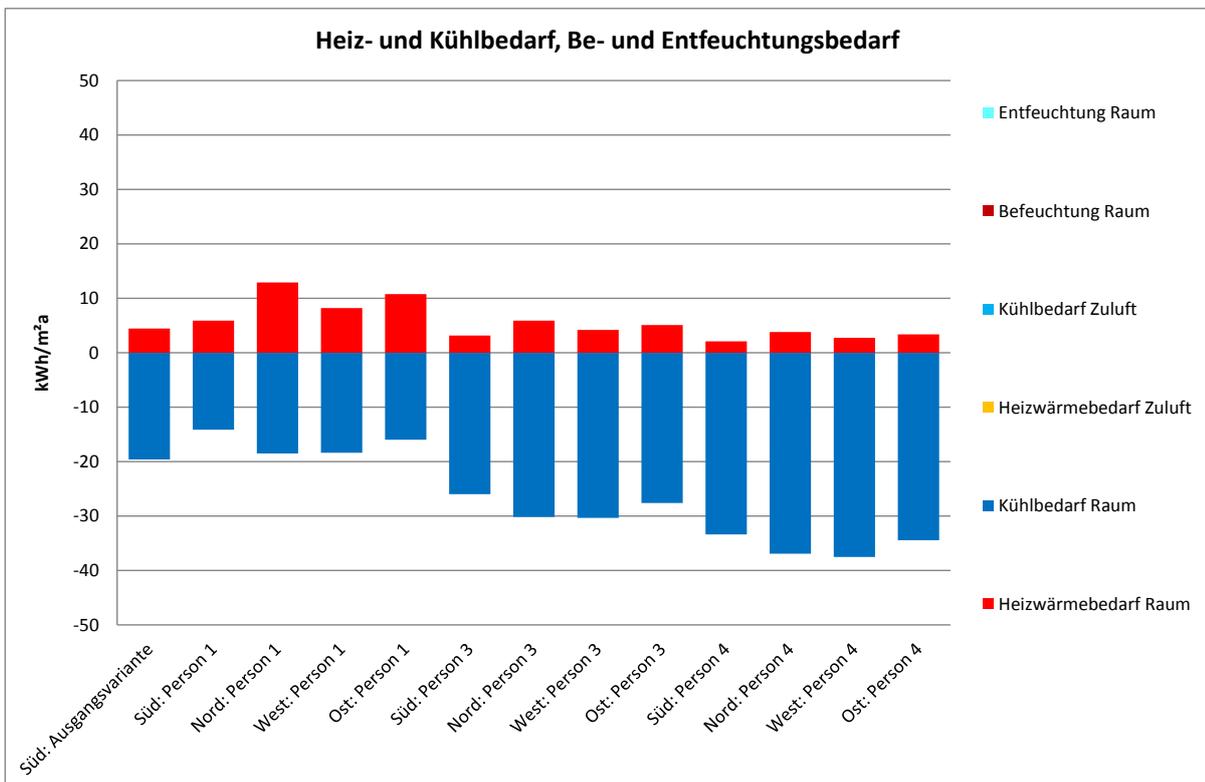


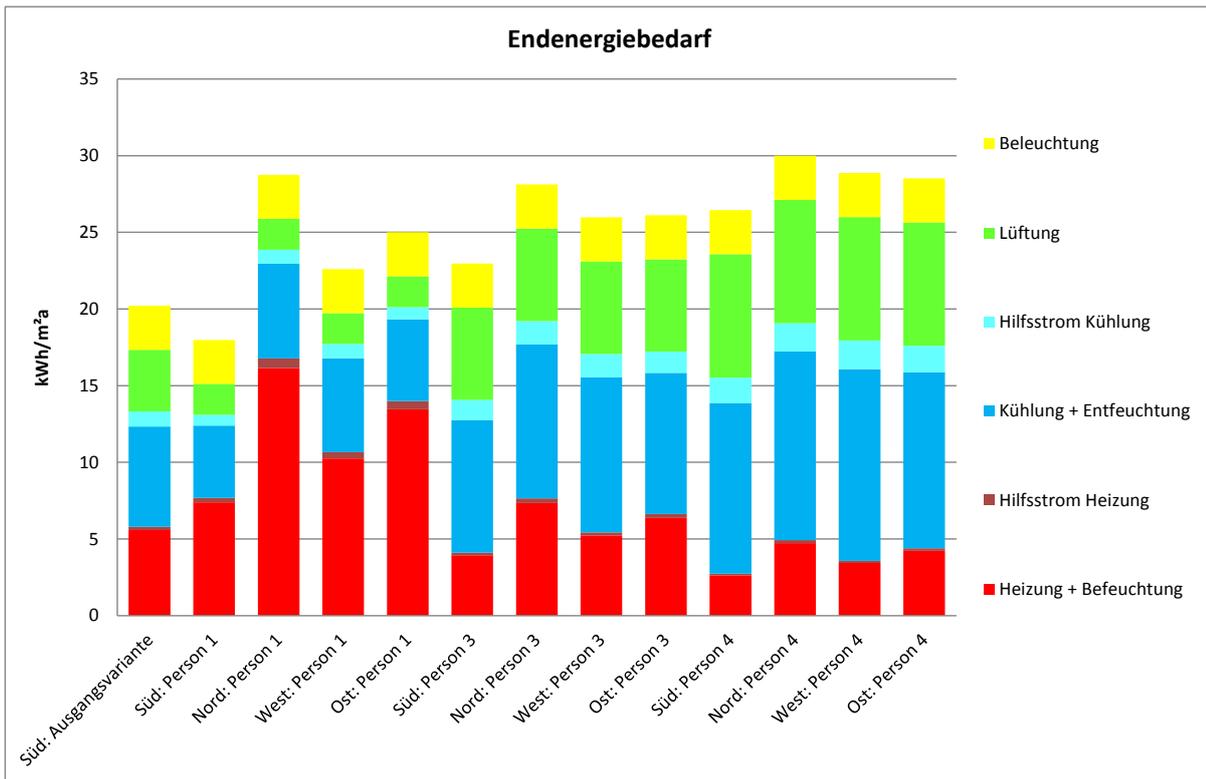
- Die Häufigkeit von niedrigeren empfundenen Temperaturen steigt bei geringerer Belegung deutlich an.



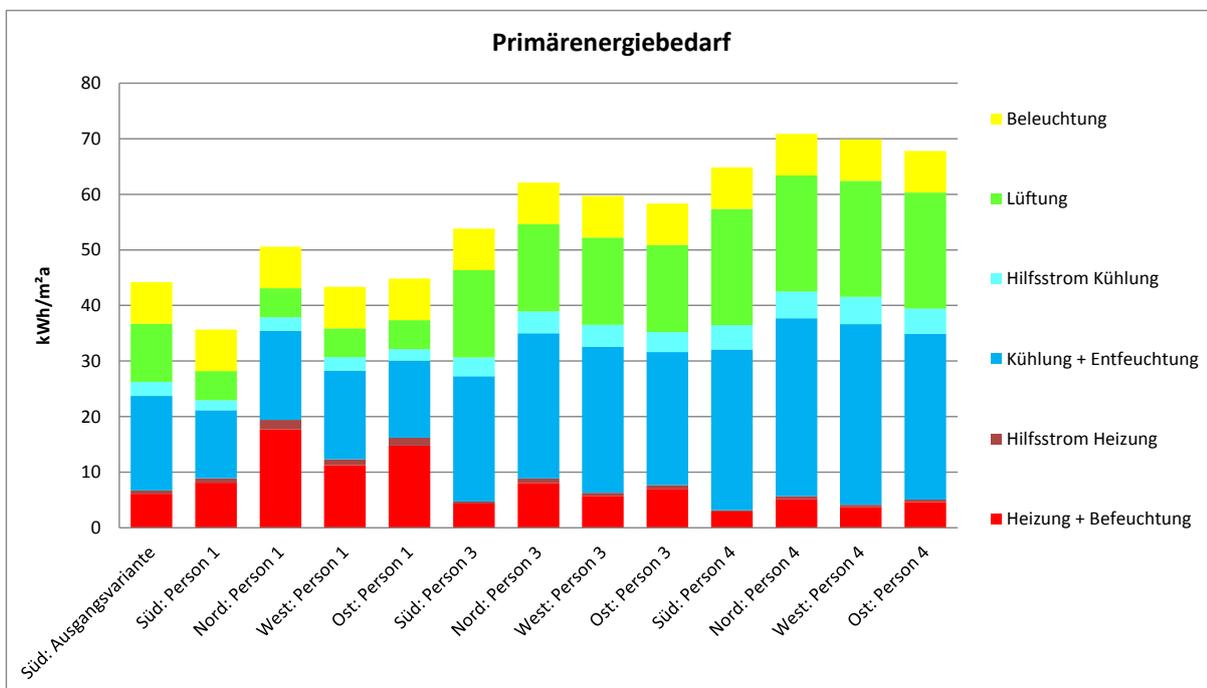


- Die minimalen relativen Feuchten sinken mit höherer Belegung, infolge des erhöhten Lüftungsbedarfs und trotz der erhöhten Feuchteproduktion bei mehr Personen im Raum. Die maximalen relativen Feuchten (im Sommer) sind vor allem mit der hohen Außenluftfeuchte verbunden und daher über alle Varianten ziemlich konstant.





- Wenig überraschend sinkt der Heizwärmebedarf mit höherer Belegung, während der Kühlbedarf ansteigt. Mit 1 Person Belegung könnte die Anforderung Kühlbedarf gemäß Passivhausstandard für den Abschnitt Büroräume und Gang erreicht werden.



- Der Primärenergiebedarf nicht erneuerbar liegt zwischen 35 und 70 kWh/m²a, wobei das Südbüro jeweils die günstigsten Kennwerte mit 1 Person Belegung und das Nordbüro die ungünstigsten mit 4 Personen aufweist.
- Der Zielwert von 60 kWh/m²a kann bis zu den Varianten mit 3 Personen eingehalten werden.

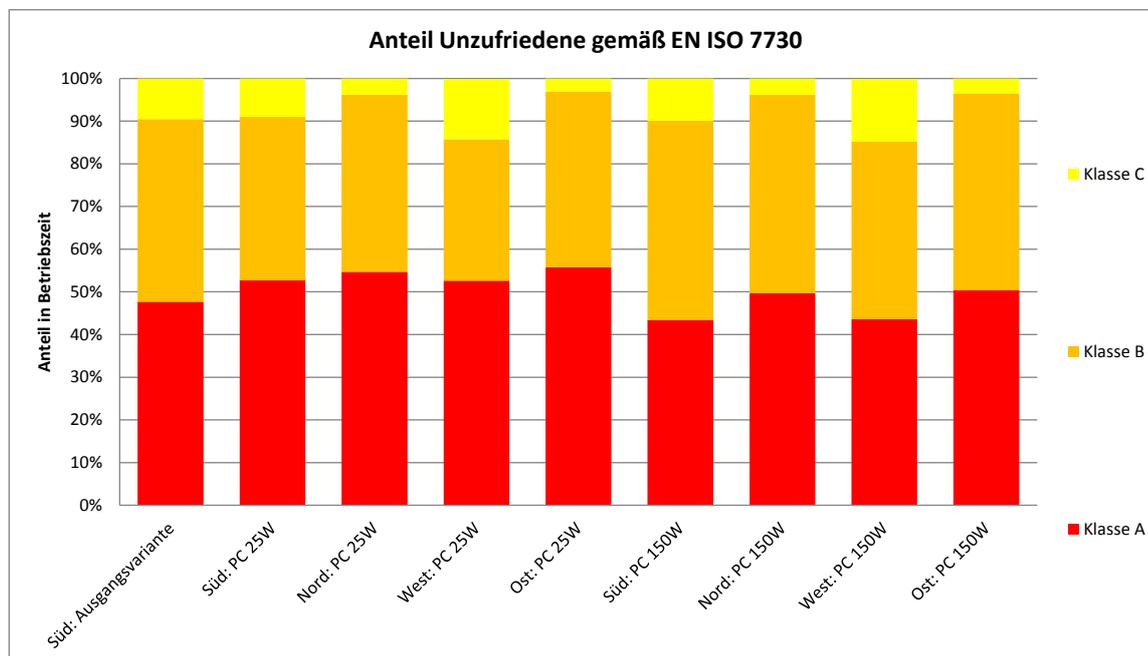
## Zusammenfassung:

Für alle untersuchten Belegungen der Büroräume von 1 bis 4 Personen können sehr behagliche Zustände geschaffen werden. Vergleicht man den Aufwand mit dem Nutzen, so ergibt sich „nur“ eine Verdopplung des Primärenergiebedarfs bei einer Vervierfachung der Personenanzahl. Das bedeutet eine Halbierung des Primärenergiebedarfs pro Kopf bei 4fach dichter Belegung.

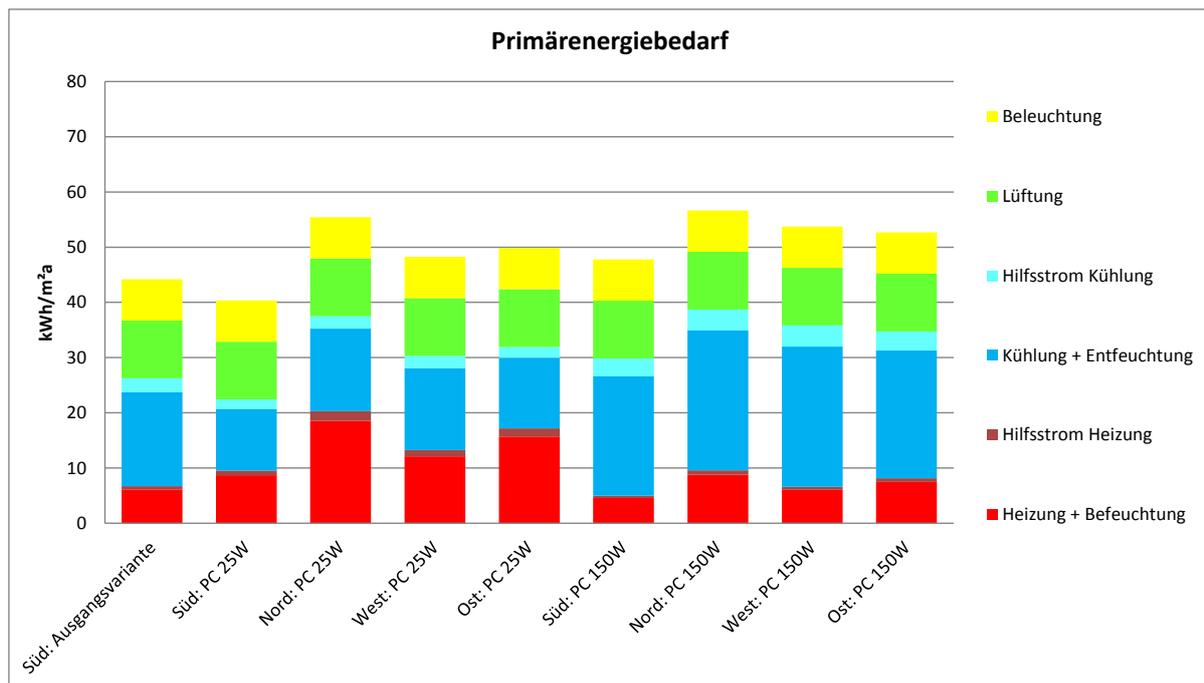
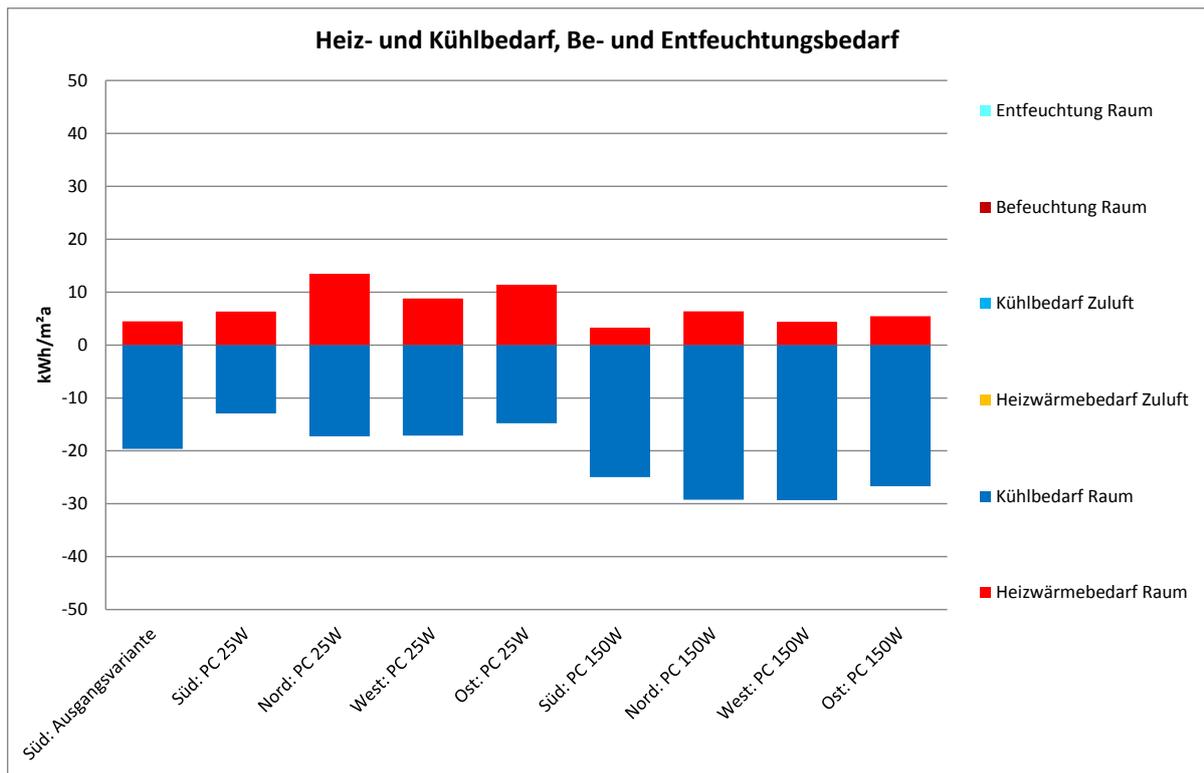
### 5.2.2. Varianten Arbeitshilfen

Die Abwärme der Arbeitshilfen beeinflusst vor allem den Heiz- und Kühlbedarf in den Büroräumen. Die folgenden Varianten wurden im Detail untersucht:

Wärmeabgabe Arbeitshilfen	Wärmeleistung W/Arbeitspl.	Leistung	Leistung	Leistung	
		spez. W/m <sup>2</sup>	spez. W/m <sup>2</sup>	spez. W/m <sup>2</sup>	
		2 Personen	1 Person	4 Personen	
PC100	100.0	7.7	3.8	15.4	Passivbüro_00
PC25	25.0	1.9	1.0	3.8	
PC150	150.0	11.5	5.8	23.1	



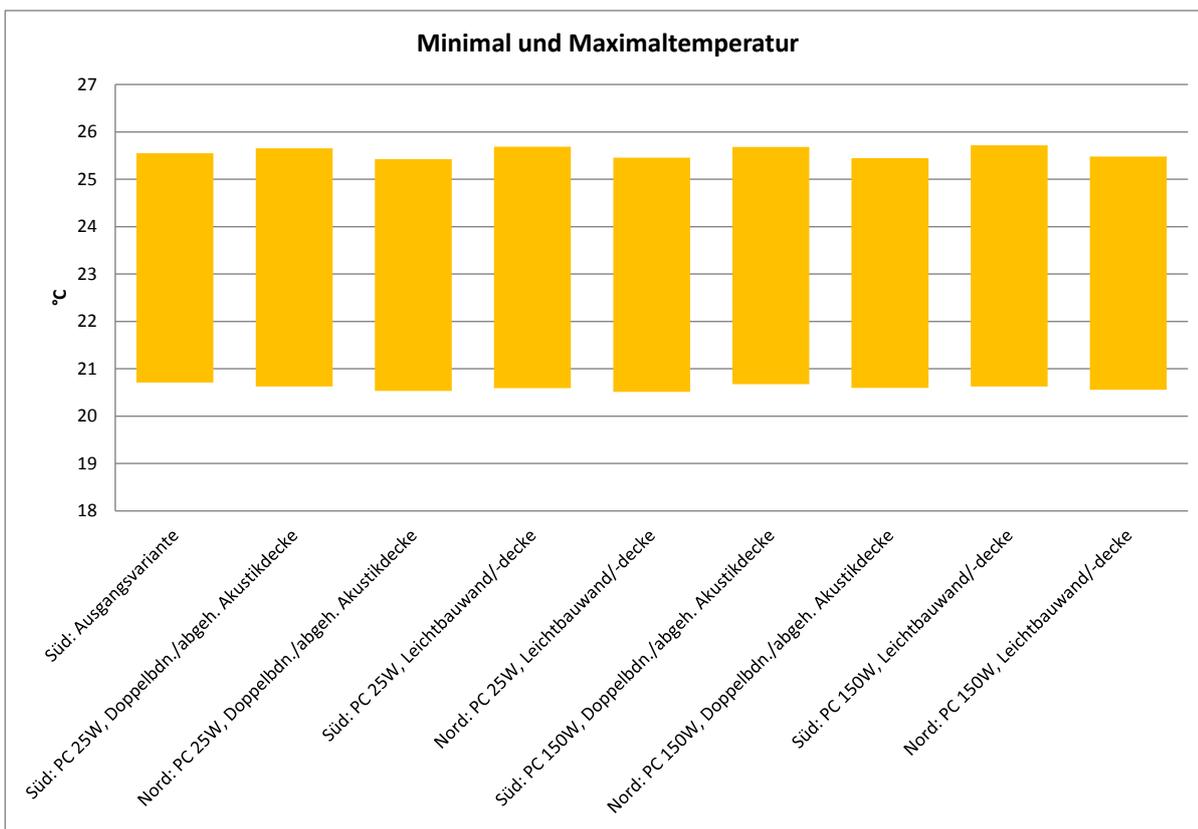
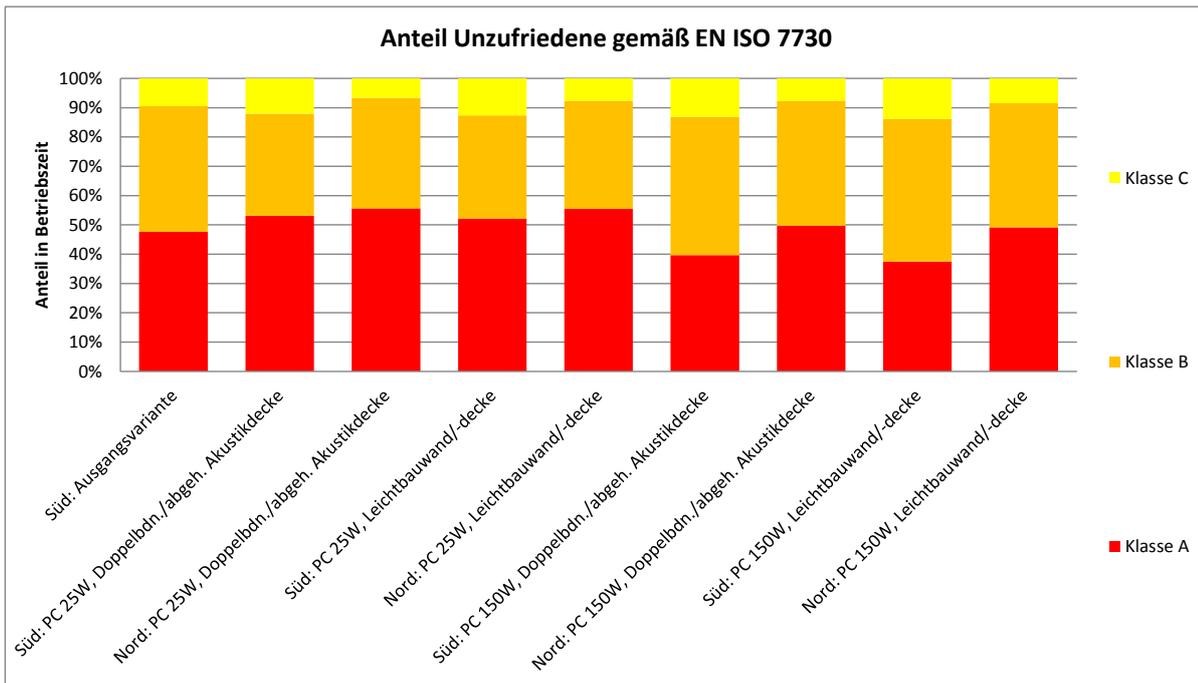
- Ein hoher Grad an Behaglichkeit kann in allen Varianten sichergestellt werden



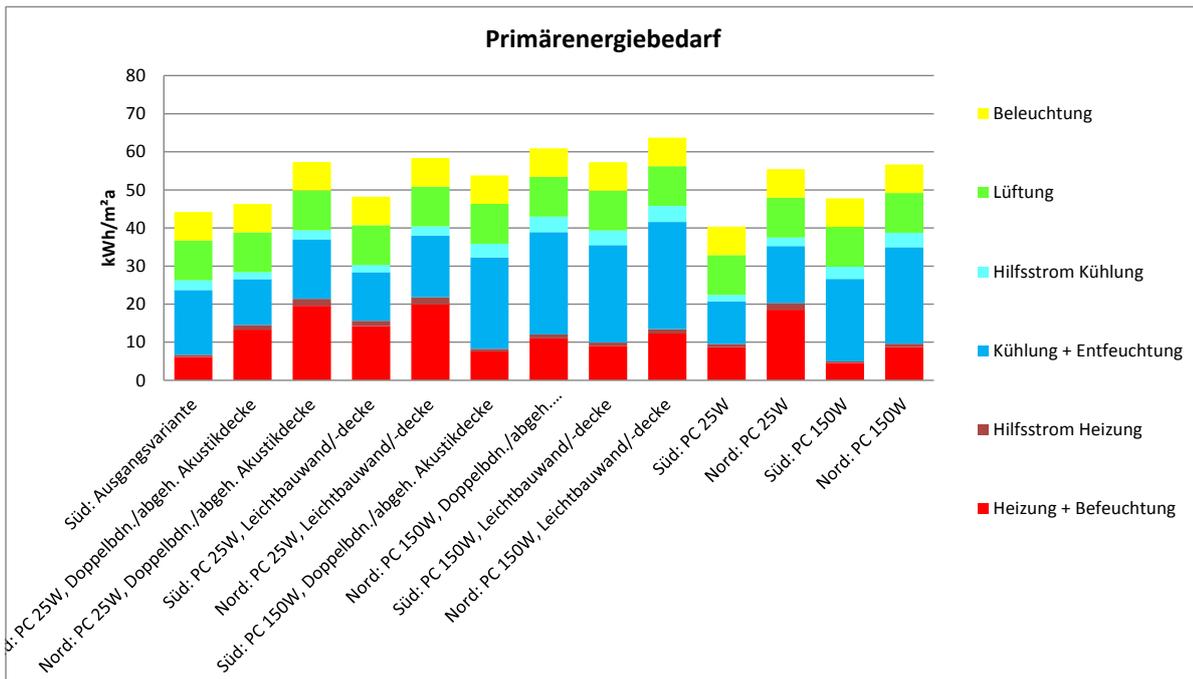
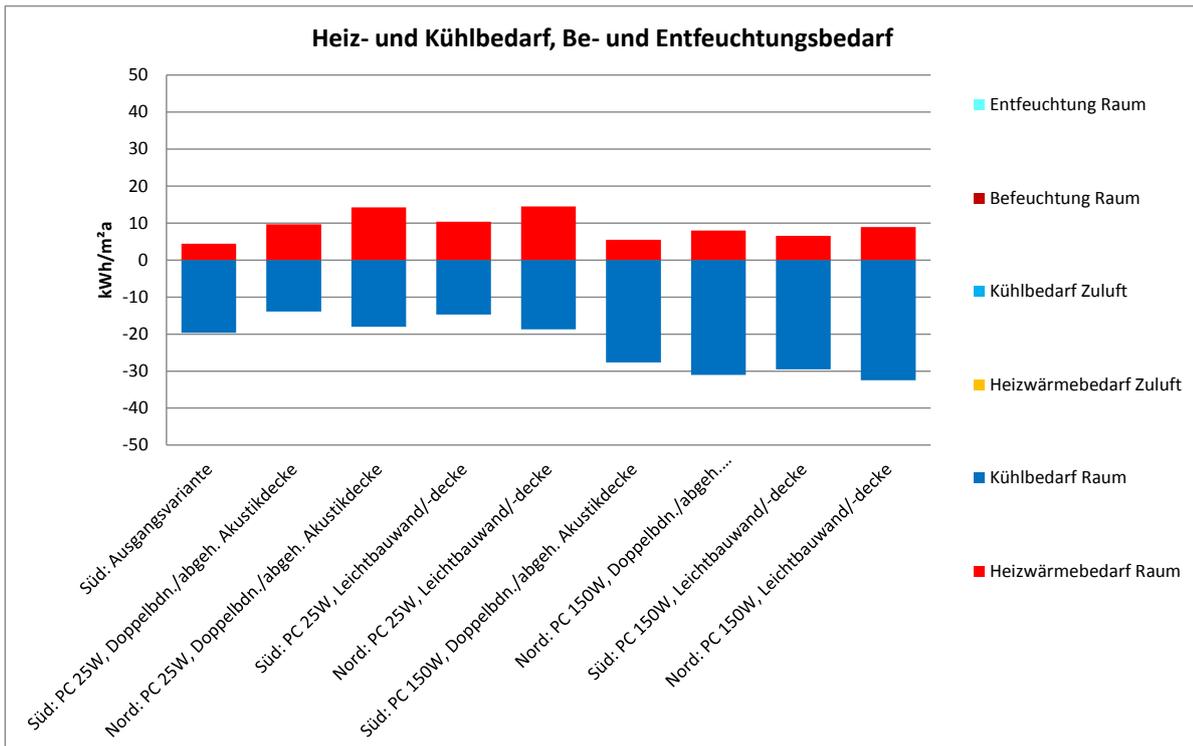
- Die Unterschiede liegen trotz der stark unterschiedlichen Lasten verhältnismäßig niedrig, wenn dieselbe Orientierung des Büroraums betrachtet wird. So steigt er für den Büroraum Süd von 40 kWh/m²a bei 25 W/Arbeitsplatz auf 48 kWh/m²a/Arbeitsplatz bei 150 W/Arbeitsplatz an. Hauptgrund ist der Ausgleich von Heiz- und Kühlbedarf.

Die Abwärmeleistung der Arbeitshilfen wird nachfolgend mit unterschiedlichen Baukonstruktionen kombiniert:

- einer Stahlbetonskelettbauweise, allerdings mit abgehängter Akustikdecke
- und einer Leichtbauweise



- Ein hoher Grad an Behaglichkeit kann in allen Varianten sichergestellt werden
- Durch die leichte Bauweise, bzw. durch die abgehängte Decke gibt es vor allem im Südbüro eine leichte Reduzierung des Komfortniveaus.

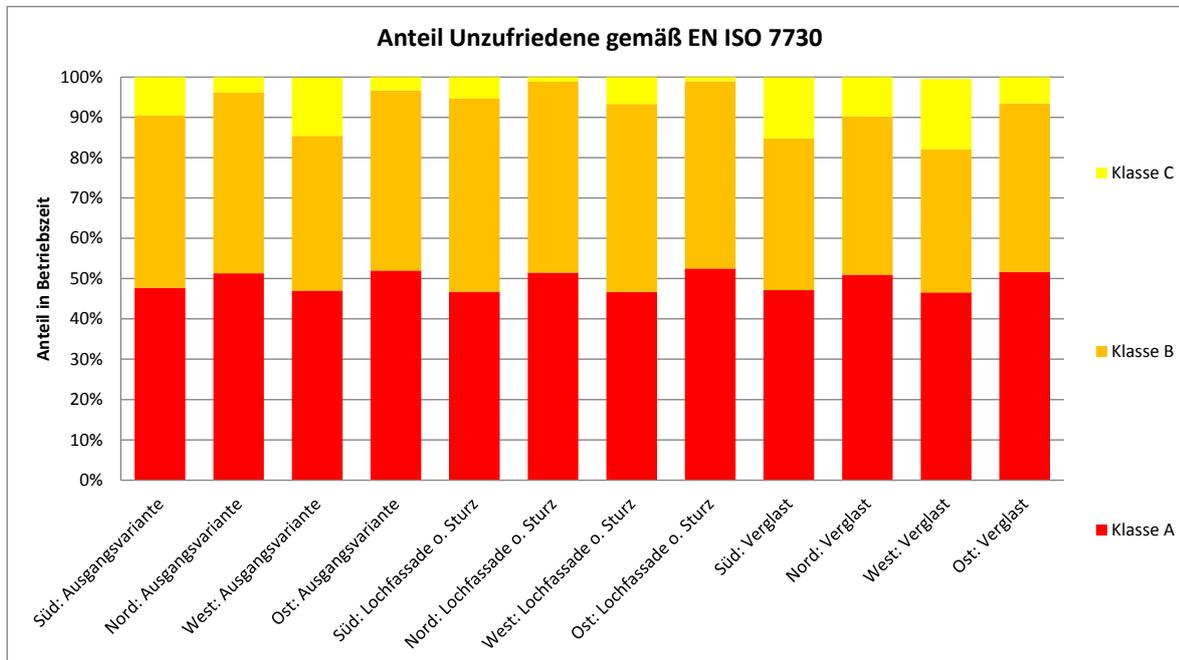


- Die Ausgangsvariante mit 100 W/Arbeitshilfe ist primärenergetisch günstiger als die Variante mit 25 W/Arbeitshilfe und abgehängter Decke. Achtung: der Primärenergiebedarf durch die Nutzung ist hier nicht enthalten!
- Die Erhöhung des Primärenergiebedarfs für die Leichtbauweise liegt bei Südorientierung bei ca. 20 %, bei Nordorientierung deutlich darunter.

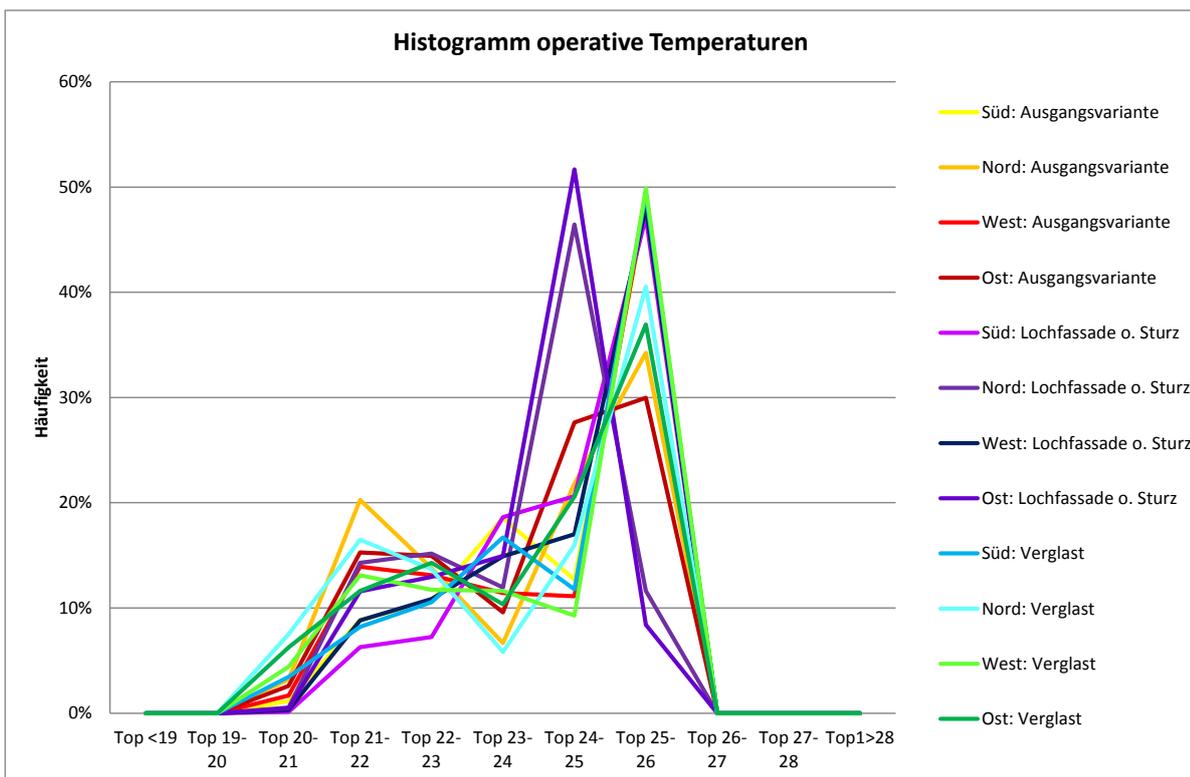
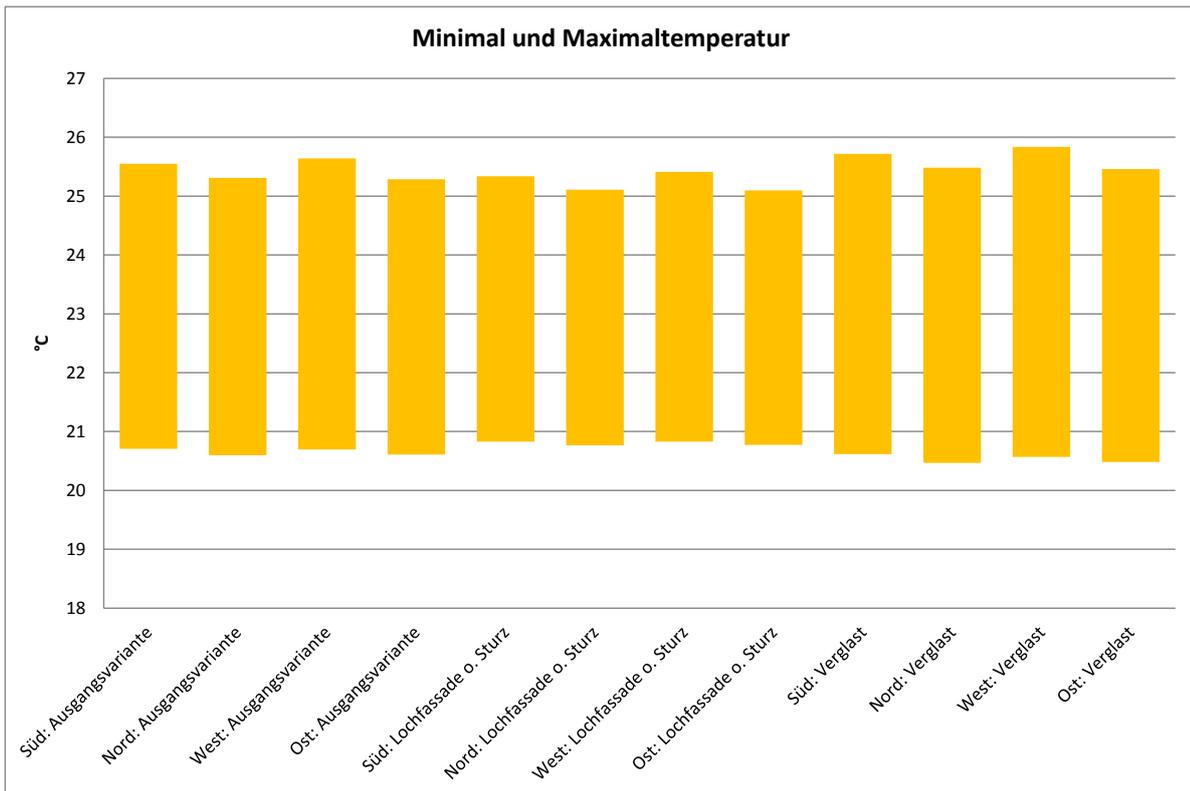
### 5.2.3. Varianten Fenster und Fassade

Fenstergröße und -Anordnung beeinflusst vor allem den Beleuchtungsaufwand und durch die Abwärme Heiz- und Kühlbedarf in den Büroräumen. Die folgenden Varianten wurden im Detail untersucht:

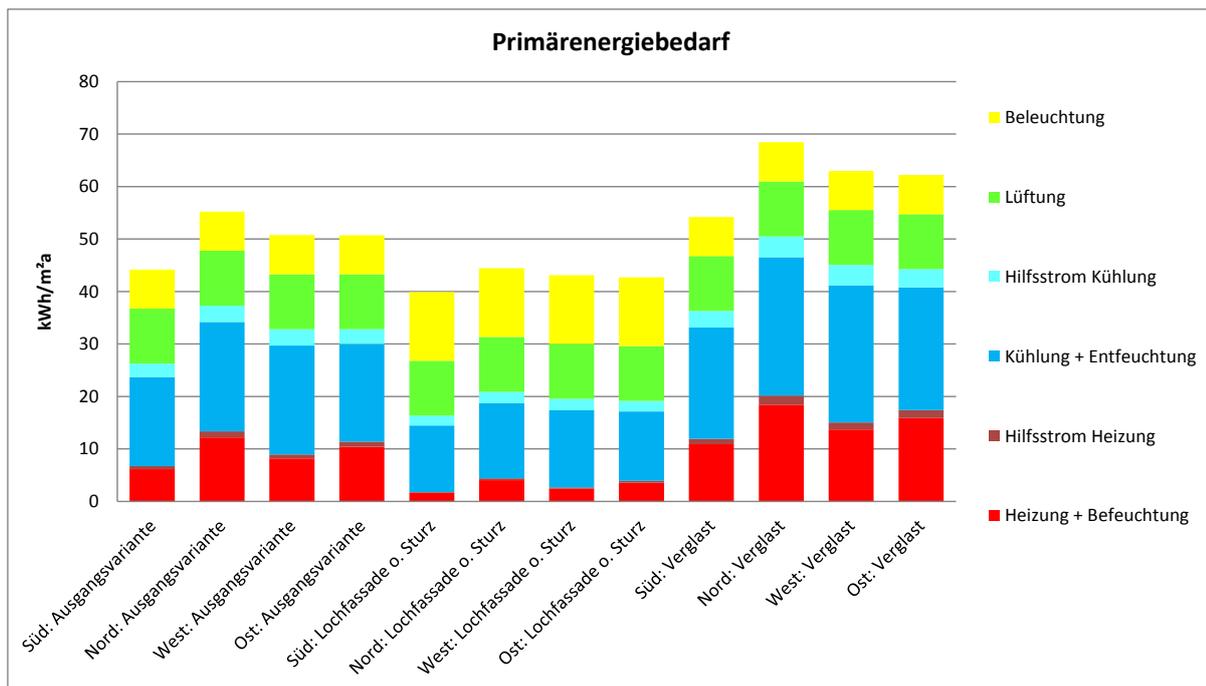
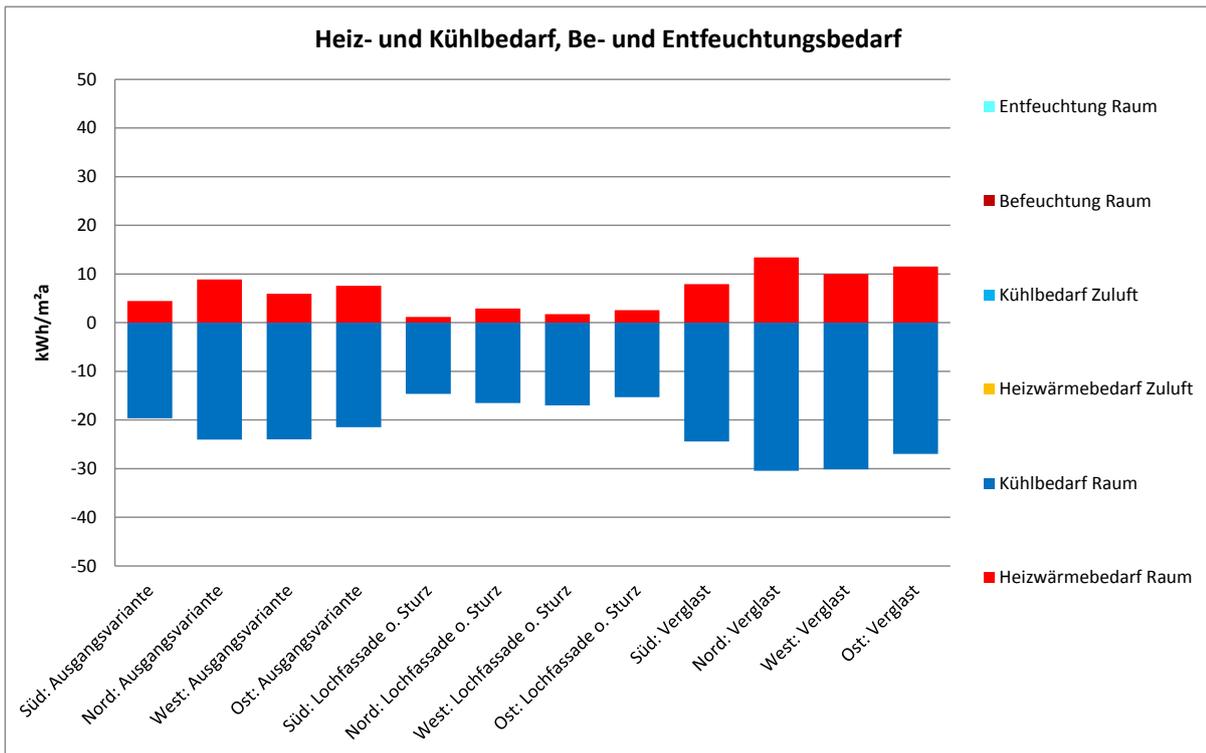
Fassade	Fensterfläche m <sup>2</sup>	Fensteranteil Bezug Bruttofassadenfläche %	Fensteranteil Bezug Nutzfläche %	
Fensterband	11.4	70	44	Passivbüro_00
Vollverglast	15.6	97	60	
Lochfassade	6.2	38	24	



- Ein hoher Grad an Behaglichkeit kann in allen Varianten sichergestellt werden, die Unterschiede sind vergleichsweise gering.
- Leichte Vorteile haben ost- und nord-gerichtete Büroräume.



- Die empfundenen Temperaturen liegen für die Lochfassade am günstigsten, für die vollverglaste Version am ungünstigsten. Die Unterschiede sind allerdings gering.
- Die maximalen Häufigkeiten von Temperaturen über 25 °C sind im Fall der nord- und ostgerichteten Büroräume günstiger als in die anderen Orientierungen.

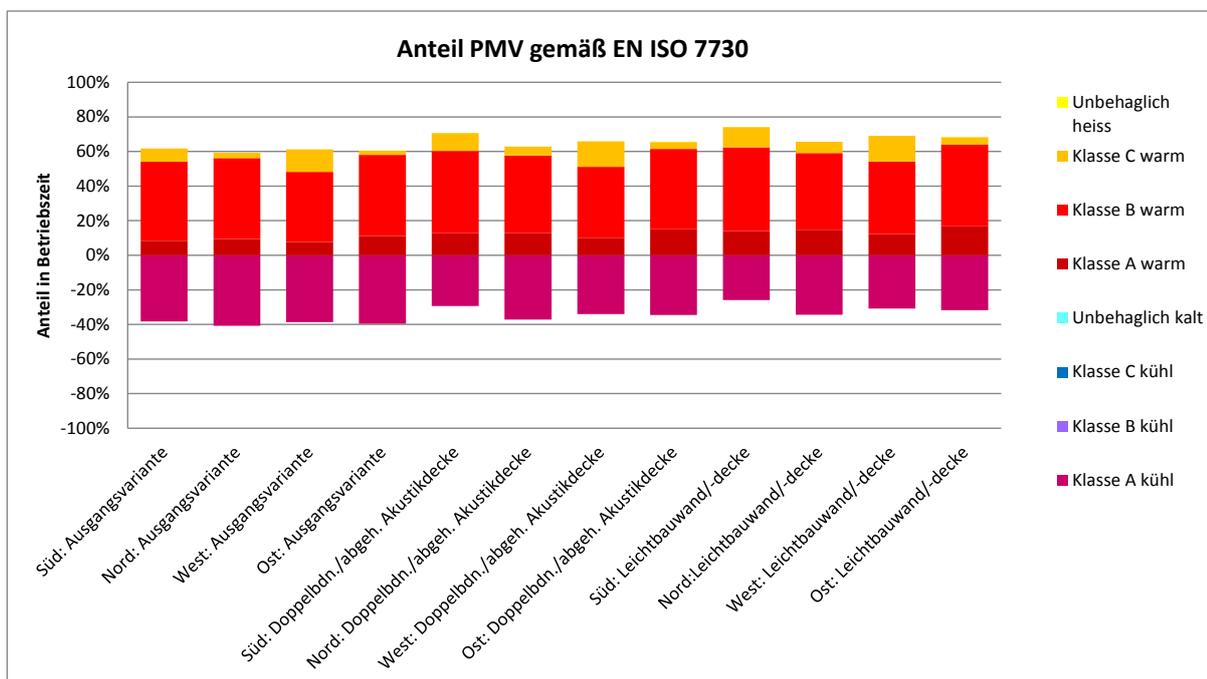
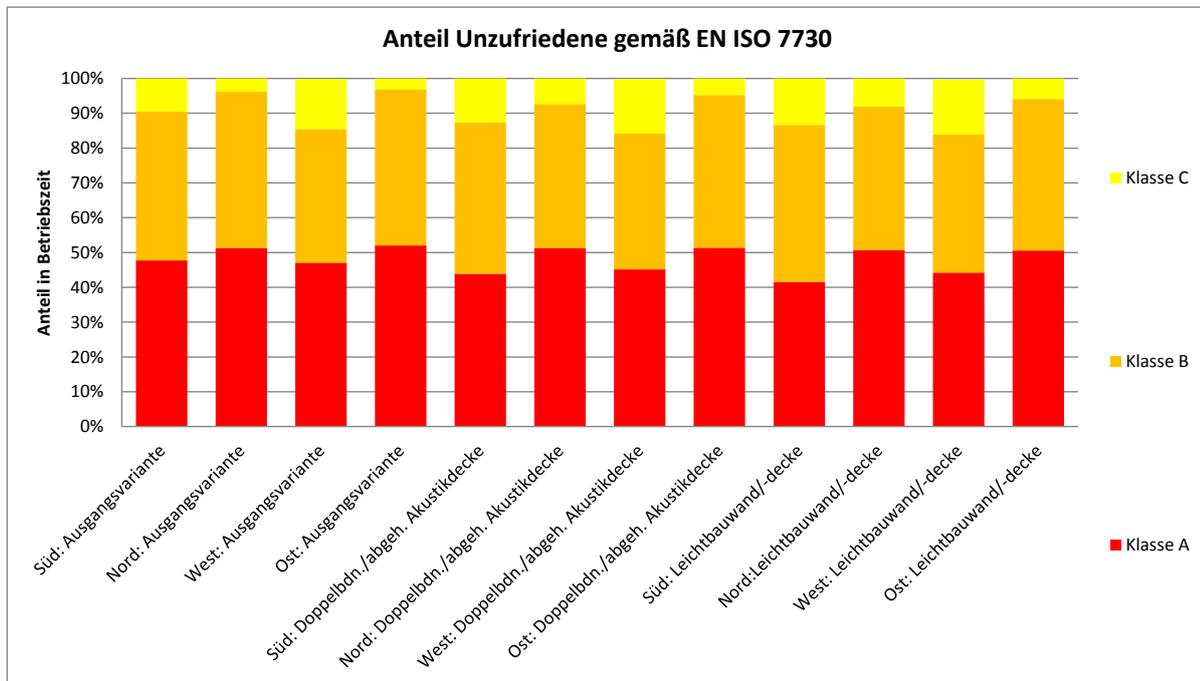


- Primärenergetisch liegt die Lochfassade ohne Sturz deutlich günstiger als die vollverglaste Variante, das Fensterband liegt dazwischen.
- Mit der vollverglasten Variante kann der Passivhaus-Richtwert knapp nicht eingehalten werden.

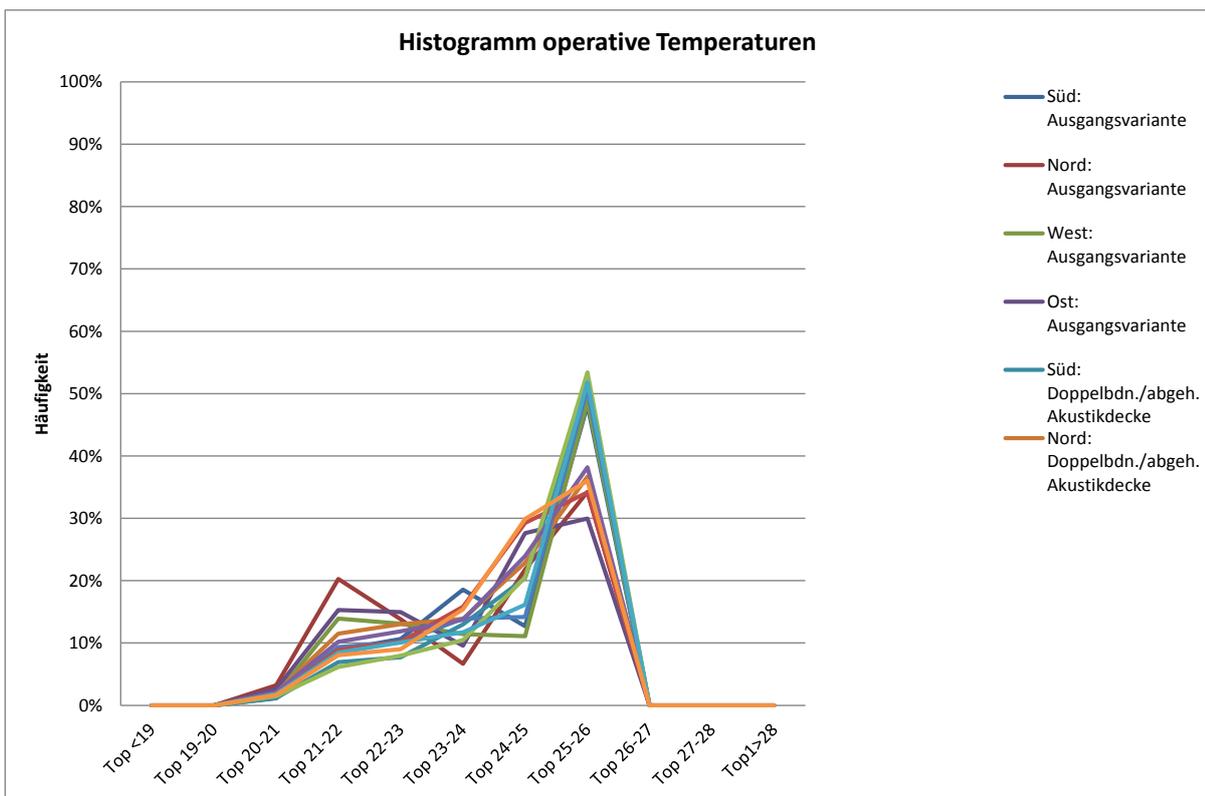
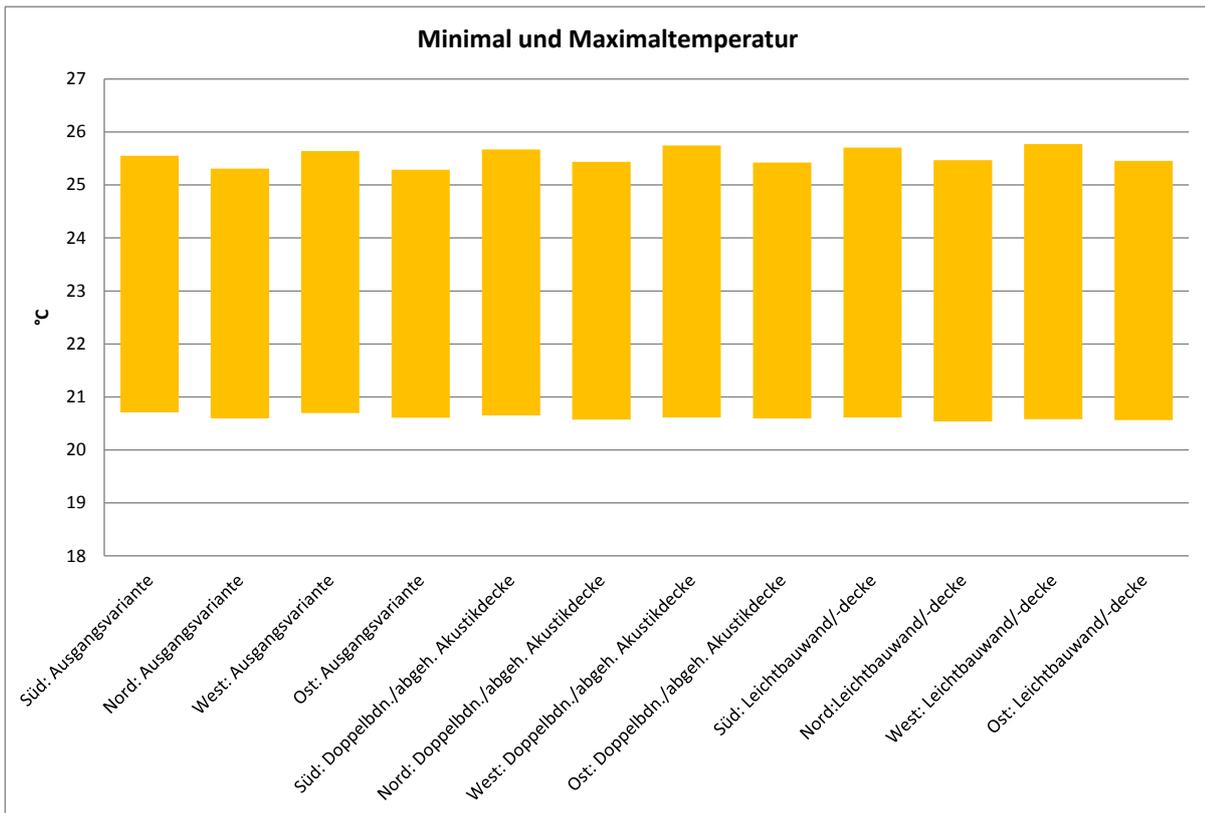
Insgesamt wirken sich die unterschiedlichen Fassaden mit der gewählten Gebäudetechnik Varianten vor allem auf den Primärenergiebedarf aus, der Einfluss auf die globale Behaglichkeit ist gering (Passivhausniveau).

## 5.3. Ergebnisse Thermische Hülle

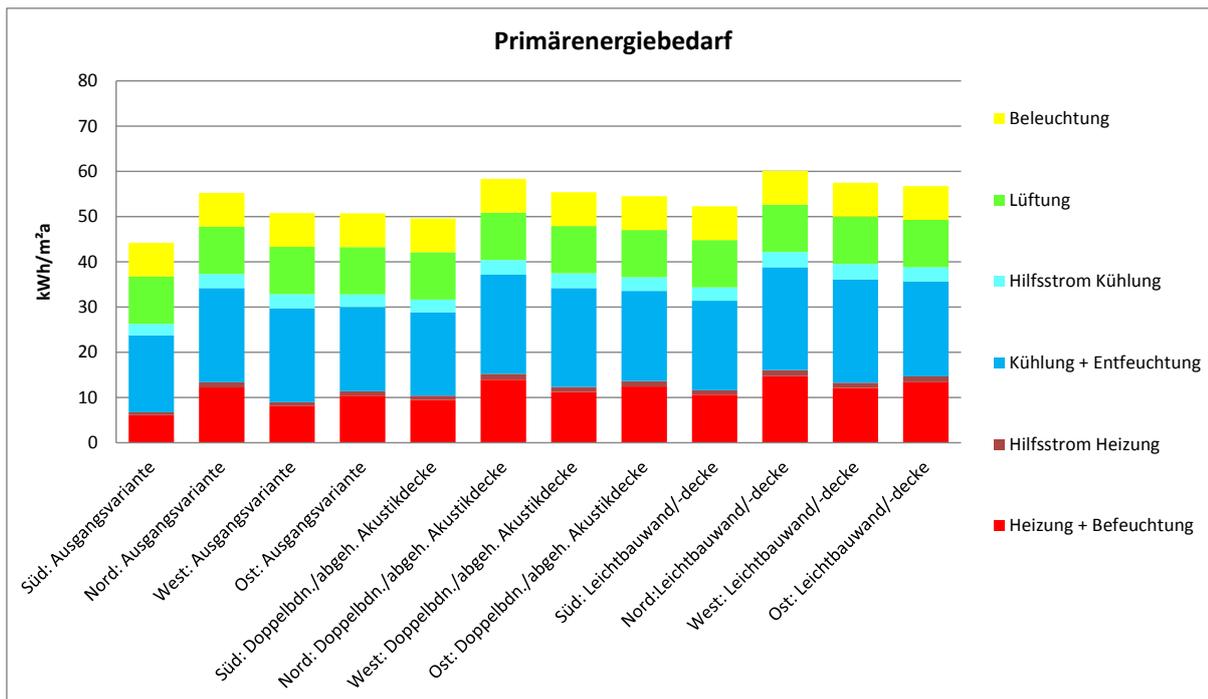
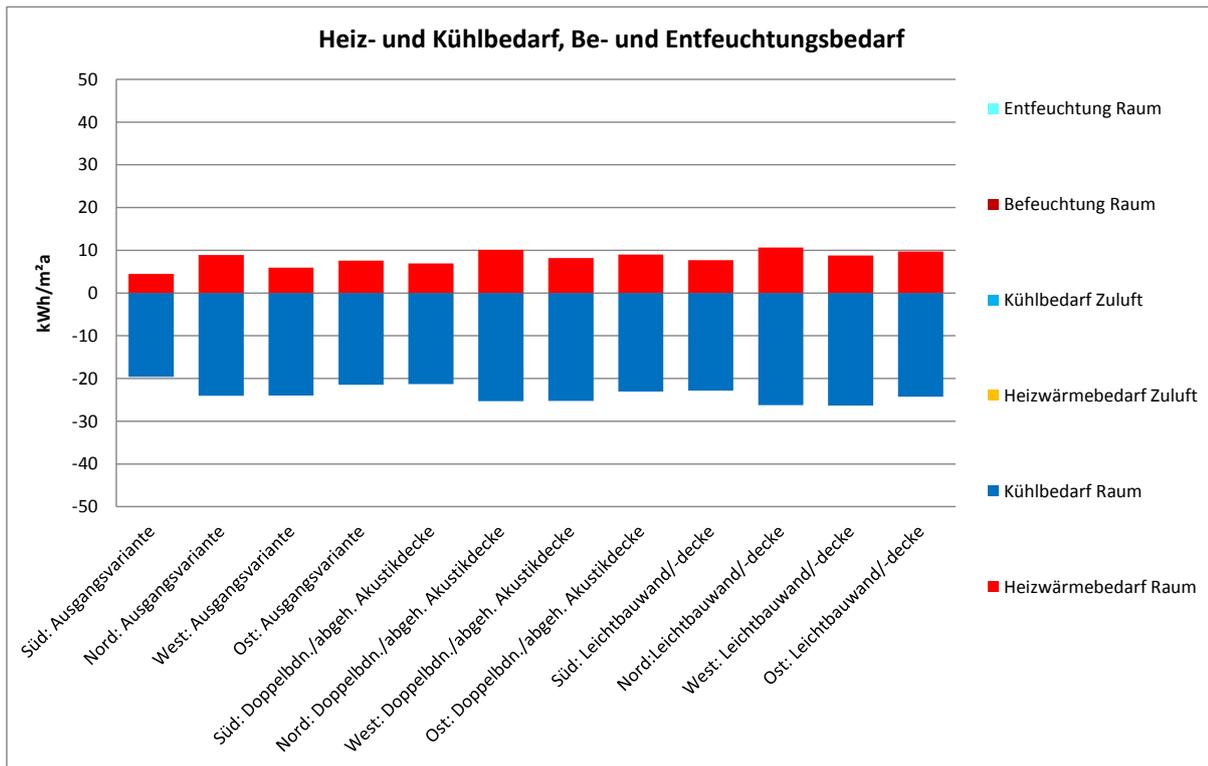
### 5.3.1. Bauteilqualitäten



- Ein hoher Grad an Behaglichkeit kann in allen Varianten sichergestellt werden.
- Die Stunden in Klasse C erhöhen sich vor allem für die süd- und westorientierten Büroräume.



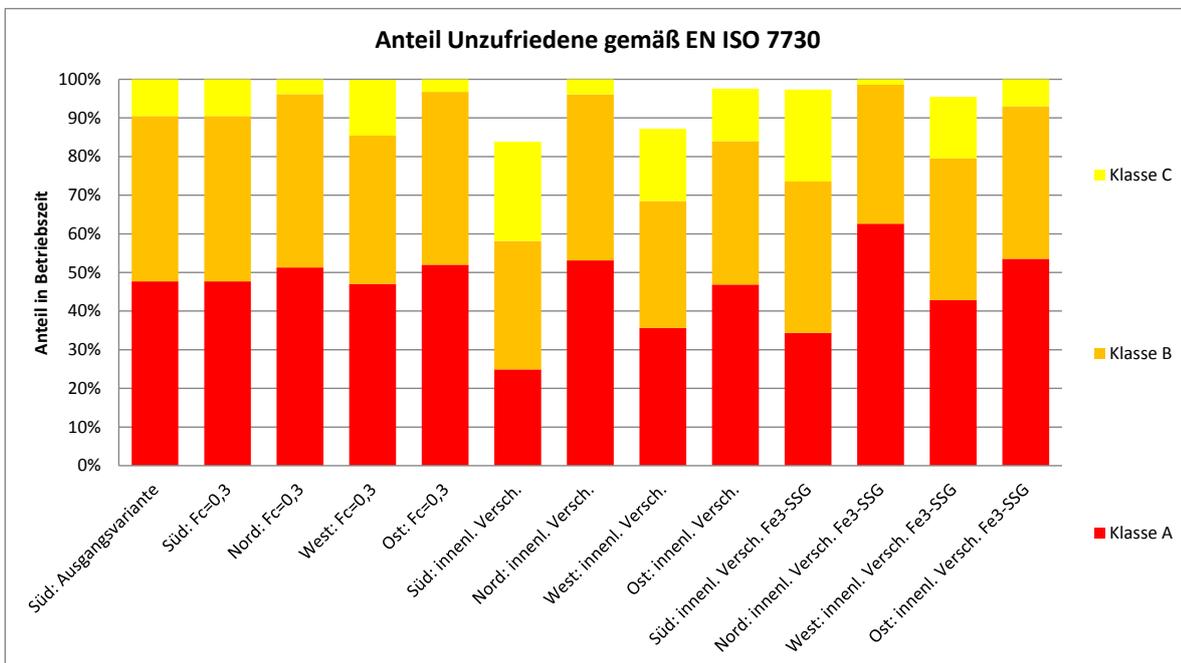
- Die maximalen operativen Temperaturen erhöhen sich durch die abgehängte Decke oder die Leichtbauweise nur in sehr geringem Maße.



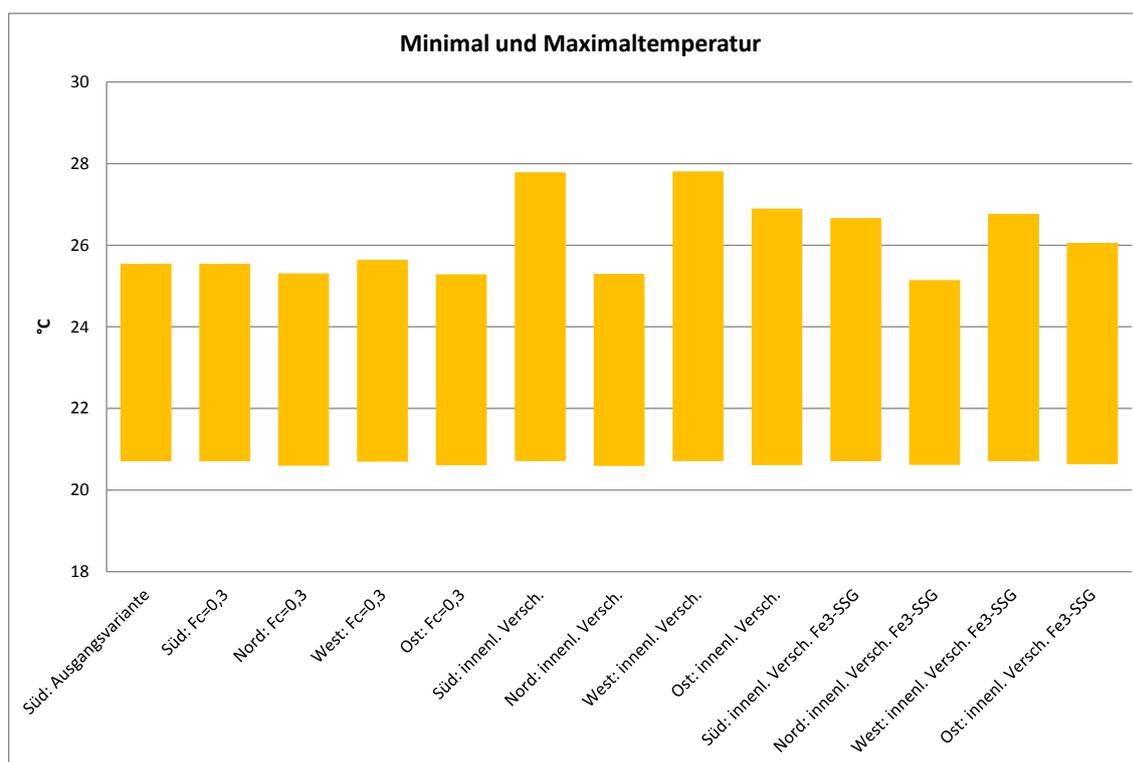
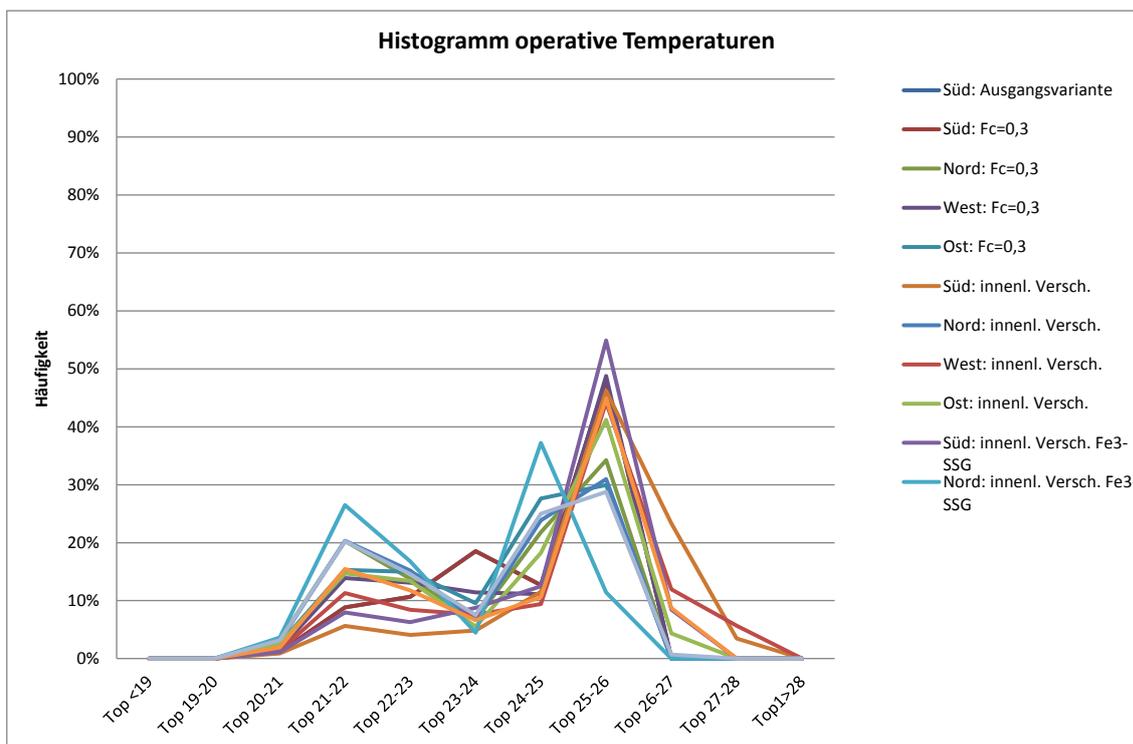
- Die Erhöhung des Primärenergiebedarfs basiert auf der Erhöhung durch die geringere wirksame Speichermasse und wird sowohl durch die Erhöhung des Heizwärme- als auch des Kühlbedarfs verursacht.
- Im südorientierten Büroraum wird der Primärenergiebedarf um ca. 20 %, im nordorientierten um nur 10 % erhöht.
- Insgesamt ist die Stahlbetonskelettvariante mit abgehängter Akustikdecke der Leichtbauvariante ähnlicher als der Ausgangsvariante (trotz der gleichen Grundstruktur in Stahlbeton).

### 5.3.2. Sonnenschutz und Verglasung

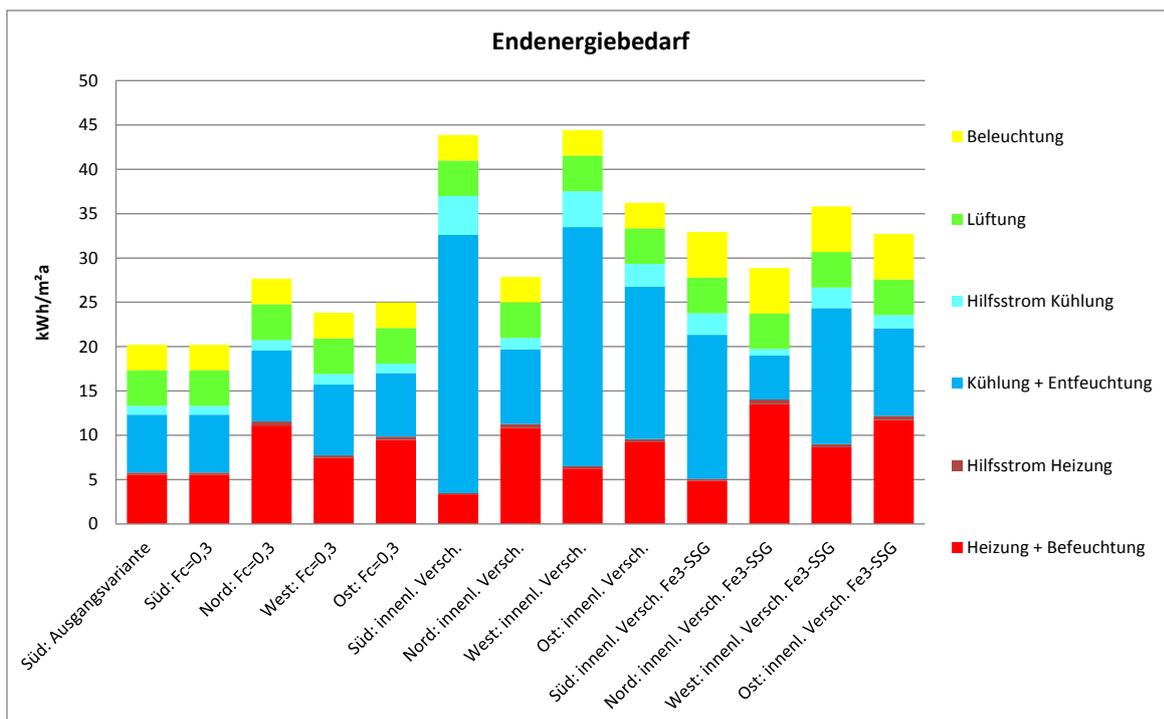
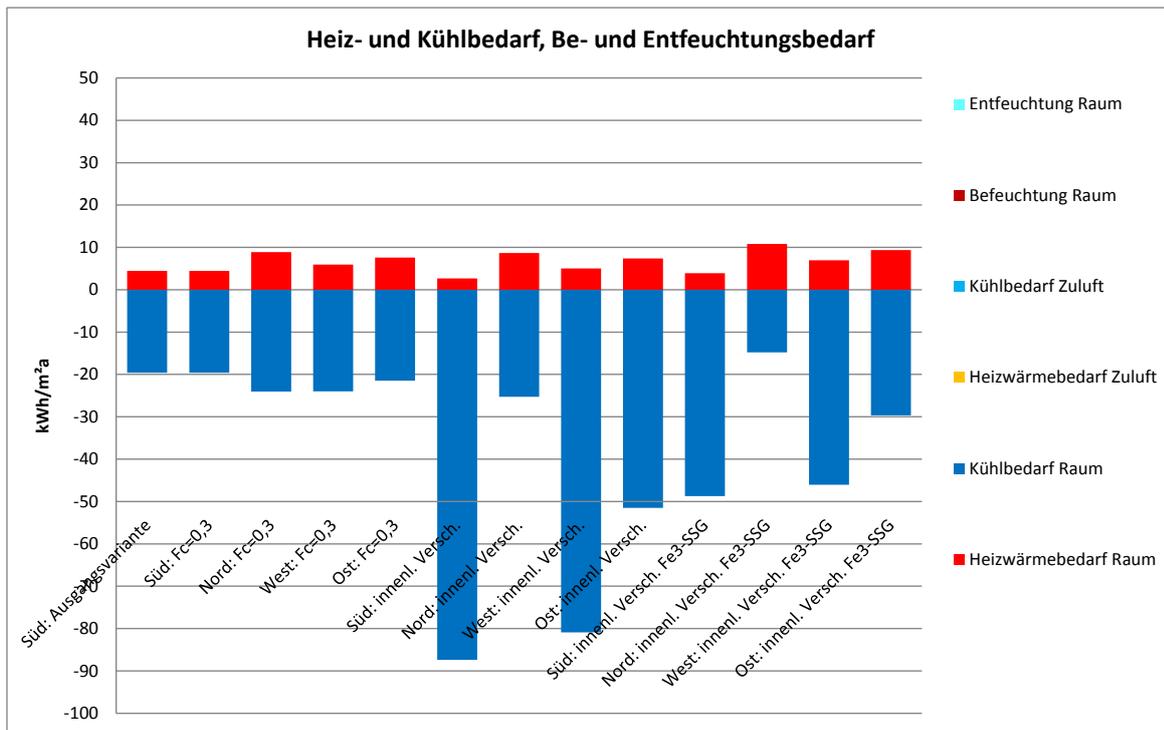
Fenster Sonnenschutz	Transmission		Lage	Transm. Licht %	Transm. Solar %	Reflexion Solar %	Energiedurchlass Fc s%
	Licht %	g-Wert %					
hochwertige Jalousie (Passivbüro_00)	67	50	außenliegend	10	10	60	15
Sonnenschutz dunkel	67	50	außenliegend	10	10	20	30
Sonnenschutz dunkel	67	50	innenliegend	10	10	60	68
Sonnenschutzglas FE3	40	30	innenliegend	10	10	60	80

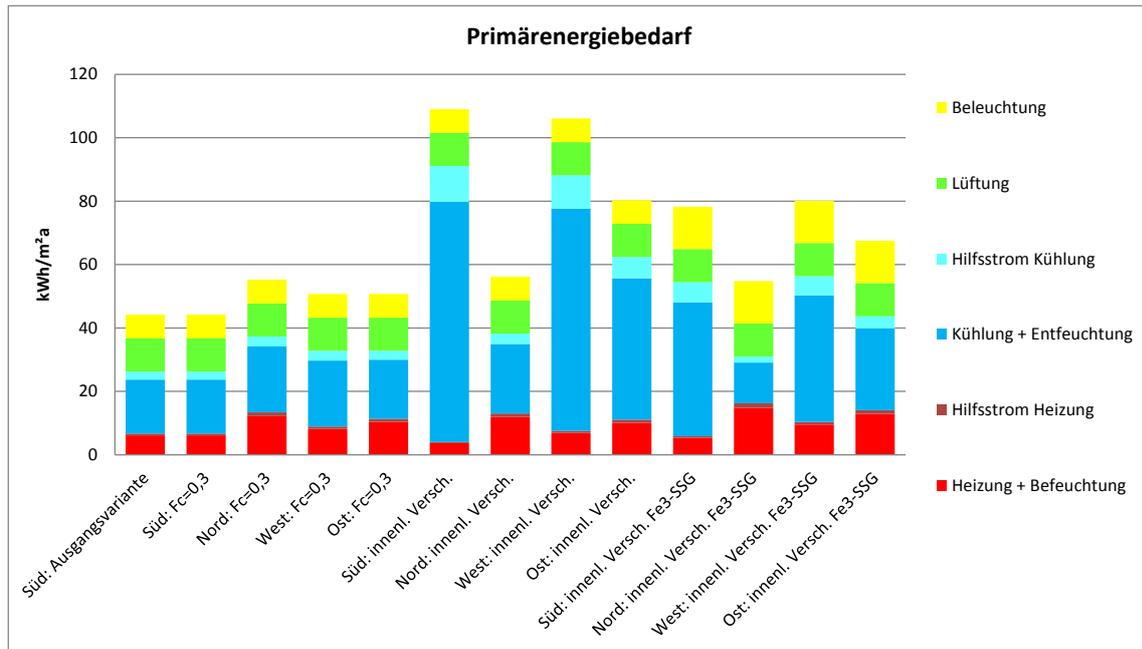


- Ein hoher Grad an Behaglichkeit kann in den Varianten mit außenliegendem Sonnenschutz sichergestellt werden.
- Trotz Kühlung auf 25 °C Lufttemperatur treten in den Büroräumen mit innenliegendem Sonnenschutz (Ausnahme Büro Nord) zwischen 20 und 5 % an unbehaglichen Zuständen auf.
- Mit Sonnenschutzglas und innenliegendem Sonnenschutz entspannt sich die Situation. Im süd- und westorientierten Büro treten immer noch unbehagliche Zustände auf.



- Die maximalen empfundenen Temperaturen steigen durch die hohen Oberflächentemperaturen in den Varianten mit innenliegendem Sonnenschutz überall außer im Nordbüro deutlich über 26 °C an.
- Mit einem effizienten Sonnenschutzglas sinken die maximalen empfundenen Temperaturen um ca. 1 °C in den am meisten belasteten Räumen.



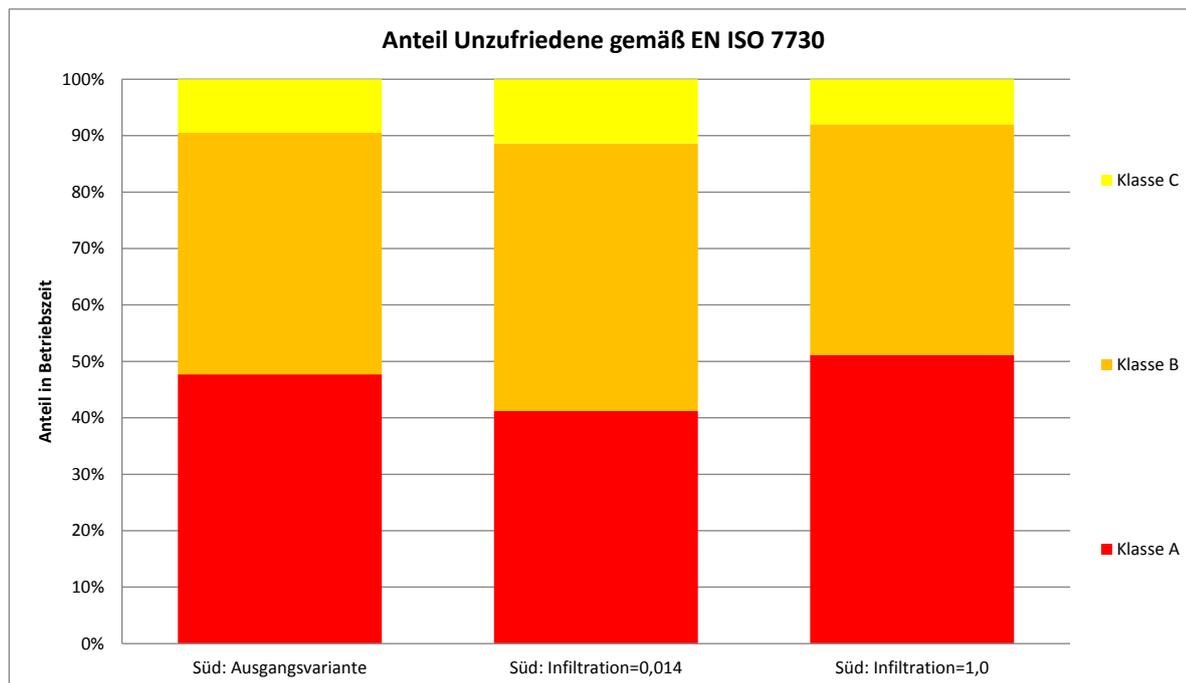


- Der Kühlbedarf steigt in der Variante mit weniger effizienten Sonnenschutz (Fc 0,3) nur wenig an, insgesamt liegt der Primärenergiebedarf noch deutlich unter 60 kWh/m²a.
- Für die Varianten mit innenliegendem Sonnenschutz liegen der süd-, ost- und westorientierte Büroraum deutlich über 60 kWh/m²a. Nur das nordorientierte Büro liegt in einem ähnlichen Bereich wie die außenliegend beschatteten Büroräume.
- In den Varianten mit Sonnenschutzglas und innenliegenden Sonnenschutz ist in den meisten Fällen der Primärenergiebedarf immer noch über 60 kWh/m²a, aber besonders der süd- und der west-orientierte Büroraum stellen sich trotz des höheren Heizwärmebedarfs im Vergleich zur Variante mit Wärmeschutzverglasung günstiger dar.
- Nur im Nordbüro ist der Primärenergiebedarf in allen Verglasungs- und Sonnenschutzvarianten sehr ähnlich.

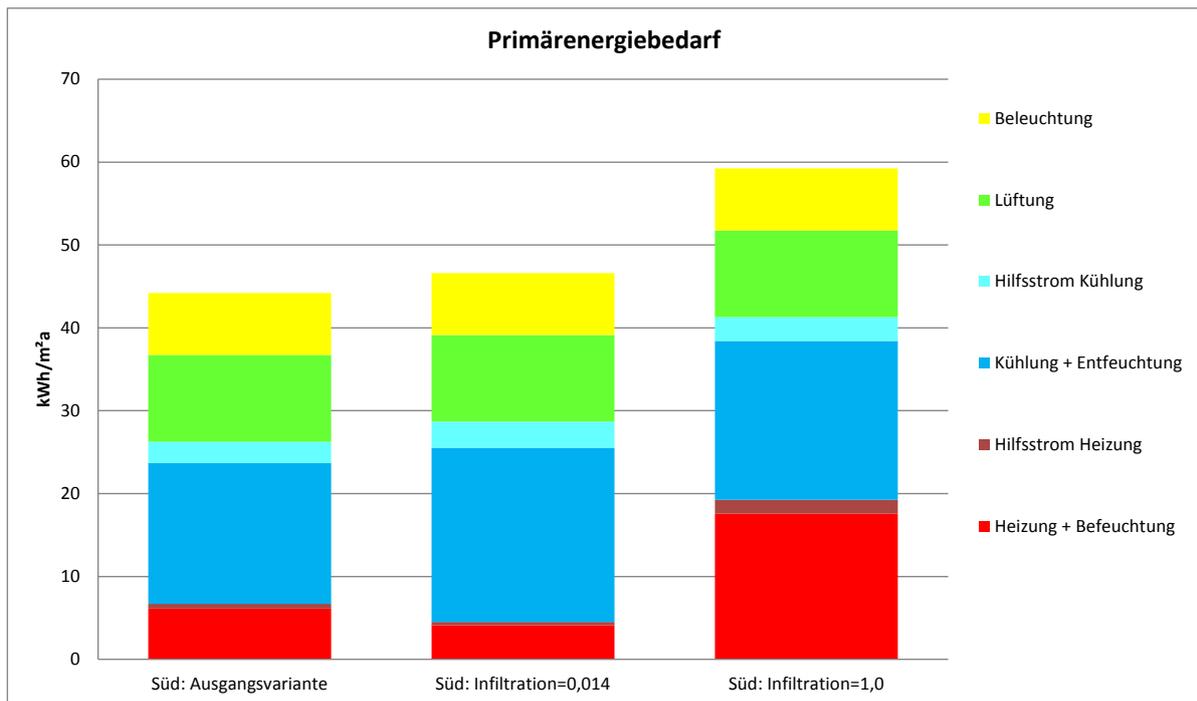
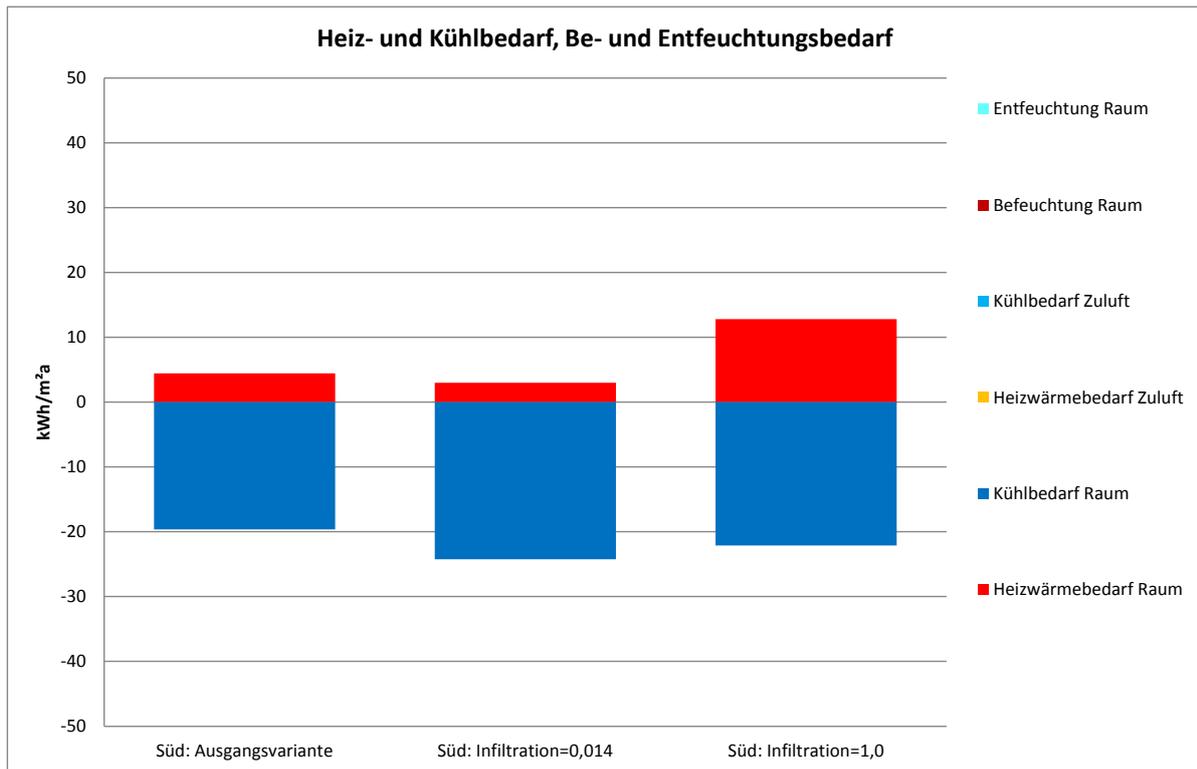
### 5.3.3. Luftdichtigkeit

Die Wirkung der Luftdichtigkeit wurde anhand der folgenden Varianten untersucht:

Luftdichtigkeit	$n_{50}$ -Wert 1/h	Infiltration 1/h	
Standard	0.6	0.042	Passivhausbüro_00
sehr luftdicht	0.2	0.014	
Neubau konventionell mit Lüftungsanlage	1.5	0.105	



- Ein hoher Grad an Behaglichkeit kann in allen Varianten sichergestellt werden.



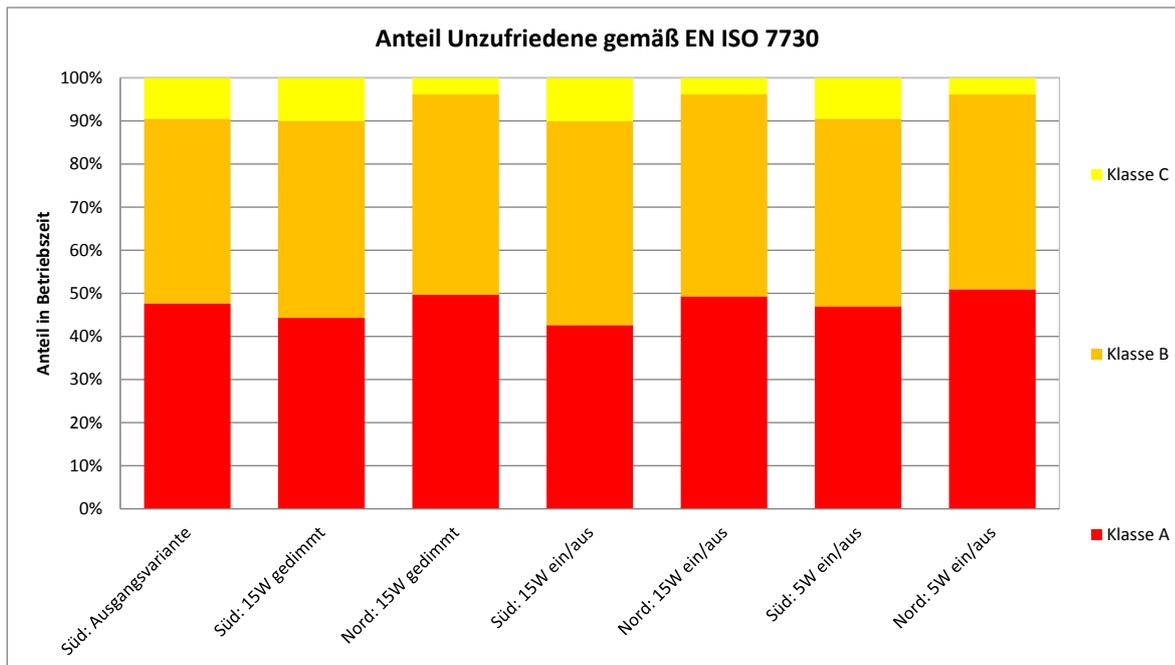
- Der Primärenergiebedarf ist für die sehr dichten Varianten ( $n_{50} = 0.6$  und  $0.2/h$ ) jeweils gleich wegen der gegenläufigen Wirkungen der Luftdichtigkeit: der Kühlbedarf steigt, der Heizbedarf sinkt.

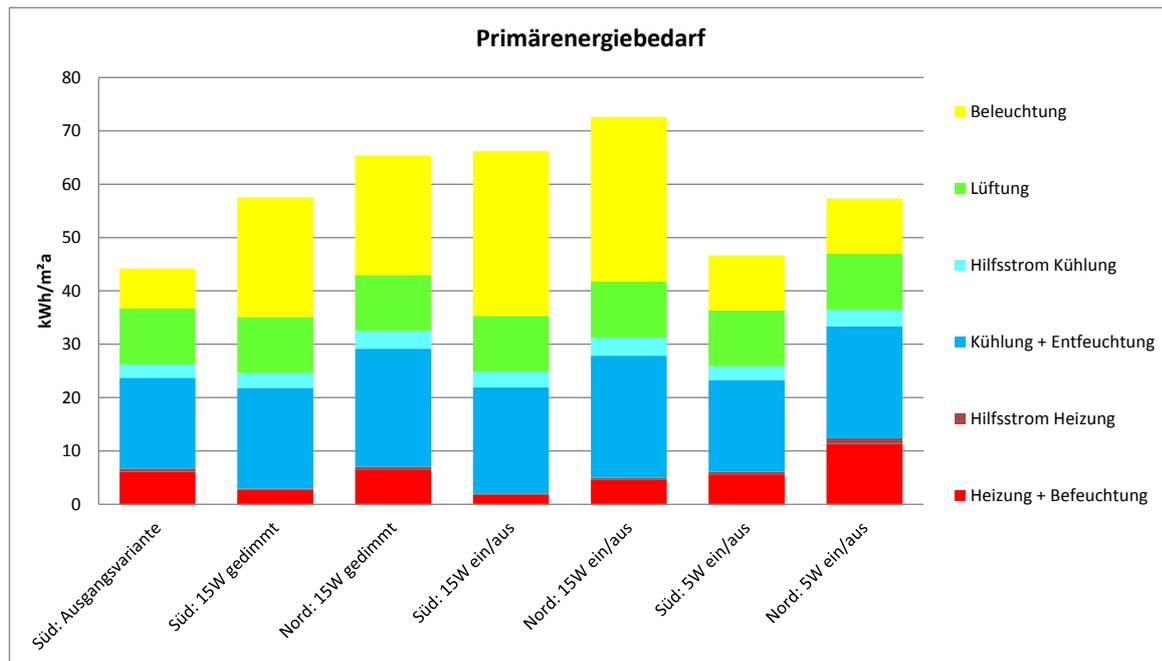
## 5.4. Ergebnisse Tageslichtversorgung und Beleuchtung

Die Varianten stellen sich wie folgt dar:

Beleuchtung Kurzbezeichnung		Installierte Leistung W/m <sup>2</sup>	Regelung -
Passivbüro_00	Büroraum	5	dimmend
	Gang	5	durchgehend ein
Var 15 W dimmbar	Büroraum	15	dimmend
	Gang	15	durchgehend ein
Var 5 W ein/aus	Büroraum	5	ein/aus
	Gang	5	durchgehend ein
Var 15 W ein/aus	Büroraum	15	ein/aus
	Gang	15	durchgehend ein

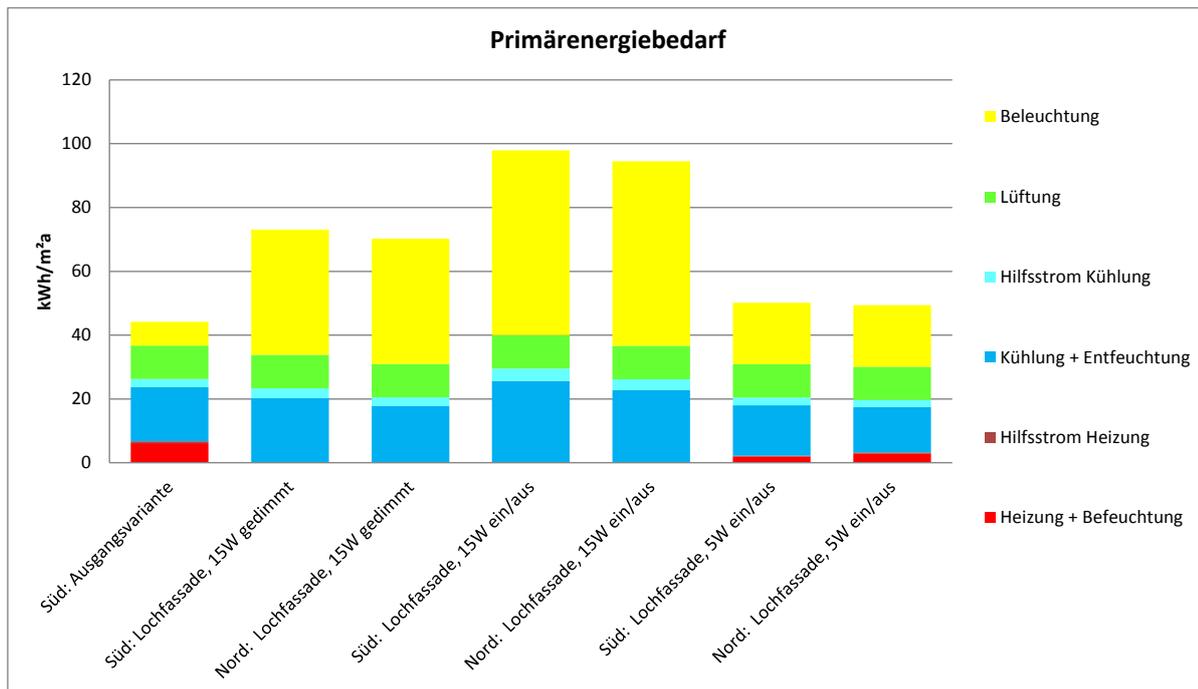
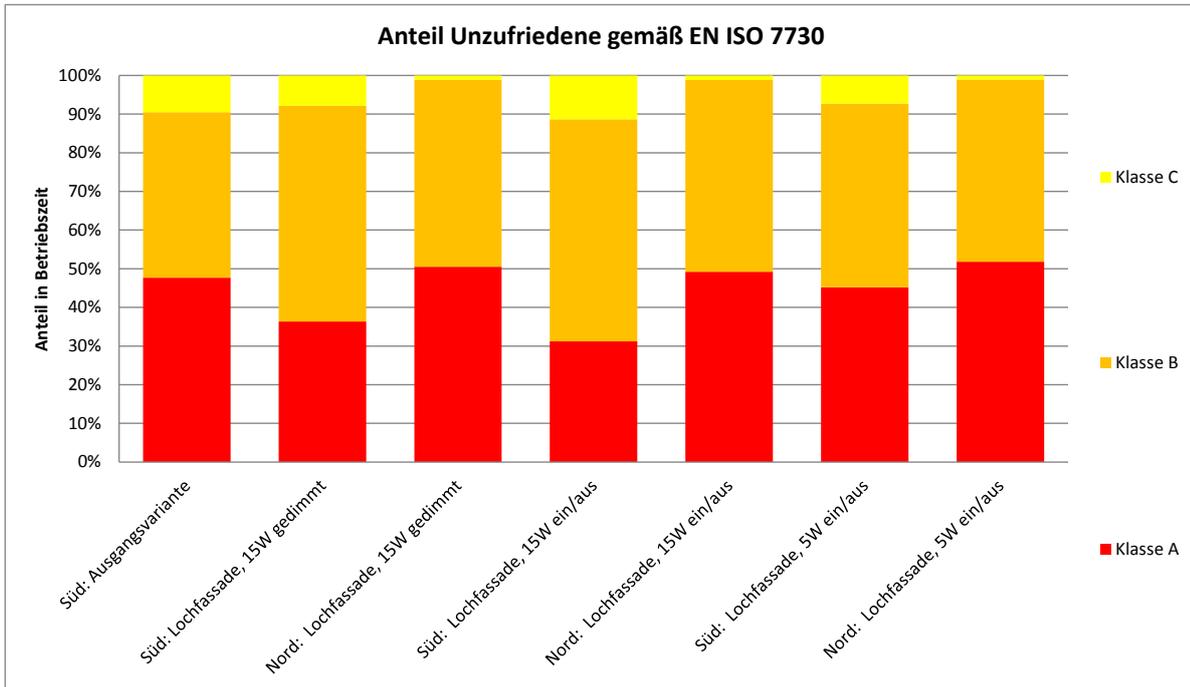
### 5.4.1. Fensterband





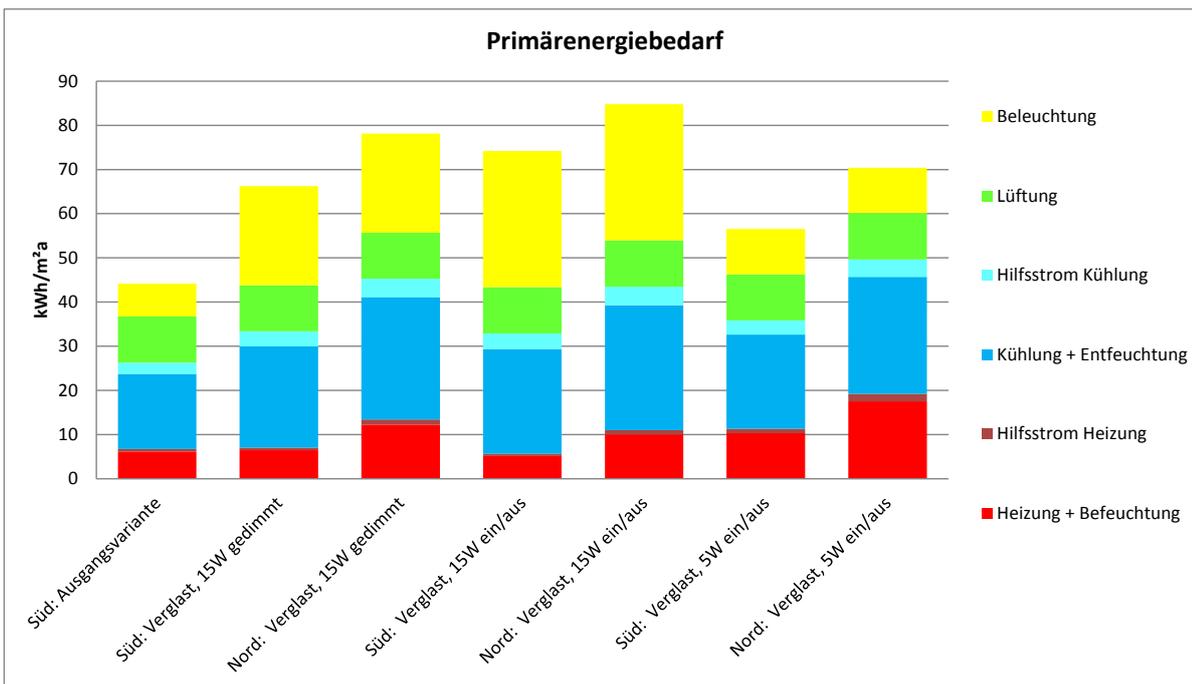
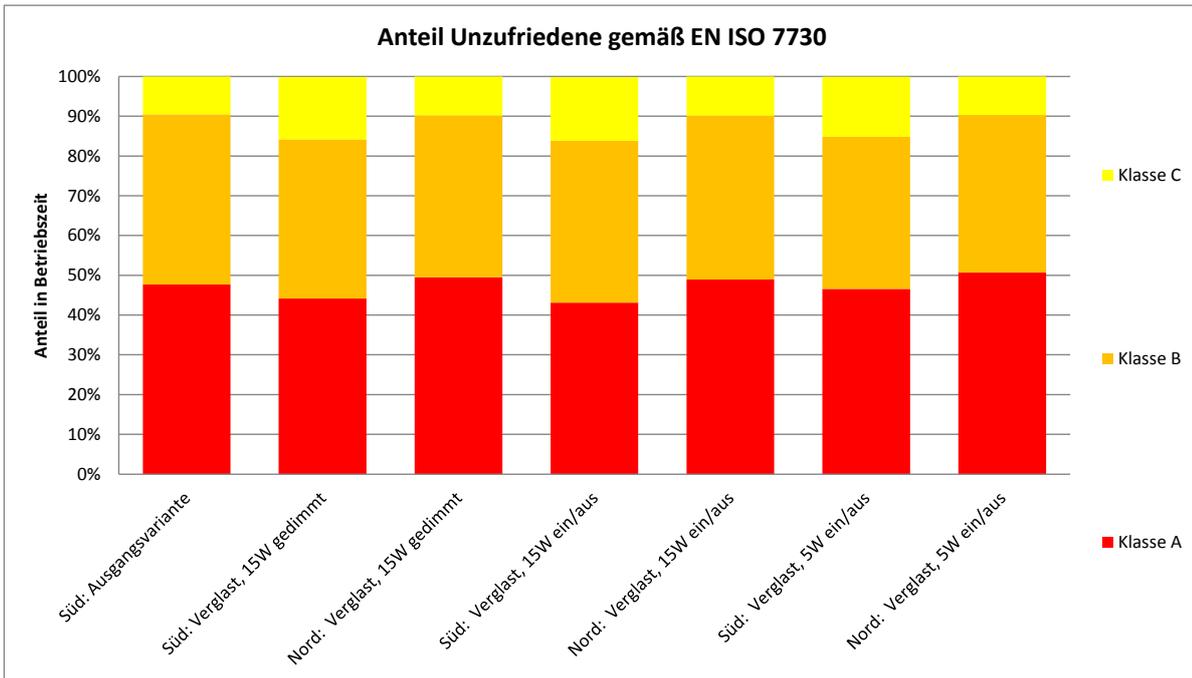
- Der Primärenergiebedarf wird vor allem durch den Strombedarf der Beleuchtung bestimmt, die Wirkung auf Kühl- und Heizwärmebedarf ist demgegenüber geringer.
- Die Varianten 15 W ein/aus sowie die Nordvariante 15 W gedimmt liegen über dem Passivhaus-Richtwert

## 5.4.2. Lochfassade



- Durch die geringen Transmissionswärmeverluste führen die Varianten mit 15 W/m<sup>2</sup> installierter Lichtleistung zu einem verschwindenden Heizwärmebedarf, der Primärenergiebedarf ist sehr hoch.

### 5.4.3. Vollverglaste Variante

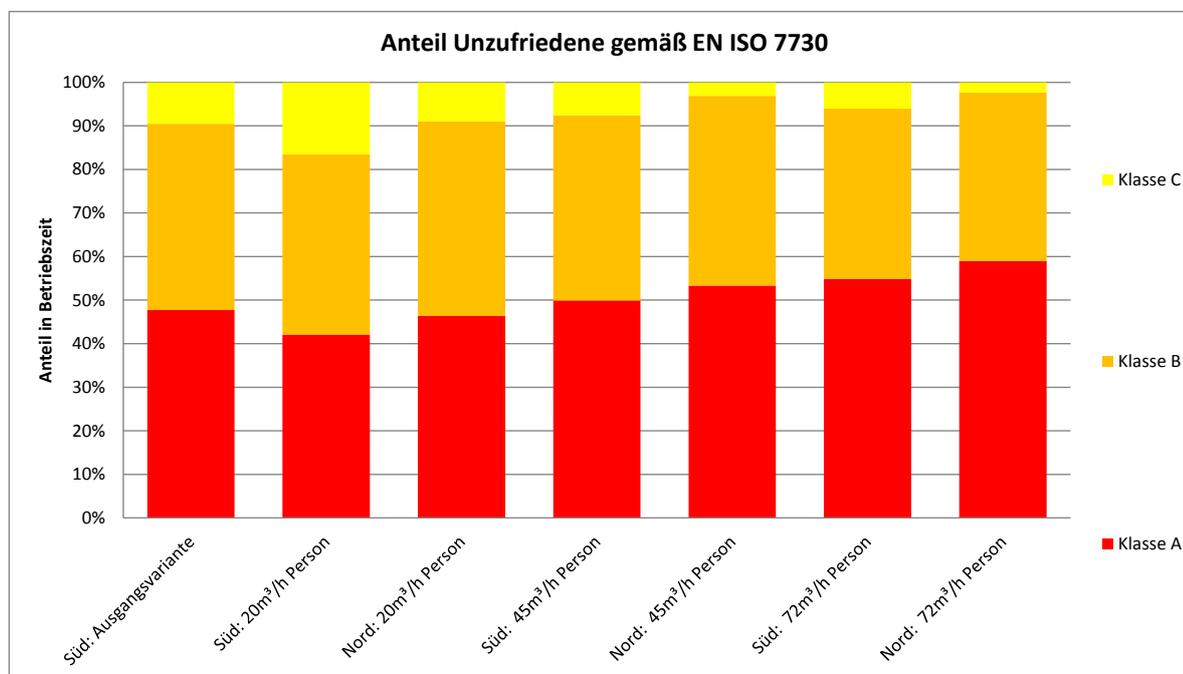


- In allen Varianten mit 15 W/m<sup>2</sup> installierter Lichtleistung und dem Nordbüro mit 5 W/m<sup>2</sup> ein/aus Lichtkonzept wird der Primärenergiekennwert von 60 kWh/m<sup>2</sup>a überschritten

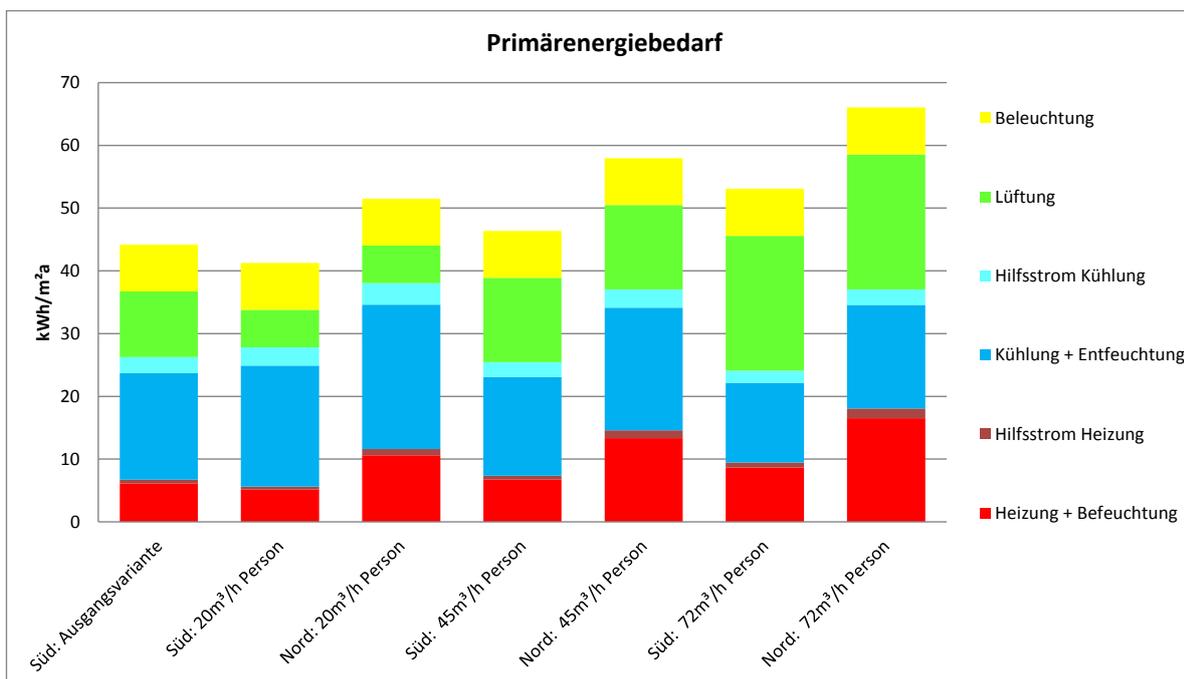
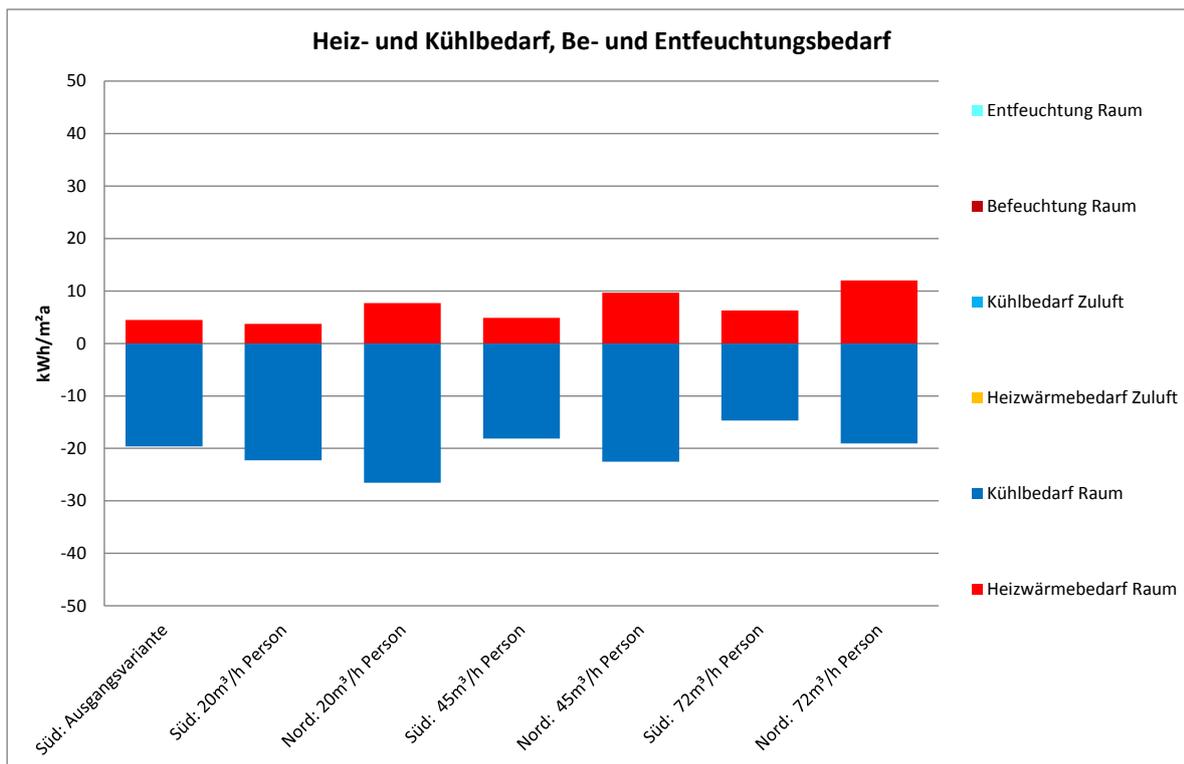
## 5.5. Ergebnisse Haustechnik

### 5.5.1. Hygienischer Luftwechsel

Luftmenge	Luftvolumenstrom spez. m <sup>3</sup> /h Person	Wärmerück- gewinnung %	Feuchterück- gewinnung %	Strombedarf spezifisch* Wh/m <sup>3</sup>
Var 20 m <sup>3</sup> /h Person	20	85	60	0.45
Passivbüro_00	35	85	60	0.45
Var 45 m <sup>3</sup> /h Person	45	85	60	0.45
Var 72 m <sup>3</sup> /h Person	72	85	60	0.45

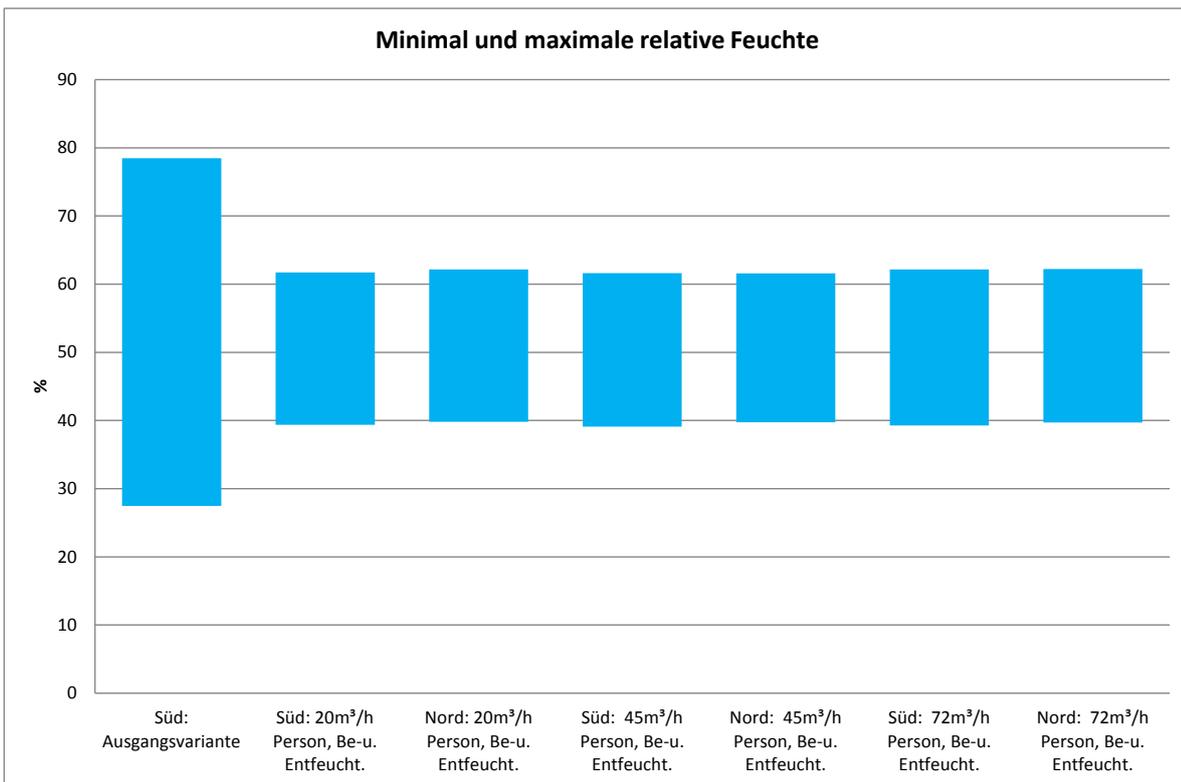
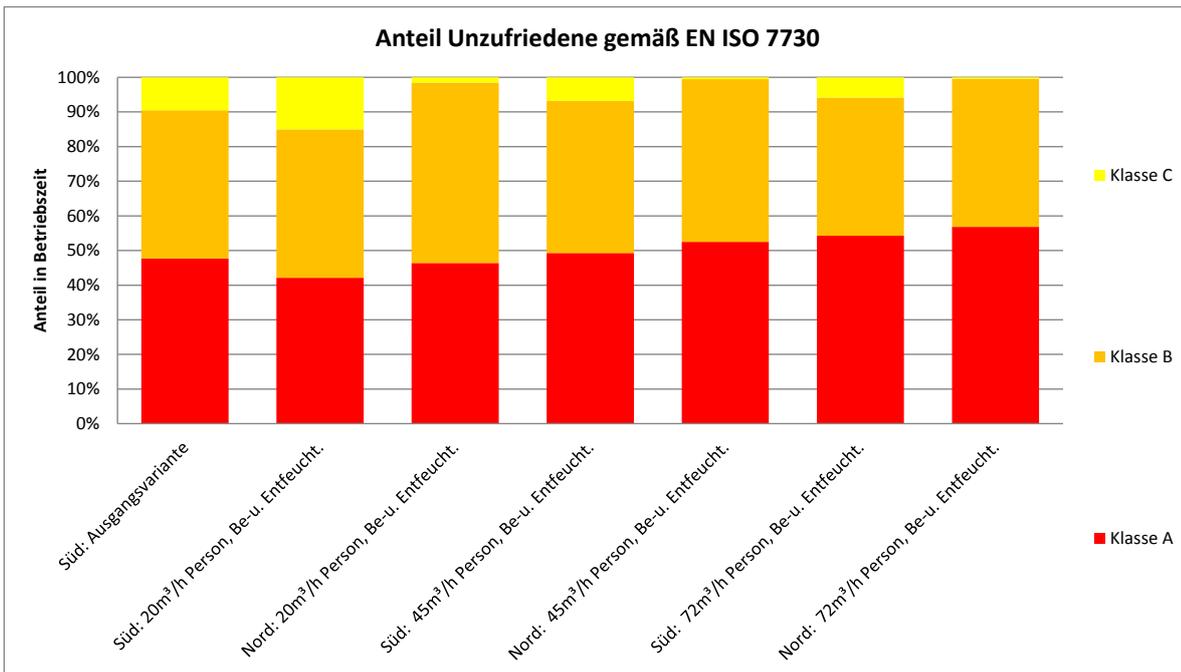


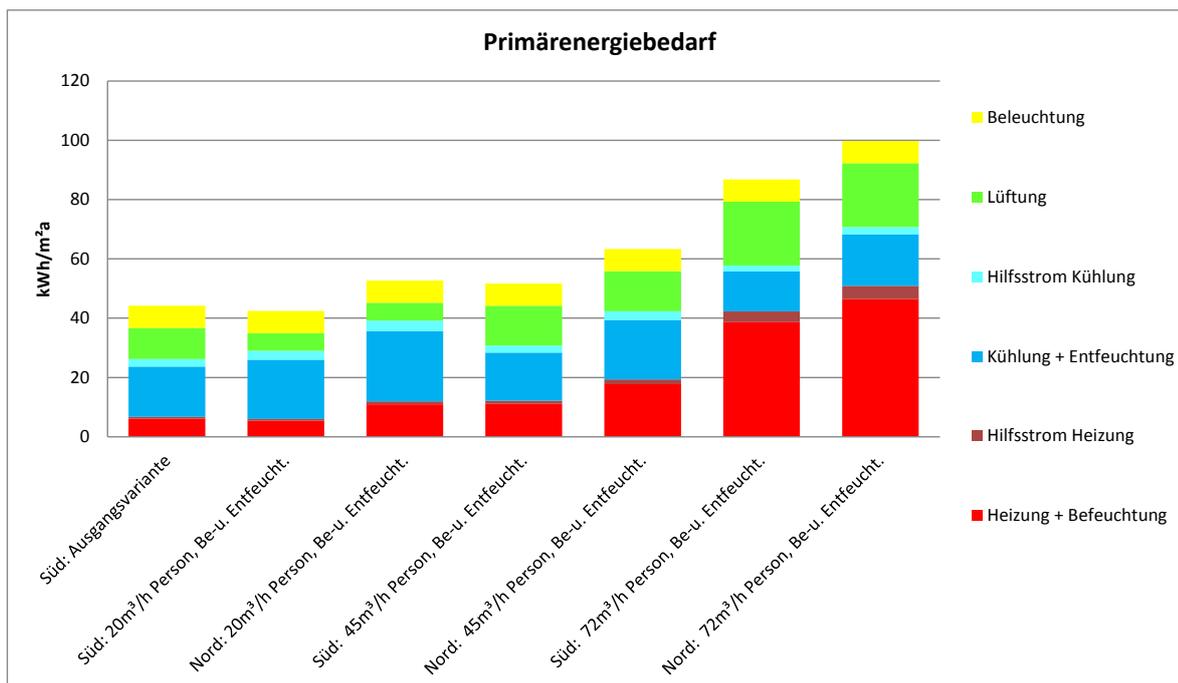
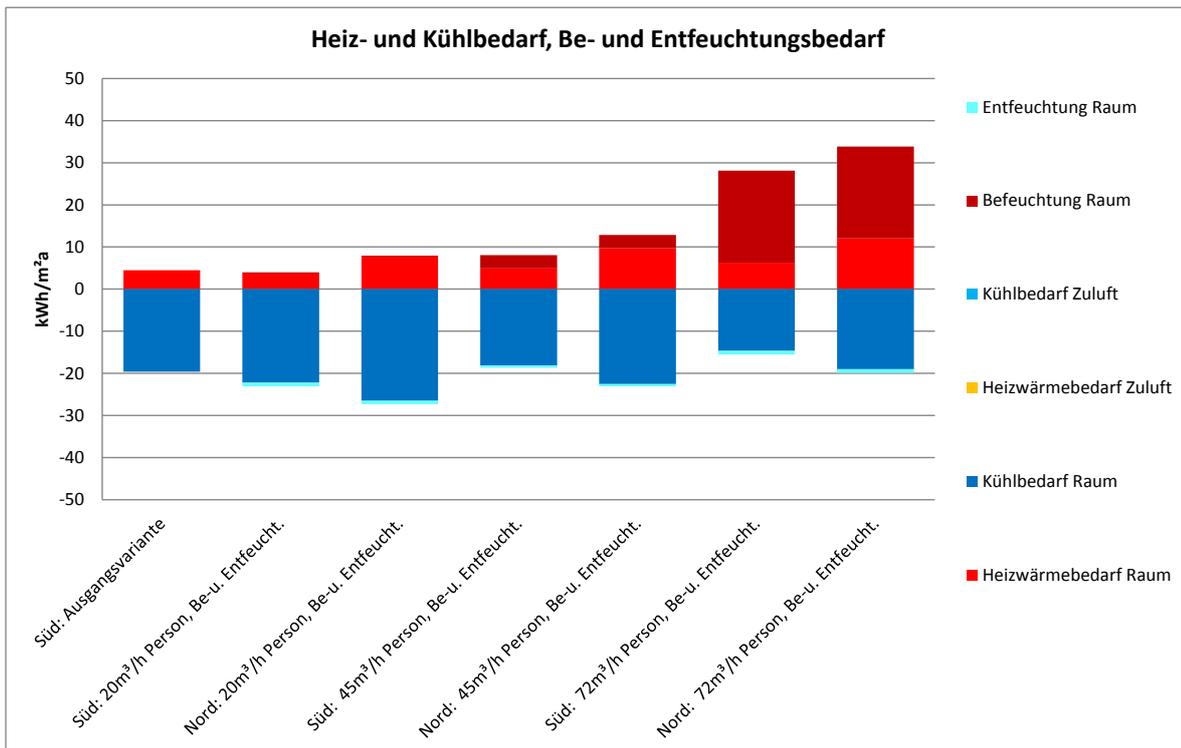
- Ein hoher Grad an Behaglichkeit kann in allen Varianten sichergestellt werden.
- Mit einem höheren Luftwechsel kann die Behaglichkeit leicht angehoben werden.



- Von der Variante Büroraum Nord mit 72 m³/h Person abgesehen, können alle Varianten den Primärenergierichtgrenzwert einhalten.
- Der höhere Luftwechsel wirkt sich negativ vor allem auf den Heizwärmebedarf und den Strombedarf für die Lüftungsanlage aus. Zu beachten ist zudem, dass ein hoher Volumenstrom pro Person meist auch deutlich schwieriger mit niedrigen spezifischen Stromverbräuchen in Einklang gebracht werden kann.

Mit einer aktiven Be- und Entfeuchtung ergeben sich die folgenden Kennwerte:

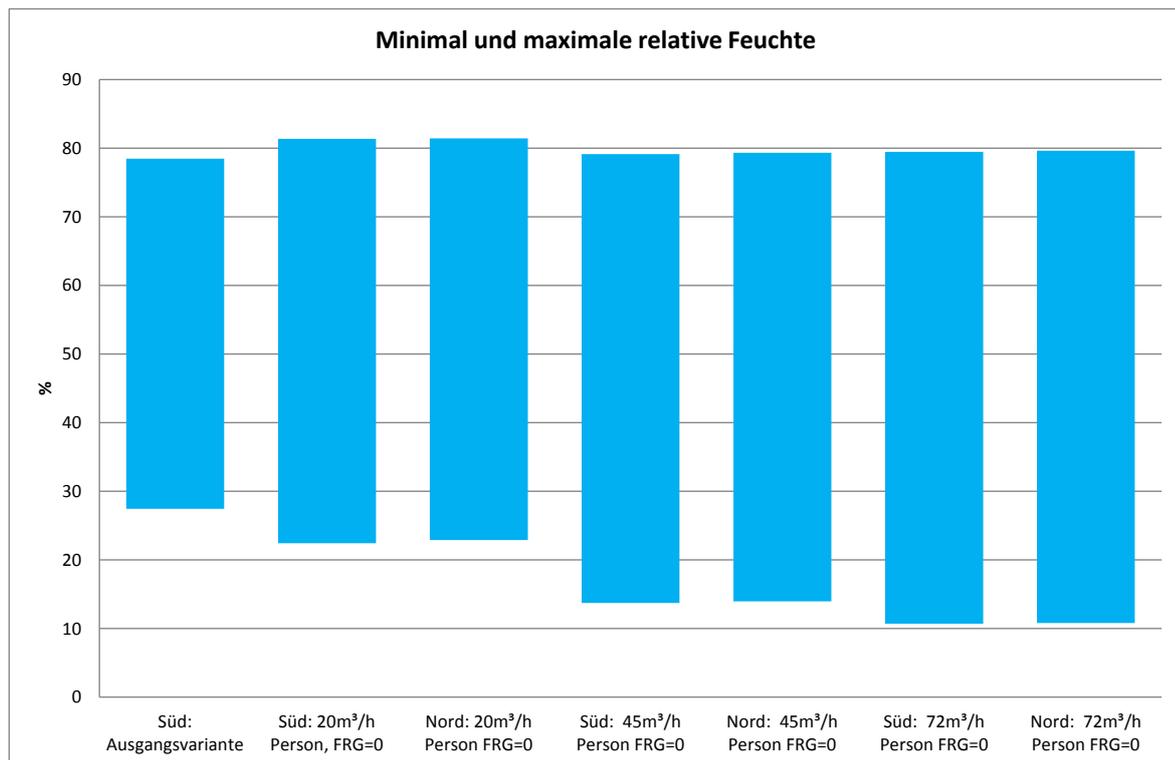




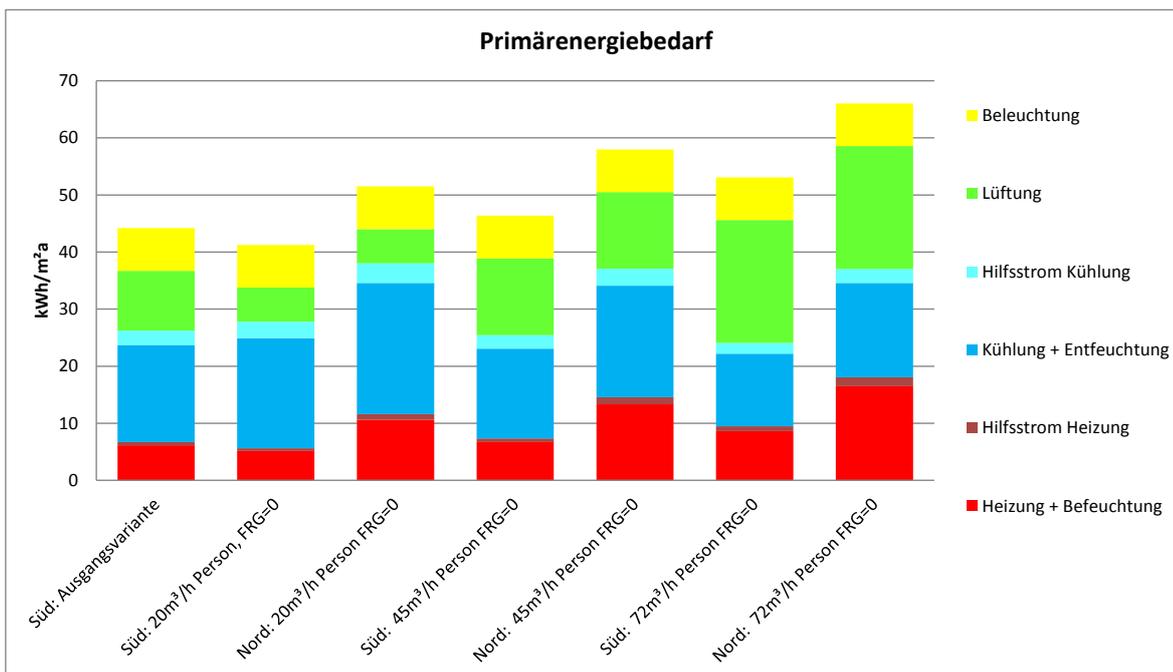
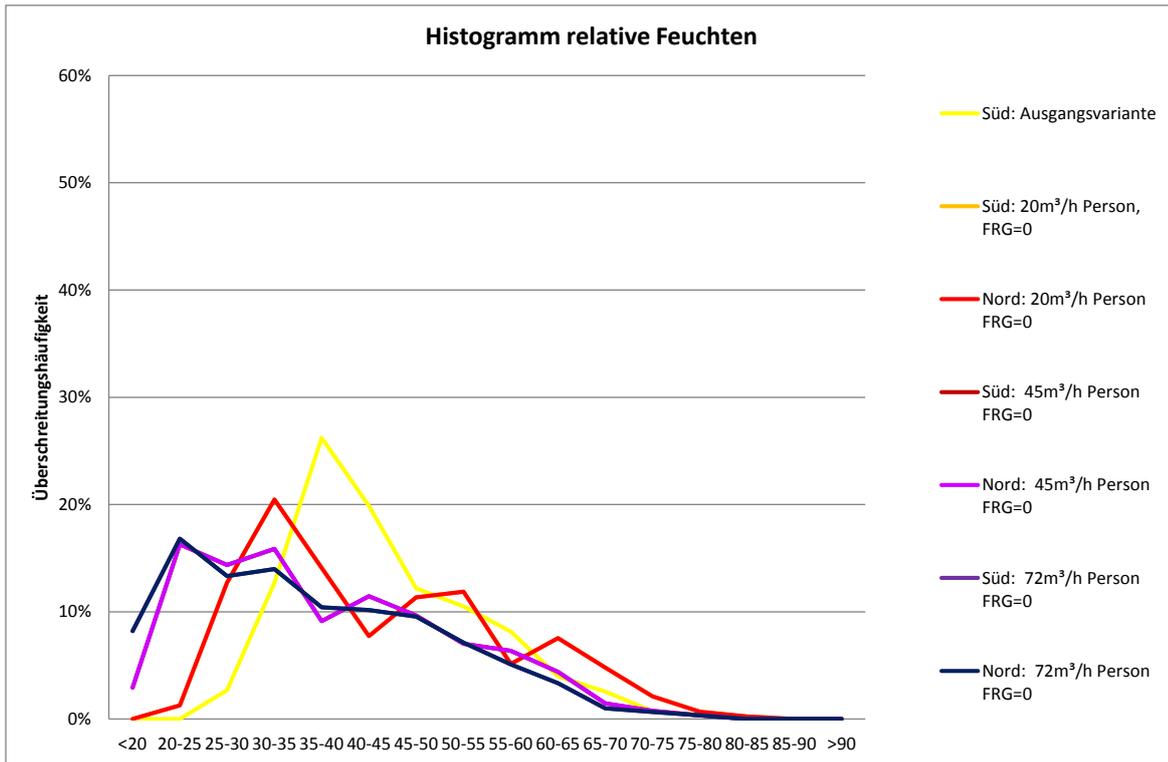
- Die relativen Feuchten liegen durch die aktive Feuchteconditionierung in einem sehr behaglichen Bereich.
- Der latente Energiebedarf fällt vor allem für die Befeuchtung im Winter sehr hoch aus. Für seine Optimierung ist eine bedarfsgerechte Lüftung von hoher Wichtigkeit.
- Ab 45 m³/h Luftwechsel pro Person kann der Passivhaus-Richtwert nicht mehr eingehalten werden.

## 5.5.2. Feuchterückgewinnung

Luftmenge	Luftvolumenstrom spez. m <sup>3</sup> /h Person	Wärmerück- gewinnung %	Feuchterück- gewinnung %	Strombedarf spezifisch* Wh/m <sup>3</sup>
<b>Feuchterückgewinnung</b>				
FRG = 0 %	35	85	0	0.45

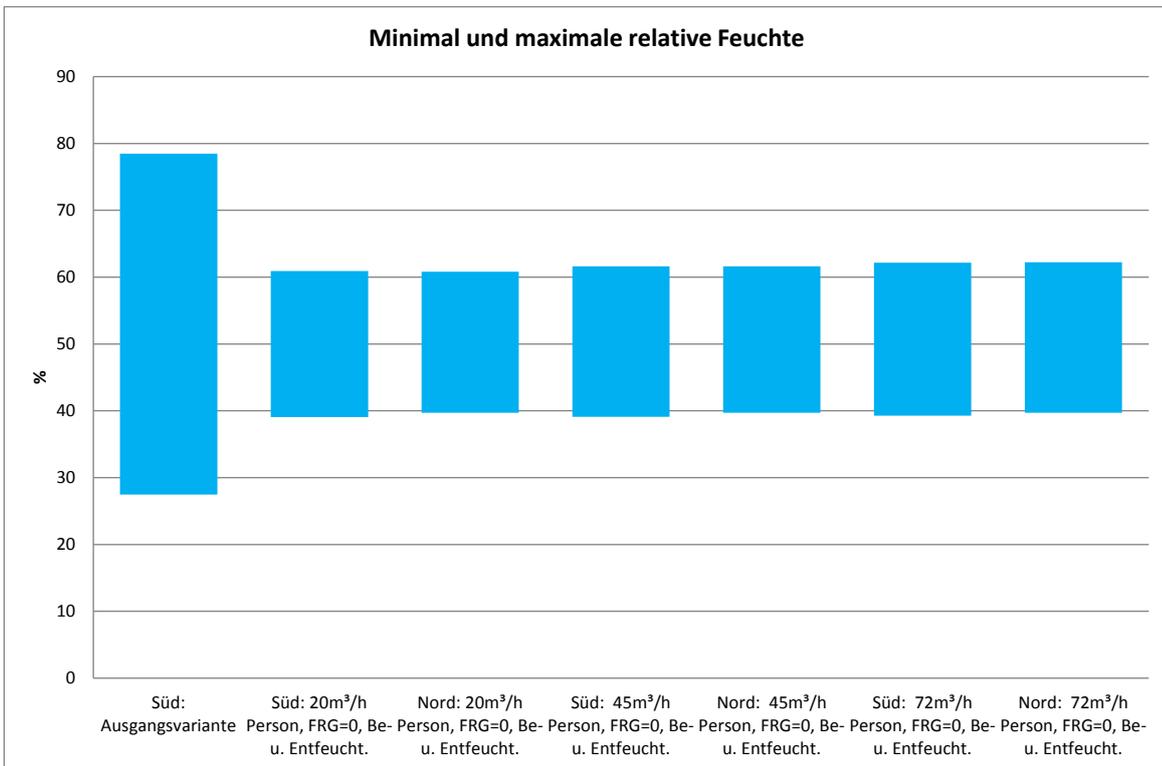
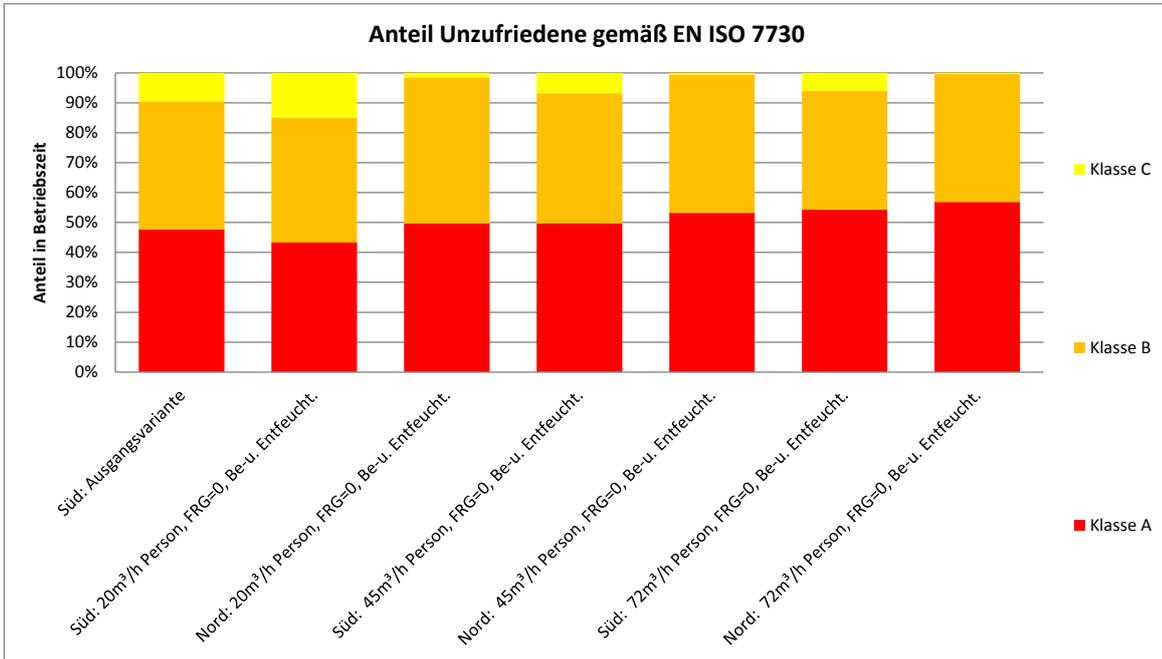


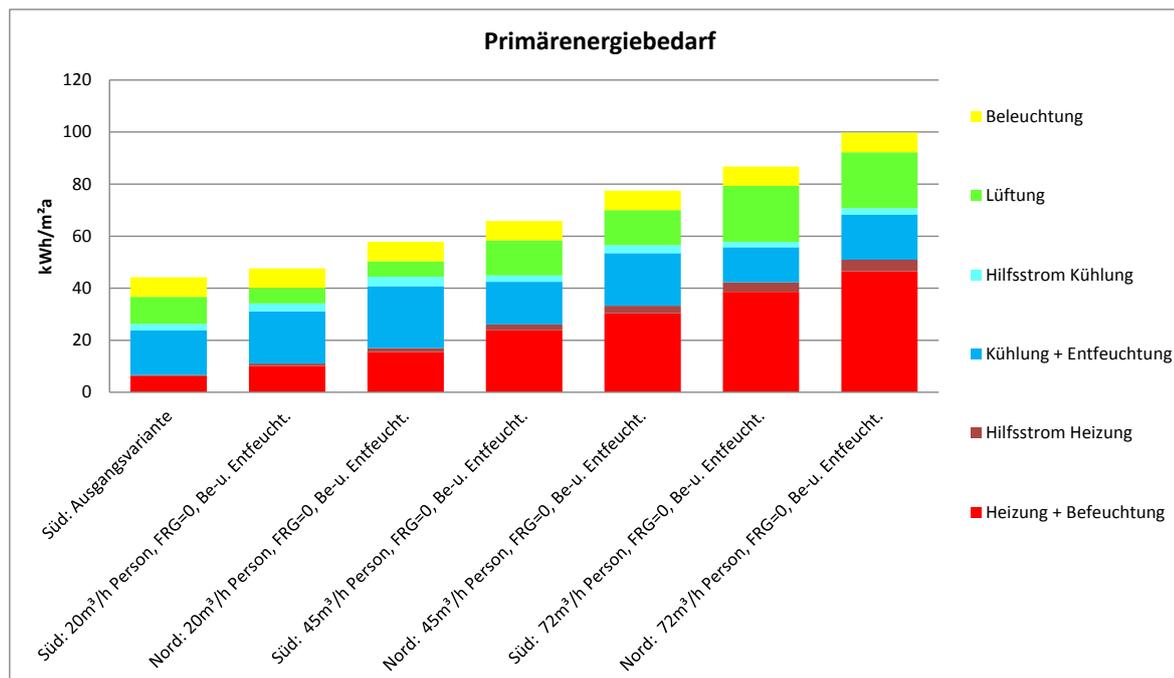
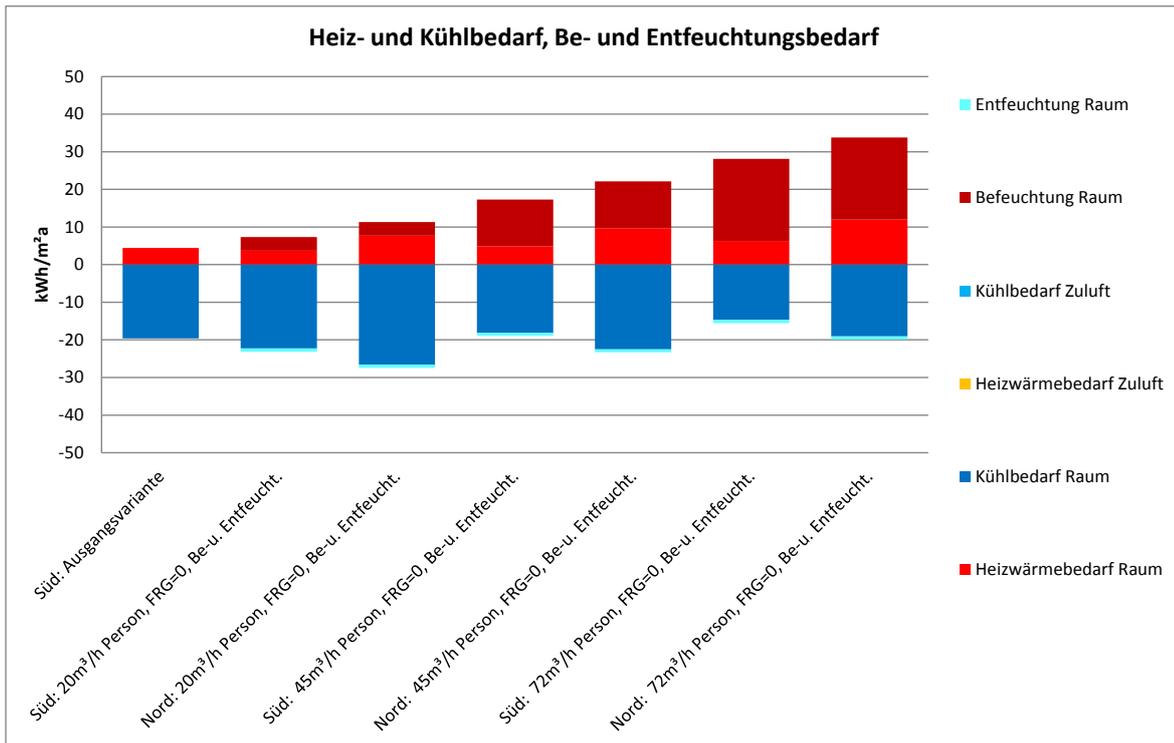
- Trotz Pflanzen im Büro sinken die relativen Feuchten im Winter stark ab.
- Nur durch eine deutliche Reduzierung des personenbezogenen Volumenstroms werden 20 % Raumluftfeuchte nicht unterschritten.



- Hohe Luftwechsel verschieben die auftretenden relativen Feuchten drastisch zu Kennwerten deutlich unter 30 % relativer Feuchte.

Mit einer aktiven Be- und Entfeuchtung ergeben sich die folgenden Kennwerte:

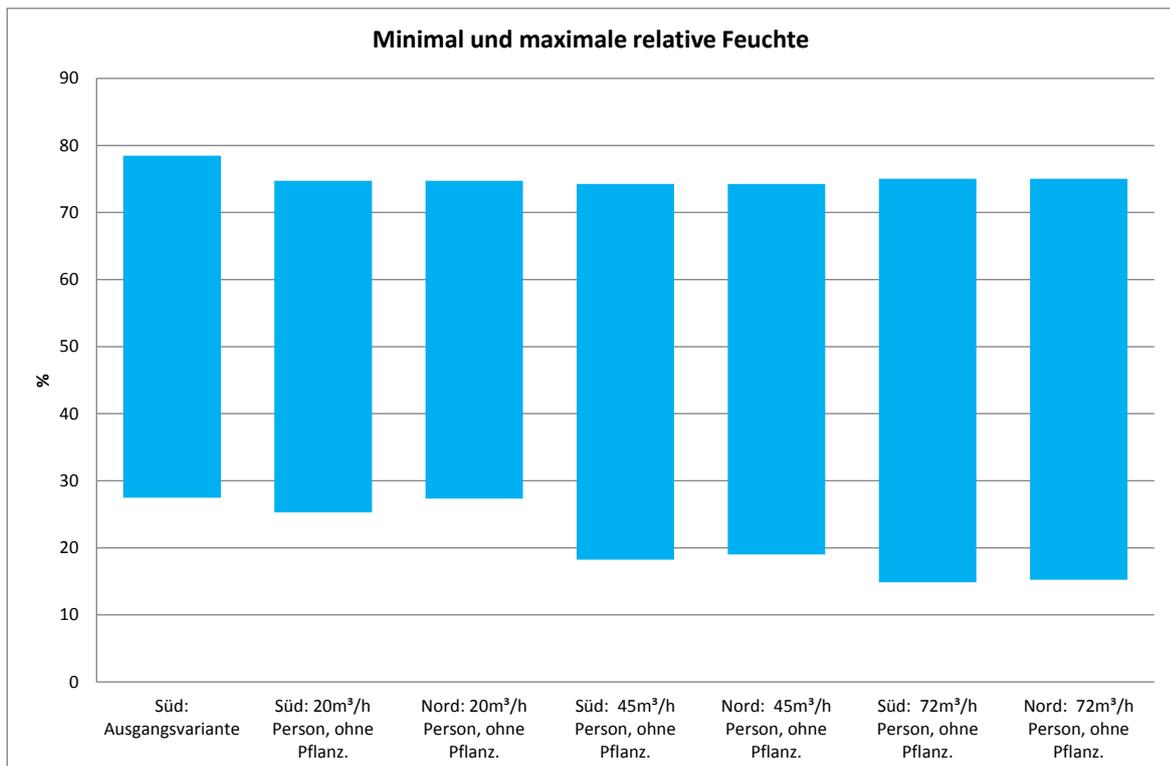
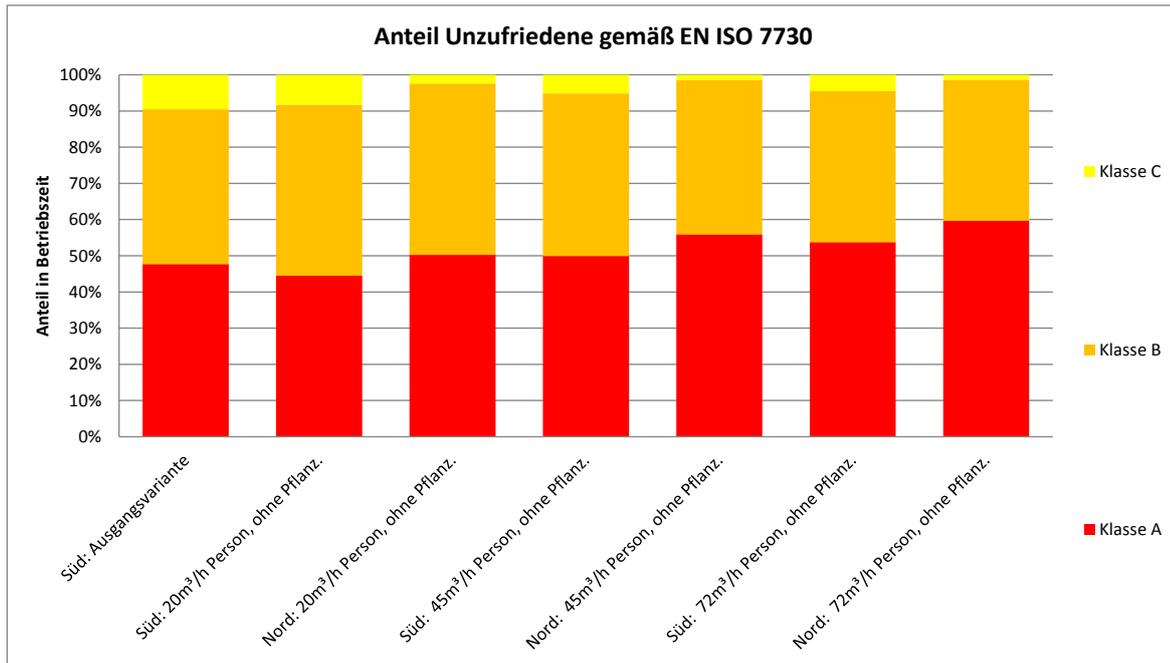


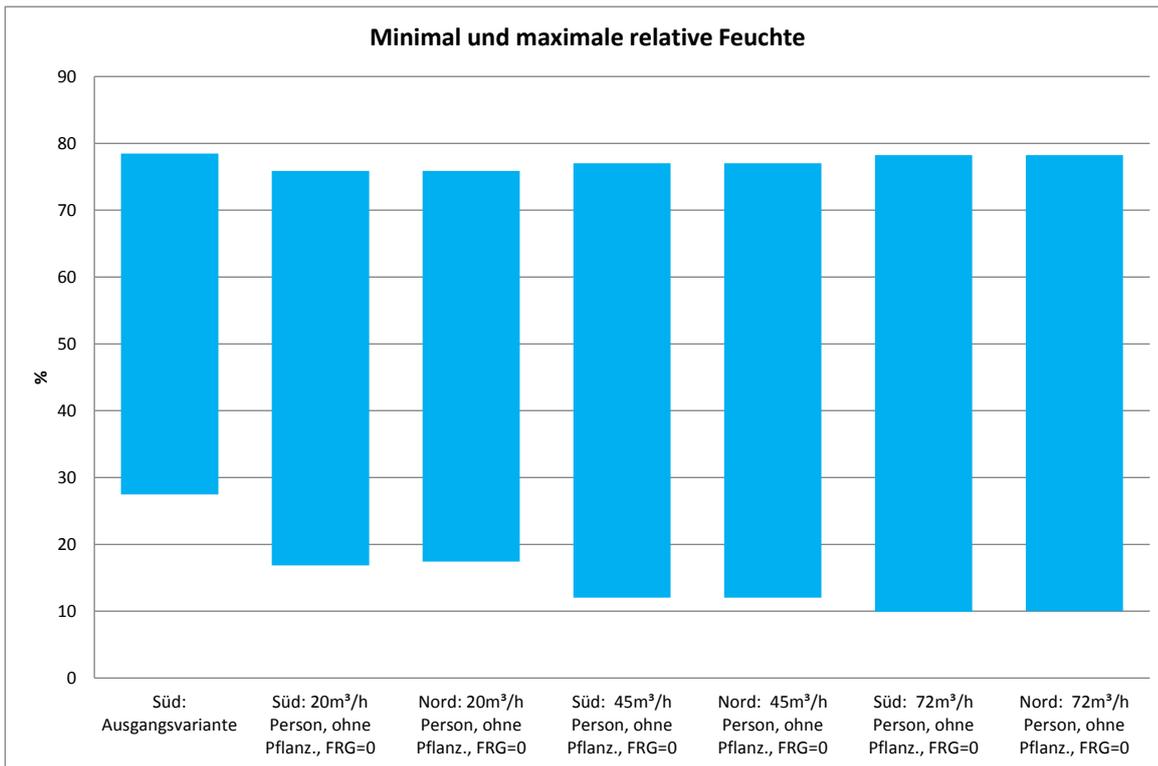


- Die relativen Feuchten liegen durch die aktive Feuchteconditionierung in einem sehr behaglichen Bereich von 40 bis 60 % Feuchte.
- Der Entfeuchtungsaufwand ist am untersuchten Standort gering, der Befeuchtungsaufwand ist dagegen relativ hoch.
- Ab 45 m³/h Person kann der Passivhaus-Richtwert nicht mehr eingehalten werden.

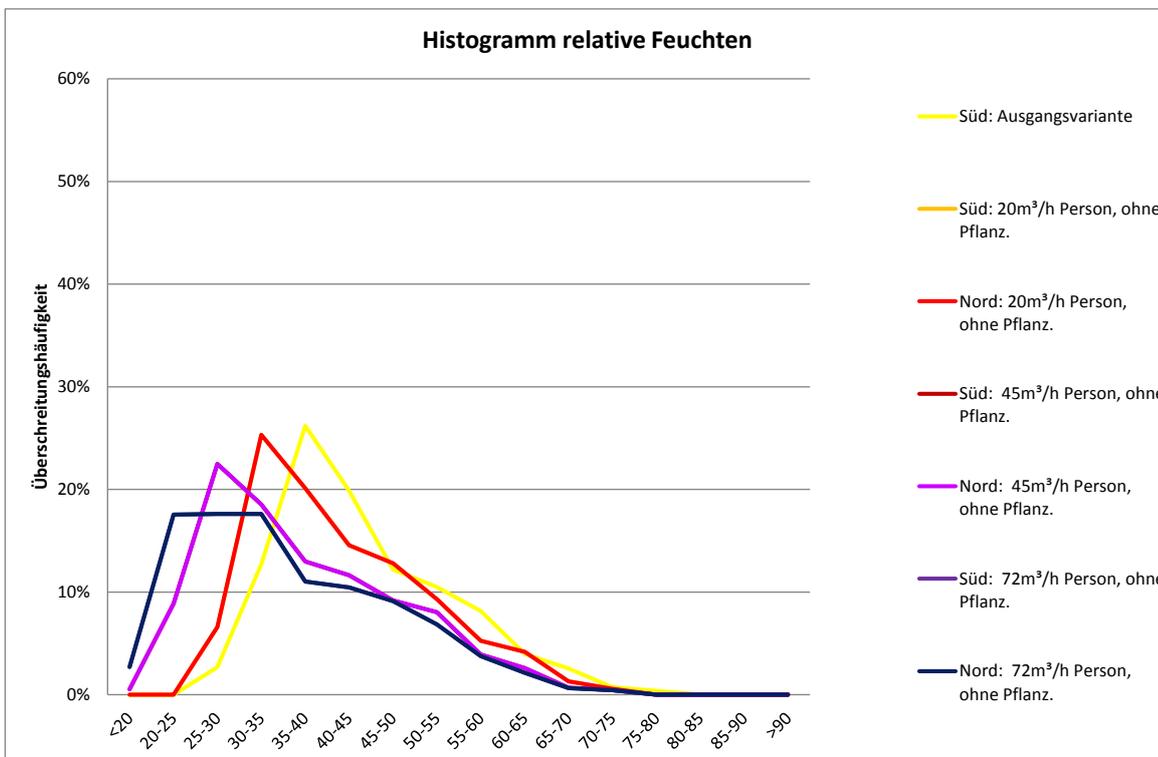
### 5.5.3. Feuchtequellen Pflanzen

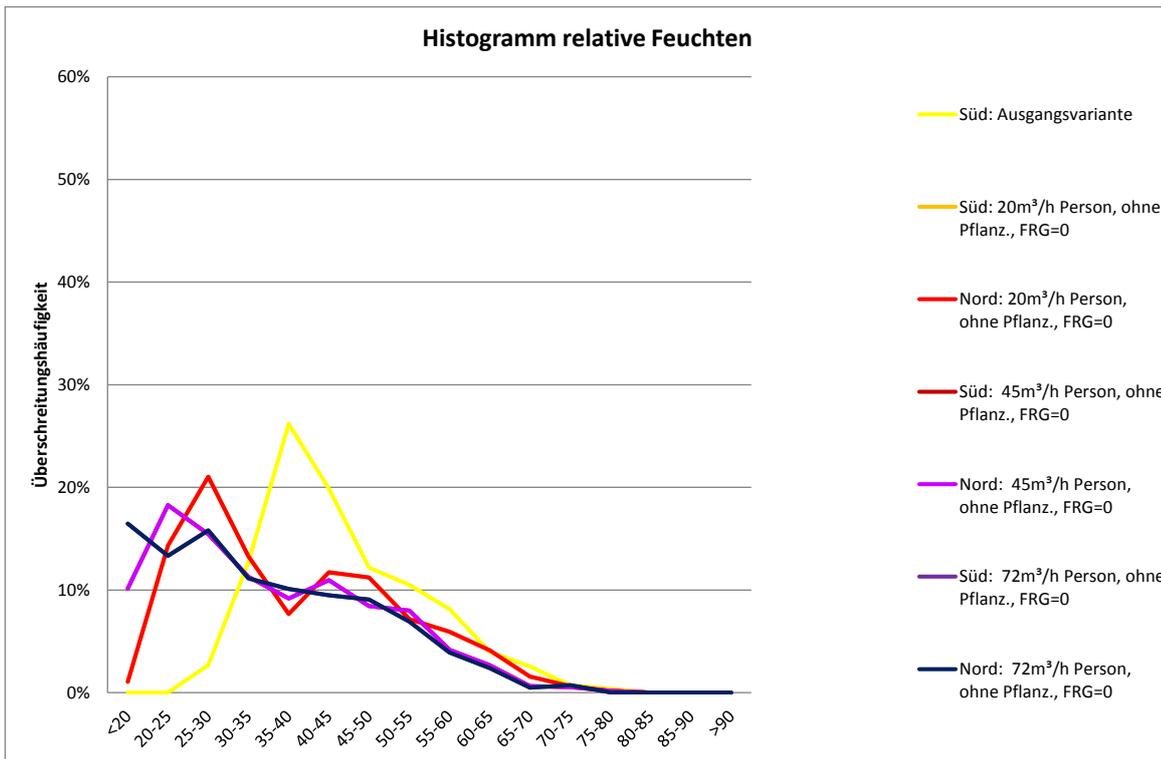
Feuchtequellen	Feuchtequellen g/h	Wärmerück- gewinnung %	Feuchterück- gewinnung %	Strombedarf spezifisch* Wh/m <sup>3</sup>
Passivbüro_00	50 g/h durch Pflanzen	85	60	0.45
Variante	Keine Pflanzen	85	60	0.45
Variante	Keine Pflanzen	85	0	0.45



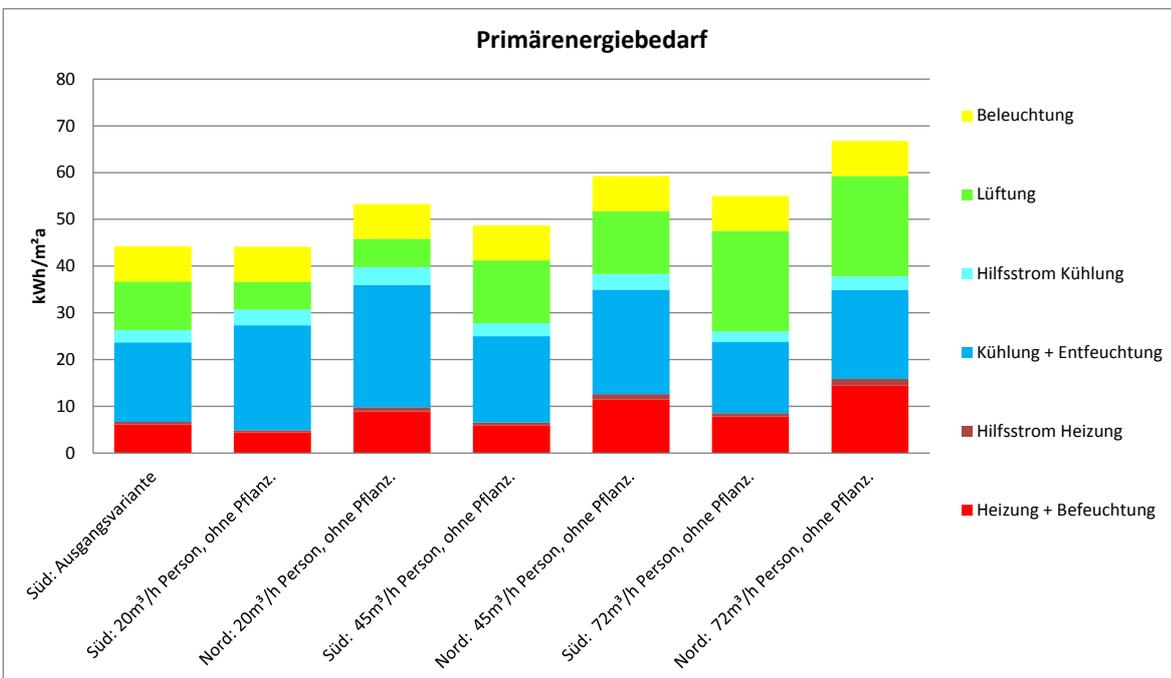


- Die relativen Feuchte sinken im Winter stark ab.

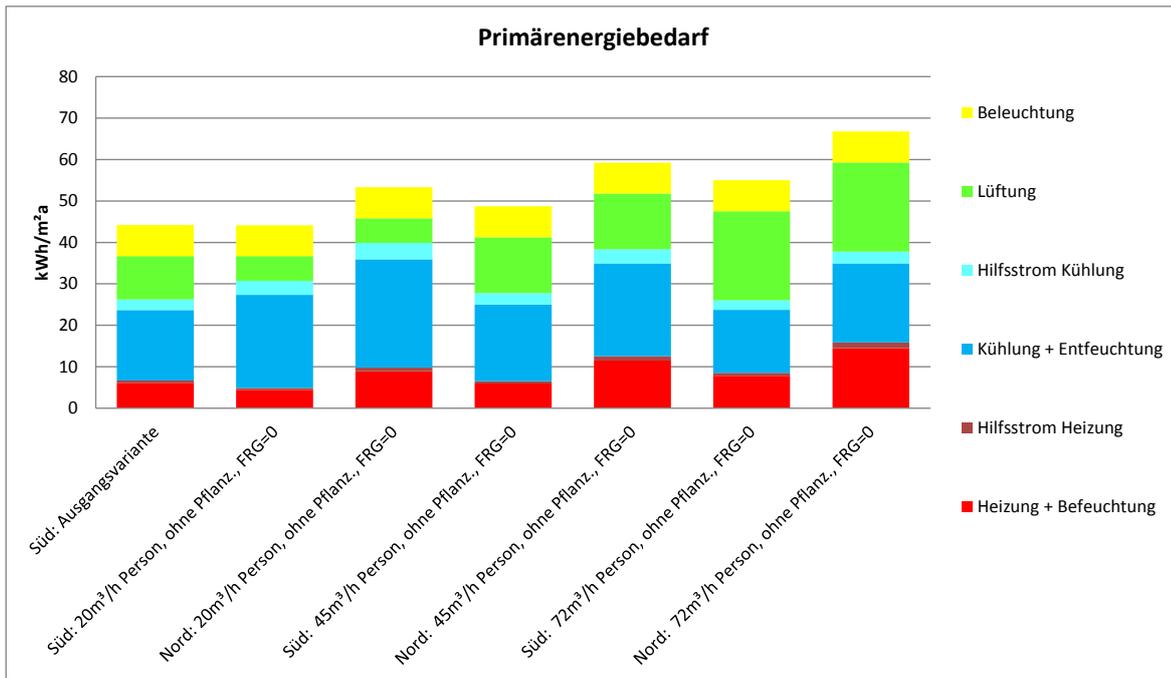




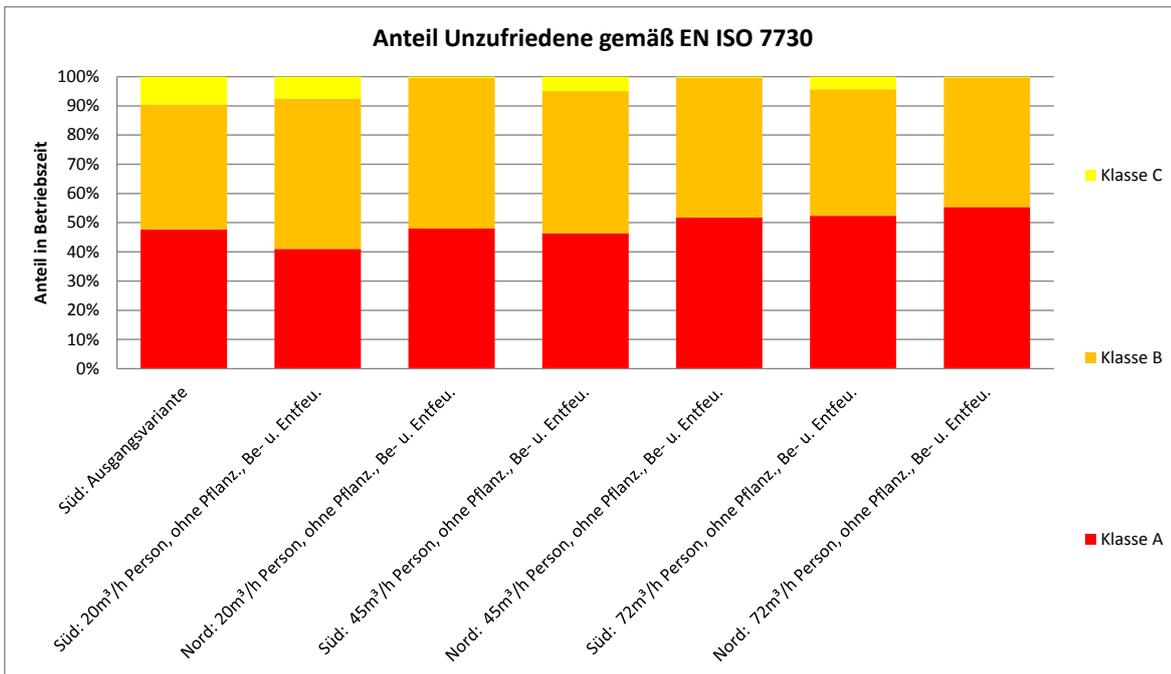
- Die relativen Feuchten verschieben sich stark zu niedrigeren Werten.

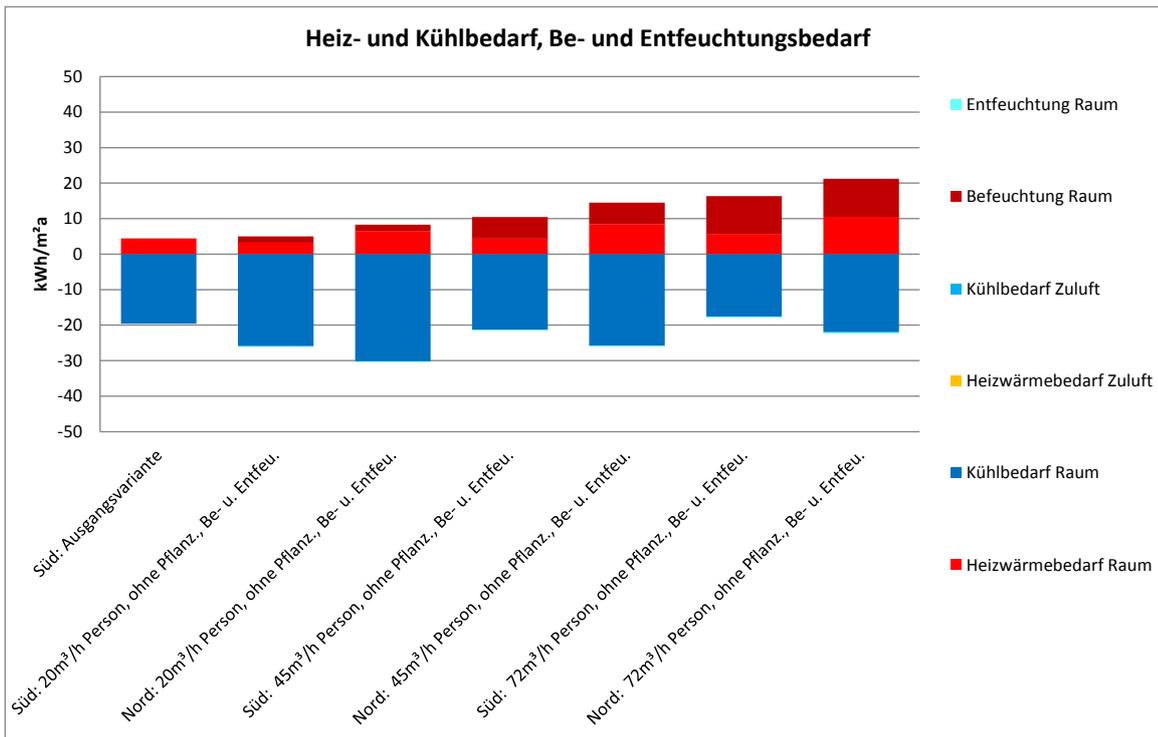
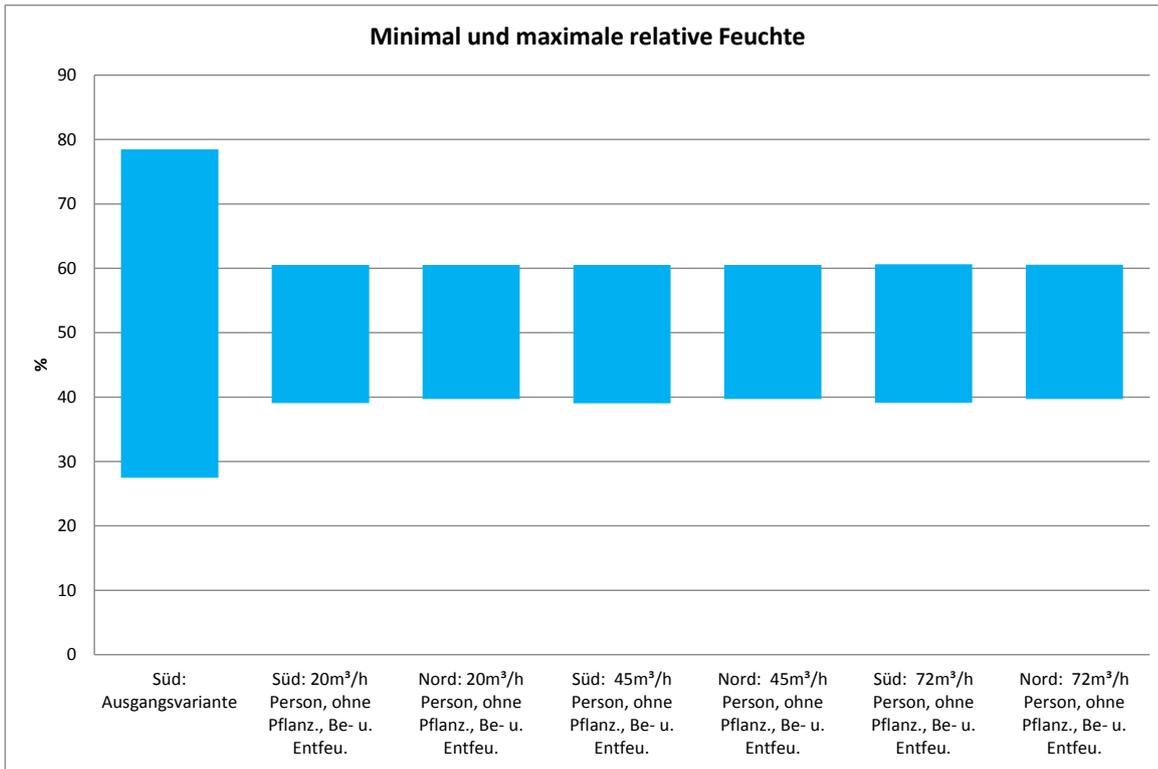


- Der Passivhaus-Richtwert kann fast durchgehend eingehalten werden.
- Eine Ausnahme bildet das Nordbüro mit hochwertiger Frischluft-Versorgung ( $72 \text{ m}^3/\text{h Person}$ ).

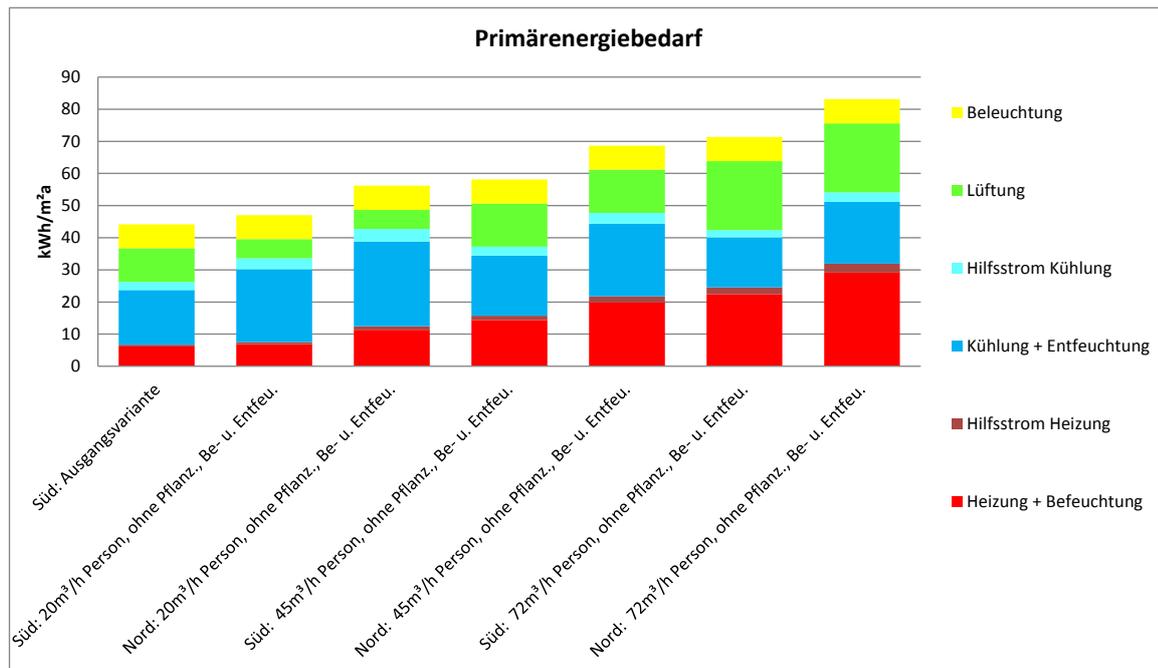


Mit einer aktiven Be- und Entfeuchtung ergeben sich die folgenden Kennwerte:





- Der Entfeuchtungsbedarf ist gering, der Befeuchtungsaufwand liegt in derselben Größenordnung wie der Heizwärmebedarf im Fall von höheren Luftwechseln.

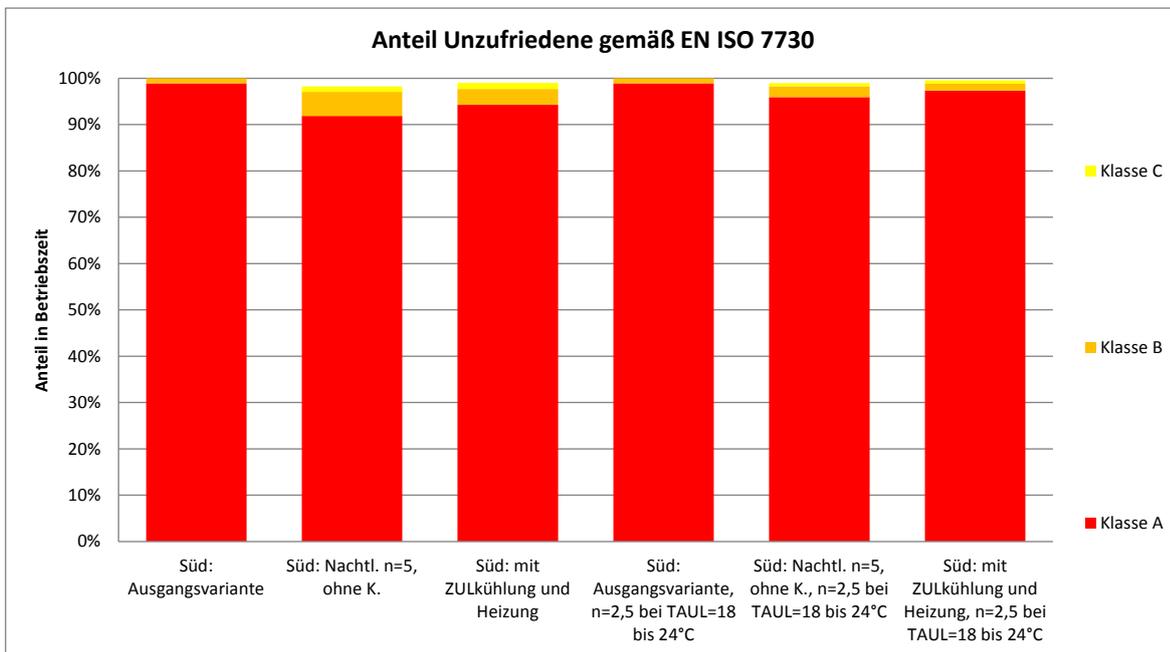


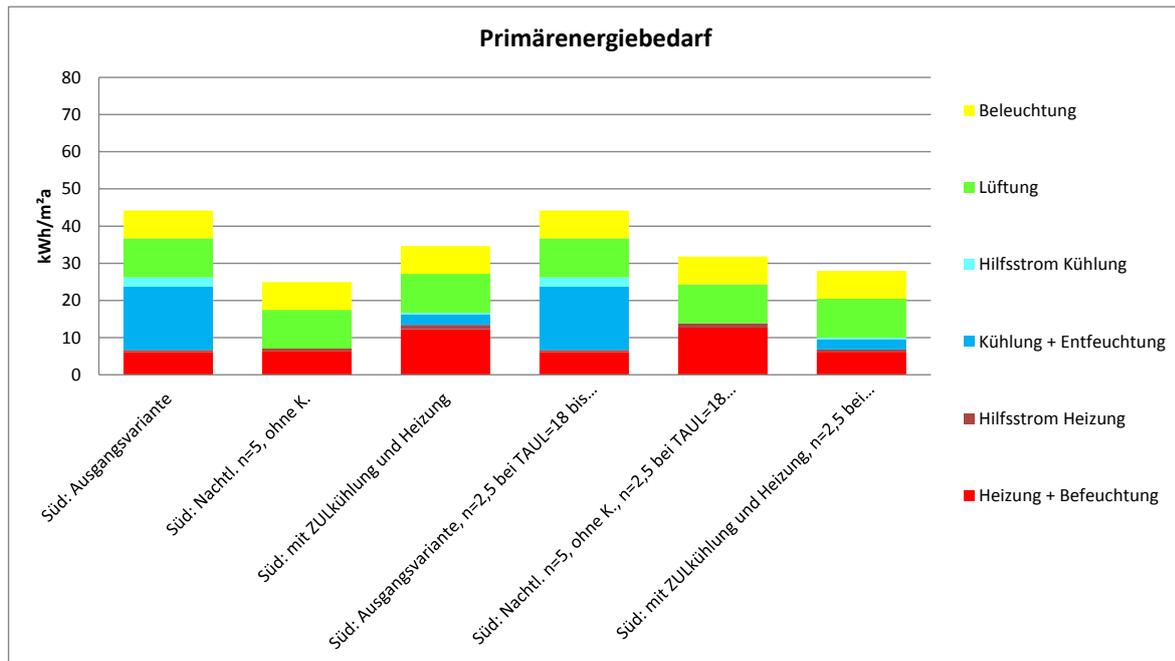
- Die relativen Feuchten liegen durch die aktive Feuchteconditionierung in einem sehr behaglichen Bereich.
- Ab einem Luftwechsel von 45 m³/h Person, Nordbüro, kann der Passivhaus-Richtwert nicht mehr eingehalten werden.

### 5.5.4. Natürliche Kühlung

Die folgenden Varianten wurden alle mit einem möglichst minimalen Bekleidungsgrad von 0.25 clo berechnet.

Sollwerte Raumlufttemperaturen*	Mindestwert °C	Maximalwert °C
Passivhausbüro_00 mit aktiver Kühlung	21	25
Variante mit Fensternachtlüftung, ohne aktive Kühlung	21	frei schwingend
Variante mit Fensternachtlüftung und Zuluftkühlung	21	frei schwingend
Ausgangsvariante mit zusätzlicher Fensterlüftung tagsüber (wenn die Außenlufttemperatur zw. 18 und 24 °C liegt)	21	frei schwingend
Variante mit Fensternachtlüftung, ohne aktive Kühlung, mit zusätzlicher Fensterlüftung tagsüber (wenn die Außenlufttemperatur zw. 18 und 24 °C liegt)	21	frei schwingend
Variante mit Fensternachtlüftung und Zuluftkühlung, mit zusätzlicher Fensterlüftung tagsüber (wenn die Außenlufttemperatur zw. 18 und 24 °C liegt)	21	frei schwingend

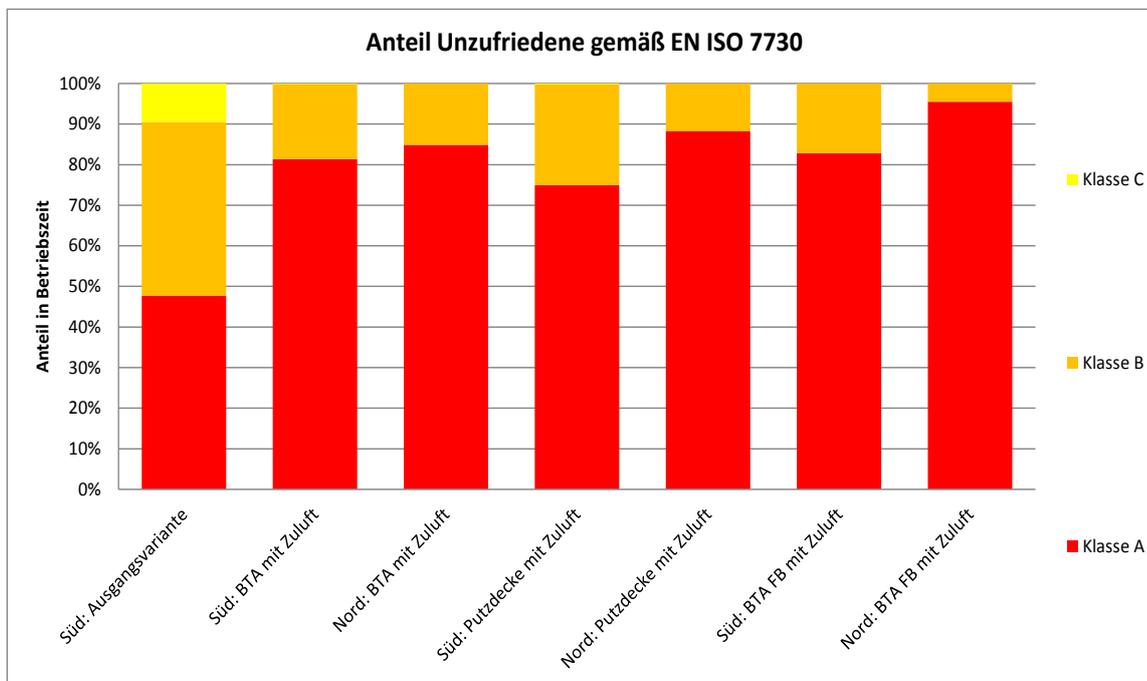




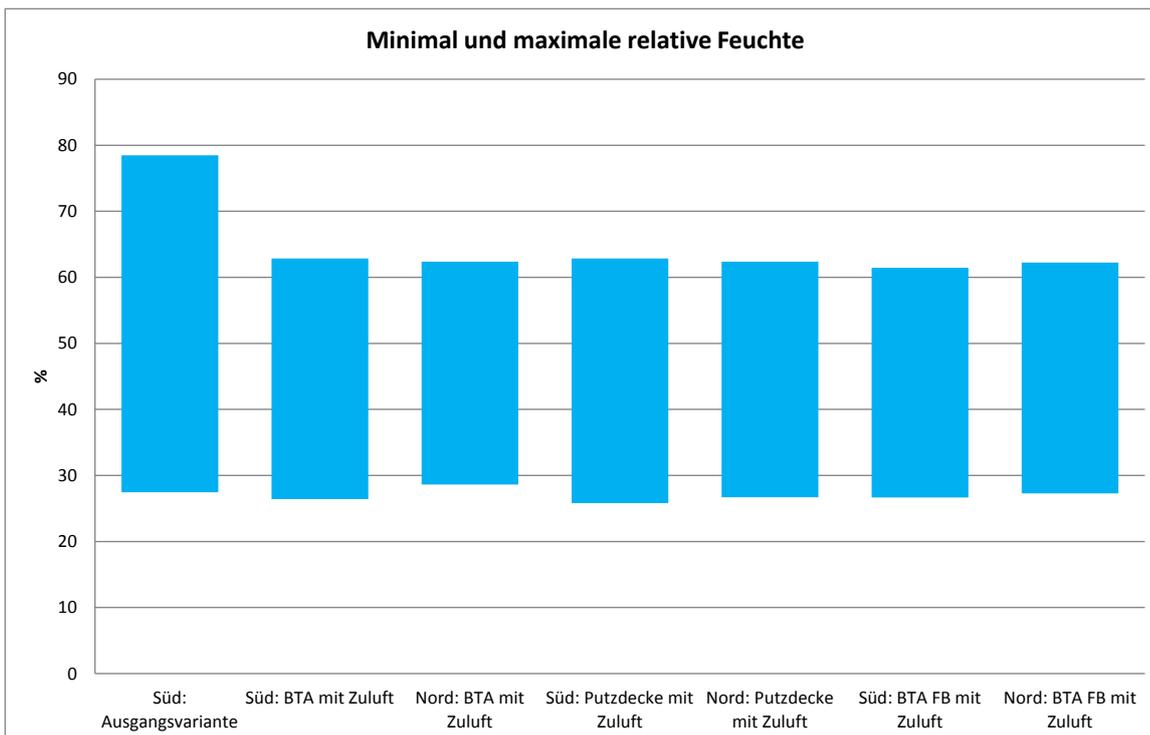
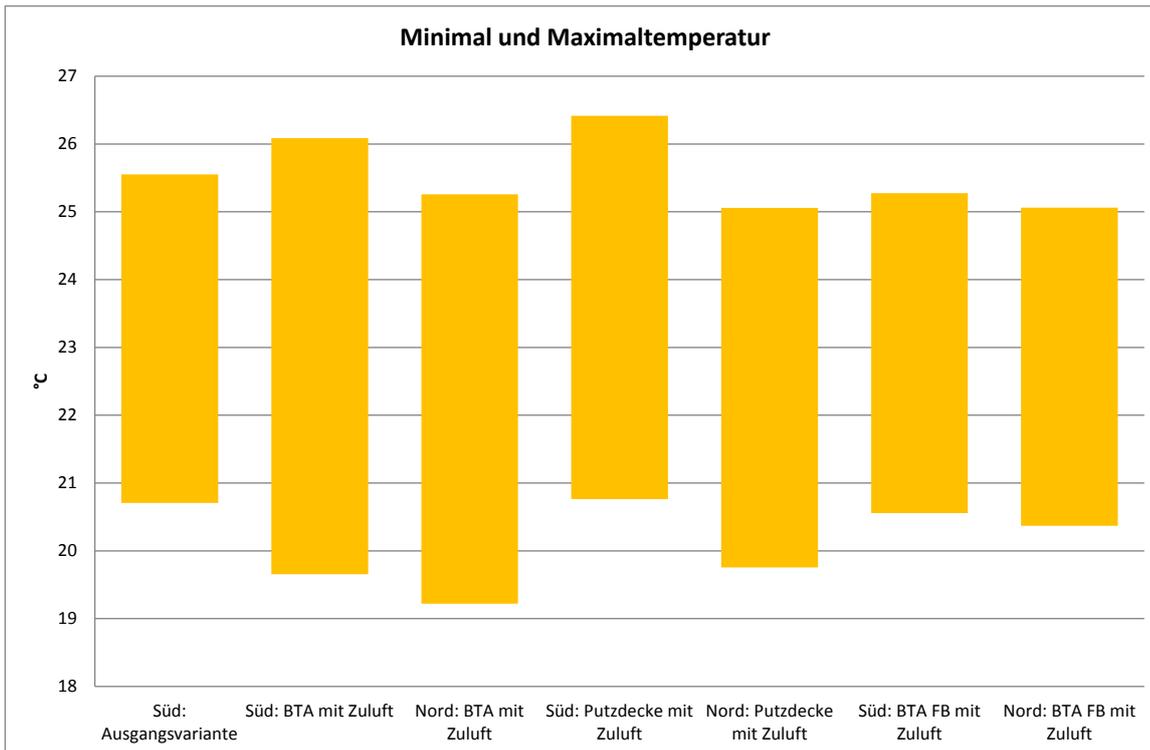
- Die Behaglichkeit wird im Fall der Varianten mit keiner aktiven oder nur begrenzter Zuluftkühlung deutlich eingeschränkt.
- Zuluftkühlung und verstärkte Fensterlüftung tagsüber zu Kühlzwecken bei einer Mindestbekleidungsstärke von 0,25 clo führt allerdings bereits zu relativ günstigen Konditionen. In Hitzeperioden treten allerdings unbehagliche Raumzustände auf.

### 5.5.5. Bauteilaktivierung

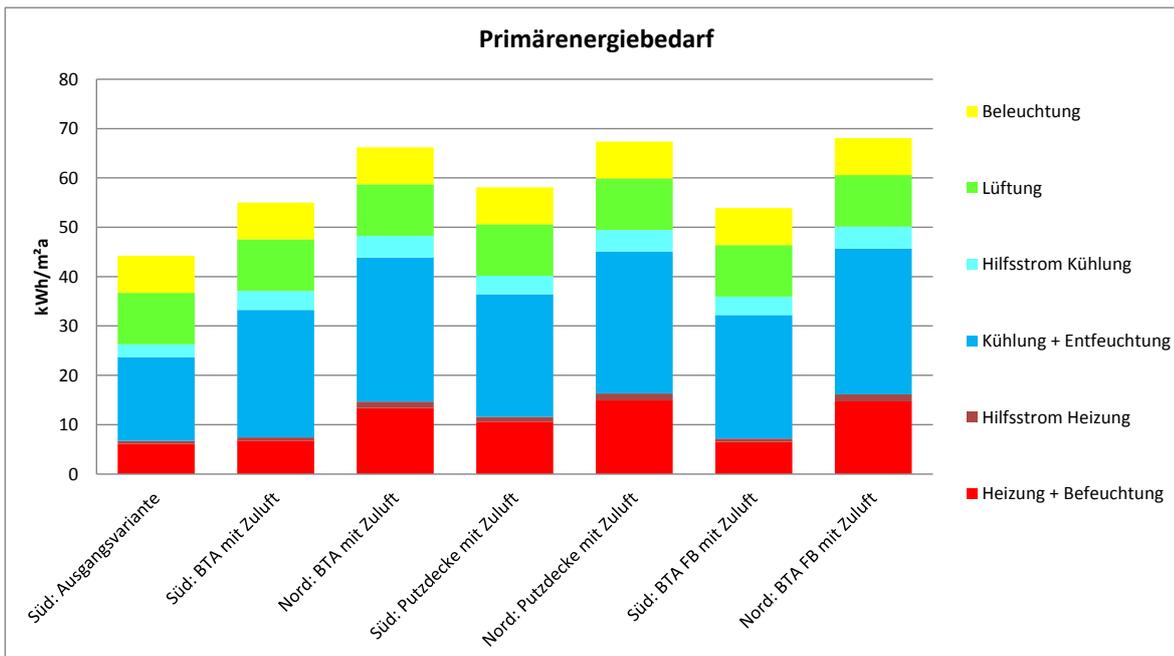
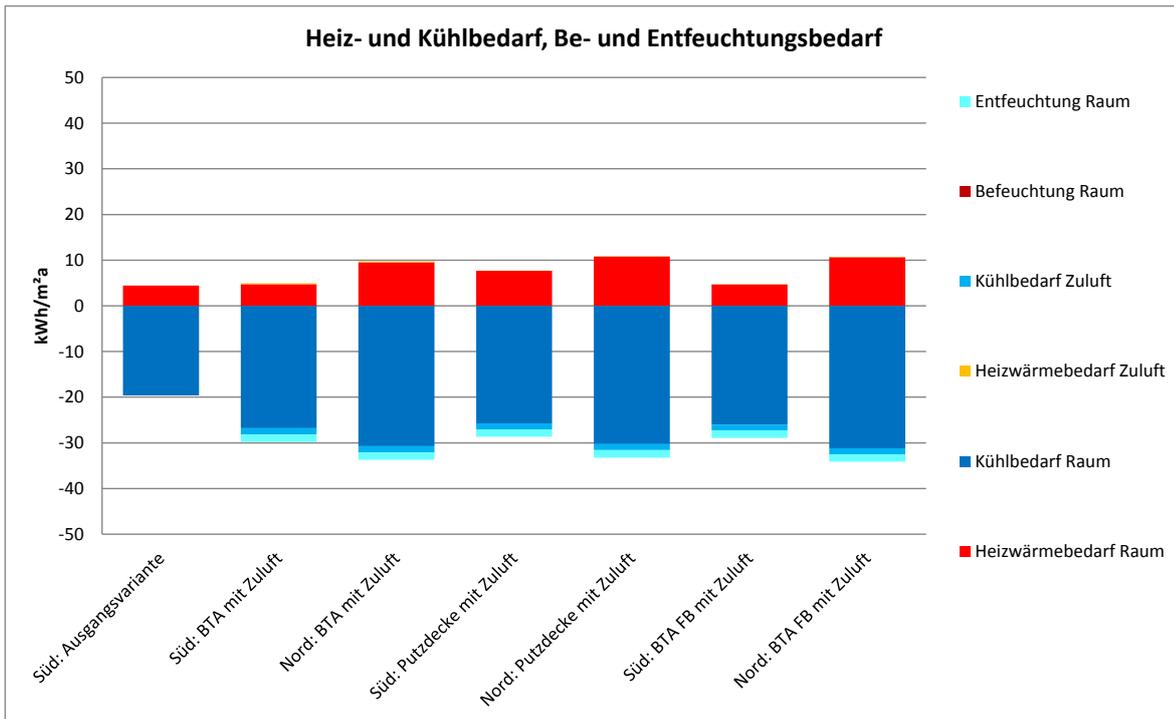
Wärme/Kälteabgabe	Raum	Zuluft
	<b>ideale Heizung und Kühlung</b>	<b>nur passiv konditioniert</b>
Passivhausbüro_00	Raumlufttemperatur 21 bis 25 °C	nur passiv konditioniert
Variante Betonkernaktivierung	Vorlauftemperaturen von 18 bis 34 °C, Regelung auf Oberflächentempertur	Winter min 18 °C, Sommer max 22 °C, Max Feuchte 9 g/kg
Variante Kapillarrohrmatte Decke	Vorlauftemperaturen von 18 bis 34 °C, Regelung auf Raumtemperatur	Winter min 18 °C, Sommer max 22 °C, Max Feuchte 9 g/kg
Variante Fußbodenheizung/kühlung	Vorlauftemperaturen von 18 bis 34 °C, Regelung auf Raumtemperatur	Winter min 18 °C, Sommer max 22 °C, Max Feuchte 9 g/kg



- Ein hoher Grad an Behaglichkeit kann in allen Varianten sichergestellt werden.
- Durch die niedrigeren empfundenen Temperaturen können in allen Bauteilsystemen Behaglichkeiten in Klasse A und B hergestellt werden.



- Die Mindesttemperaturen von unter 20 °C treten nur an wenigen Tagen im Jahr in den Nordbüros auf.
- Durch die Kondtionierung der Zuluft (Entfeuchtung) können maximale Raumlufffeuchten von 60 % gehalten werden.



- Der höhere Komfort wird mit einem Primärenergiebedarf nahe am Richtwert erkauft, das Südbüro liegt darunter, das Nordbüro darüber.
- Der Heizwärmebedarf steigt um ca. 5 bis 10 % gegenüber der Ausgangsvariante an (Verluste Regelung und Wärmeabgabe), der Kühlbedarf steigt um ca. 20 bis 25 % an.

## 5.6. Ergebnisse energetische und ökologische Bewertung

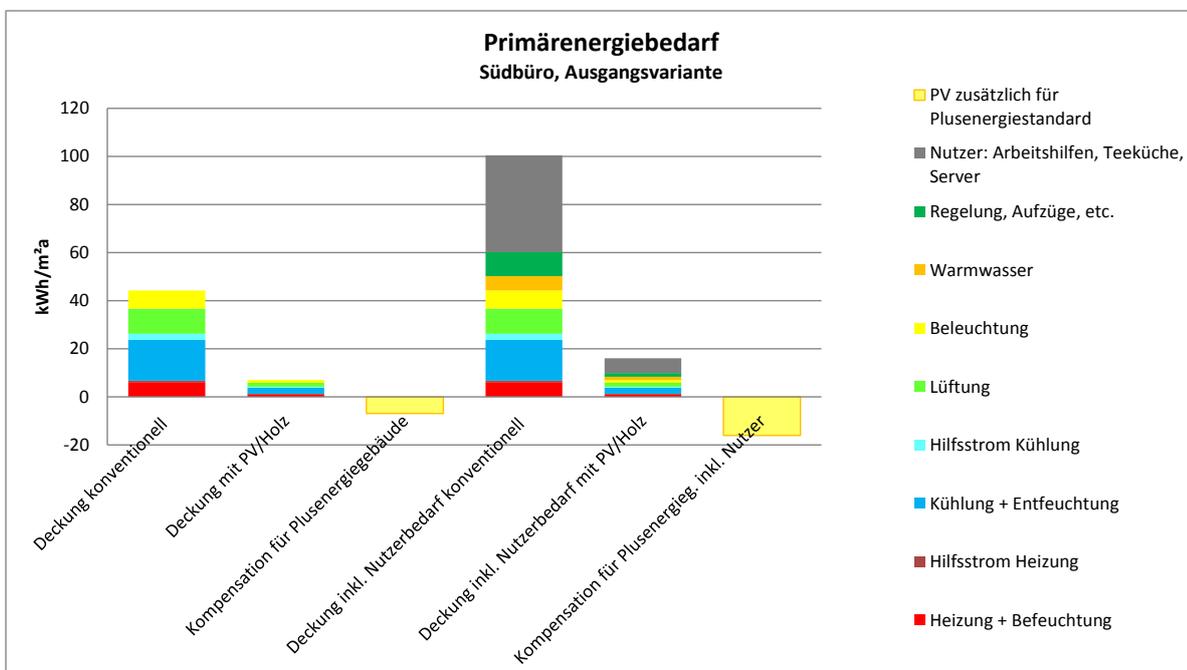
Mit einer Energieversorgung durch erneuerbare Energieträger ergibt sich ein deutlich günstigerer Primärenergiebedarf. Es wird Photovoltaik für die Strombereitstellung und Pellets für den Wärmebedarf herangezogen:

Energieträger		Primärenergiefaktor
Elektrische Energie	PV 80%	0.4 kWh/kWh Quelle Ecoinvent
Thermische Energie	Pellets	0.2 kWh/kWh Quelle Gemis/PHPP

Für die Erreichung des Plusenergiestandards müssen der Primärenergiebedarf für die Herstellung der Photovoltaikpaneele und der Primärenergiebedarf für die Pelletsverbrennung und Herstellung Infrastruktur zusätzlich kompensiert werden. Insgesamt wären die folgenden installierten Leistungen erforderlich:

	Deckung mit PV/Holz Wp/m <sup>2</sup>	Plusenergiegebäude, Deckung PV/Holz Wp/m <sup>2</sup>
Deckung Gebäudekonditionierung und Beleuchtung	14.6	17.8
Gesamt-Betriebsenergiebedarf	36.3	43.6

Eine günstige Aufstellung ist hier angenommen, für die Ermittlung der erforderlichen PV-Flächen kann von Kennwerten von 6–8 m<sup>2</sup>/kWp ausgegangen werden.



Durch den Passivhausstandard kann mit vergleichsweise geringen PV-Flächen ein Plusenergiestandard erreicht werden.

## 5.7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

### 5.7.1. Nutzung: Arbeitsplatzdichte, Arbeitshilfen, Regelung, Bekleidung, Anforderung Behaglichkeit dynamisch (Feuchte, Temperaturen, EN 15251)

Die Eigenschaften der Nutzung sind nicht Ergebnis, sondern Basis der Planung von Bürogebäuden. Im Wesentlichen können 2 prinzipiell unterschiedlich gelagerte Projektentwicklungskonzepte anstehen:

- Planung und Bau eines Bürogebäudes für einen bekannten Nutzer, mit dem alle wesentlichen Entscheidung abgesprochen werden können
- Entwickler-Projekt, d.h. ein Bürobau wird für den „Markt“ gebaut und wird später vermietet oder gebaut, der zukünftige Nutzer ist nicht bekannt

Mit einem bekannten Nutzer, der in die Planung miteingebunden wird, können bereits vorab Anforderungen an das Raumklima, die Flexibilität oder die ökologische Wertigkeit fixiert werden, wobei die Kosten/Nutzen Relation meist einen erheblichen Einfluss darauf hat. Jedenfalls kann aus dem möglichen Anforderungsspektrum eine Reihe von Möglichkeiten ausgeschlossen werden.

Für Entwickler-Projekte, in denen der Nutzer vorab nicht bekannt ist, sind in vielen Fällen nur wenige Einschränkungen bezüglich Anforderungsprofil möglich. Der Bau soll in vielen Fällen möglichst eine breite potentielle Kundenschar ansprechen. Bei gleichzeitig geringen Baukosten.

Im Prinzip hängt die bauliche Lösung des Baukomplexes und der Räumlichkeiten stark von der Beantwortung der folgenden Fragen ab:

- Wieviele Personen sollen untergebracht werden, sowohl maximal und als auch im Durchschnitt (Arbeitsplatzdichte)
- Welche Arbeitshilfen werden genutzt (heute, in 20 Jahren)
- Welche Kleidungscode existieren, bzw. müssen eingehalten werden
- Sollen die Nutzer aktiv an raumklimatischen oder beleuchtungsrelevanten Regelungsstrategien teilnehmen oder sind sie diesbezüglich „passiv“
- Muss das Gebäude gemäß ÖNORM EN ISO 7730 einer bestimmten Anforderungsklasse entsprechen oder können auch die Gebäudeklassen gemäß ÖNORN EN 15251 für nicht aktiv konditionierte Gebäude auf der Grundlage der adaptiven Komfort-Modelle angewendet werden?

Behalten wir die Anforderungen gemäß ÖNORM EN ISO 7730 aufrecht, zumindest Klasse C über das gesamte Jahr sicherzustellen und vor allem Klasse A zu erreichen, ergibt sich die folgende Bandbreite an Primärenergiebedarf (Gebäudetechnik und Beleuchtung).

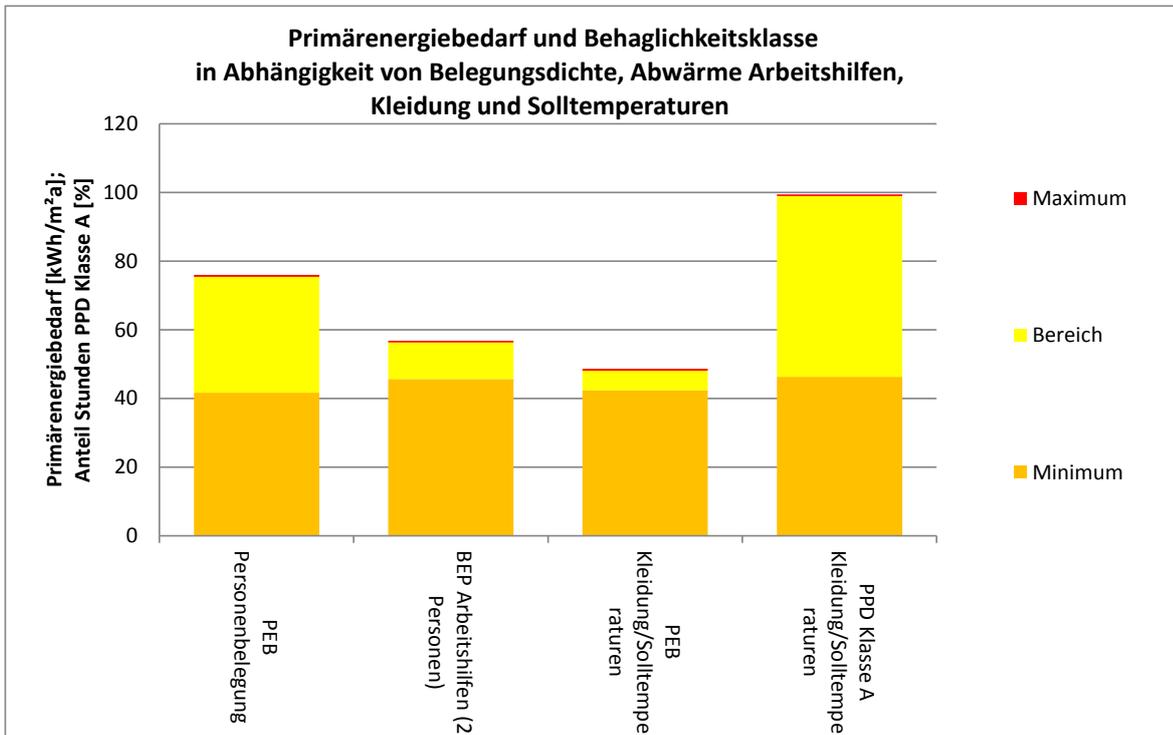


Abbildung 69: Personenbelegung: 1–4 Personen/26 m<sup>2</sup>; Arbeitshilfen 25–150 /Arbeitsplatz; Kleidung mindestens: 0,25–0,60 clo; Solltemperaturen 21–25 °C, Variante 20–26 °C

Anmerkung: Der Nutzerstrom (Arbeitshilfen) ist im angegebenen Primärenergiebedarf nicht enthalten. Achtung, unterschiedliche Bauweisen sind in den Varianten ebenfalls berücksichtigt (abgehängte Decken, Leichtbau).

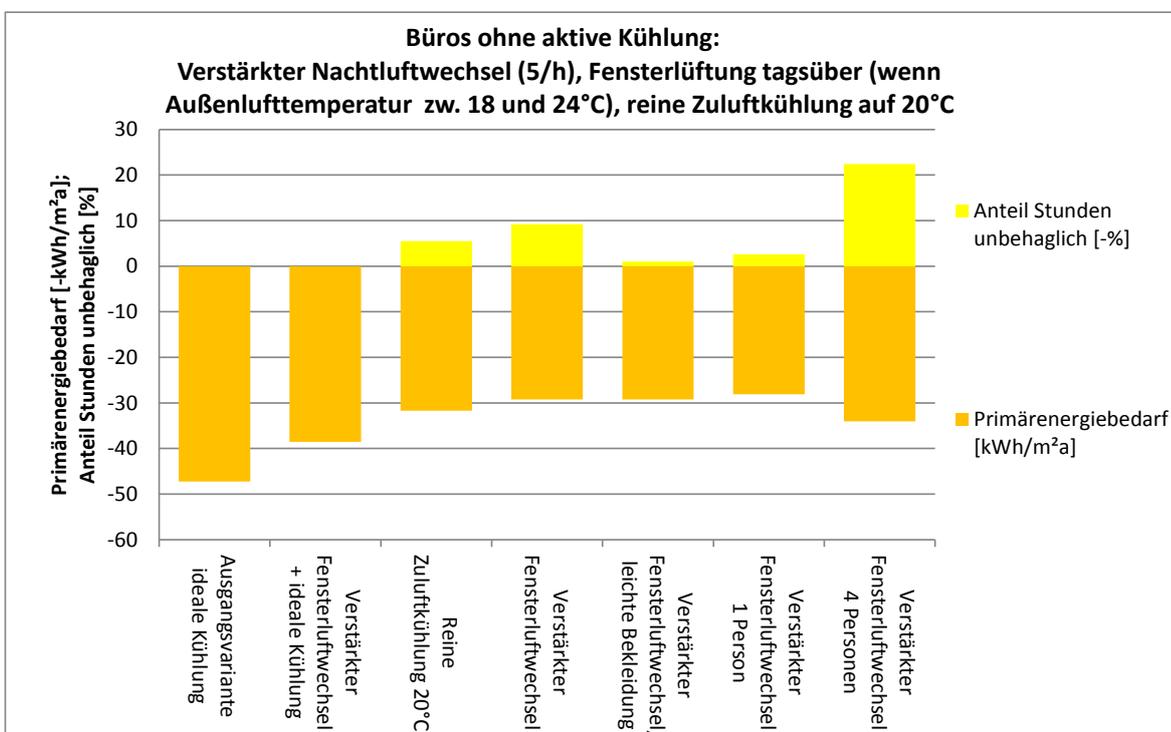
- Eine Vervierfachung der Personenbelegung bringt nur eine Verdopplung des Primärenergiebedarfs. Das heißt, dass die Primärenergieeffizienz mit höheren Arbeitsplatzdichten steigt. Zu bedenken ist der ebenfalls erhöhte Strombedarf für die Arbeitshilfen, der in den Abbildungen nicht dargestellt ist.
- Die Abwärme der Arbeitshilfen hat eine Bandbreite des Primärenergiebedarf um ca. 10 kWh/m<sup>2</sup>a zur Folge, ohne Bauteilvarianten liegt die Bandbreite bei nur 10 % entsprechend 5 kWh/m<sup>2</sup>a.
- Werden die minimalen und maximalen Solltemperaturen ausgedehnt und eine sehr leichte Bekleidung zugelassen, kann einerseits die Behaglichkeit deutlich gesteigert werden, andererseits der Primärenergiebedarf leicht gesenkt werden.

Daraus kann gefolgert werden:

- Höhere Abwärmern durch Personen und Arbeitshilfen sollten durch eine intelligente Luftführung möglichst wenig im Raum thermisch wirksam werden, z.B. durch Quellluftsysteme. Zu beachten ist allerdings, dass hohe innere Lasten einige Kälteabgabesysteme (z.B. Fußbodenkühlung, auch Betonkernaktivierung) vom Einsatz ausschließen können.
- Vor allem für hohe Belegungsichten sollten ausreichende Tageslichtausleuchtung auch im hinteren Raumbereich sichergestellt werden, um Strombedarf und Abwärmern zu reduzieren. Betrachtet man die Primärenergiebelastung pro Arbeitsplatz, ist eine dichtere Belegung für die Gebäudetechnik deutlich primärenergieeffizienter.
- Auf geringe Abwärmern durch Arbeitshilfen sollte jedenfalls geachtet werden, wobei diese Leitlinie für höhere Belegungen an Wichtigkeit gewinnt.

- Die Kleidungsstandards und damit akzeptable minimale und maximale operative Temperaturen beeinflussen wesentlich das erreichbare Behaglichkeitsniveaus und den ökologischen Aufwand. Hier ist Überzeugungsarbeit bei Geschäftsleitung und NutzerInnen zu leisten.

Für Gebäude ohne aktive Kühlung, die ausschließlich auf natürliche Kühlmaßnahmen setzen (z.B. verstärkter nächtlicher Fensterluftwechsel, verstärkter Fensterluftwechsel auch am Tag), wird für die quantitative Beurteilung der thermischen Behaglichkeit ÖNORM EN 15251 angewandt. Wesentlich am dort angewendeten adaptiven Modell ist der Ansatz, dass das Empfinden von thermischem Komfort nicht nur von klimatischen Bedingungen des Innenraums (neben Aktivität und Kleidung) abhängen, sondern auch von den Außenbedingungen (in der Norm der gleitenden Außenlufttemperatur). Die Anpassung des Nutzers an das Raumklima durch Änderung der Bekleidungsstärke oder die Öffnung der Fenster muss möglich sein, dadurch werden deutlich wärmere Raumzustände noch als komfortabel eingeschätzt.



- Ohne Kühlung sind akzeptable Komfortbedingungen nur mit sehr geringer Belegung oder einer hohen Anpassung durch Bekleidung möglich. Jedenfalls ist ein verstärkter Nachtluftwechsel und tagsüber ein Ablüften bei Außenlufttemperaturen zwischen 18 und 24 °C notwendig, um akzeptable Raumzustände zu erreichen.
- Niedrige und nur zum Teil wirksam werdende innere Lasten (Quelllüftung, effiziente Arbeitshilfen) können zu einer Verbesserung des Komfortniveaus führen.
- Mit hoher Belegung stößt dieses Konzept an seine Grenzen. Ebenso mit klimatischen Randbedingungen, die eine nächtliche Abkühlung über längere Zeit nicht mehr aufweisen

Es können bis zu 40 % der Primärenergie eingespart werden: Vor allem wird die Kühlung eingespart, zudem wird durch die Fensteröffnung am Tag bei entsprechend intelligenter Lüftung (CO<sub>2</sub>-Steuerung) Lüfterstrom durch reduzierten Volumenstrom eingespart. Bei Büros an stark befahrenen Straßen ist diese Möglichkeit stark eingeschränkt, bzw. nur mit aufwändigen Lösungen (Doppelfassade) realisierbar.

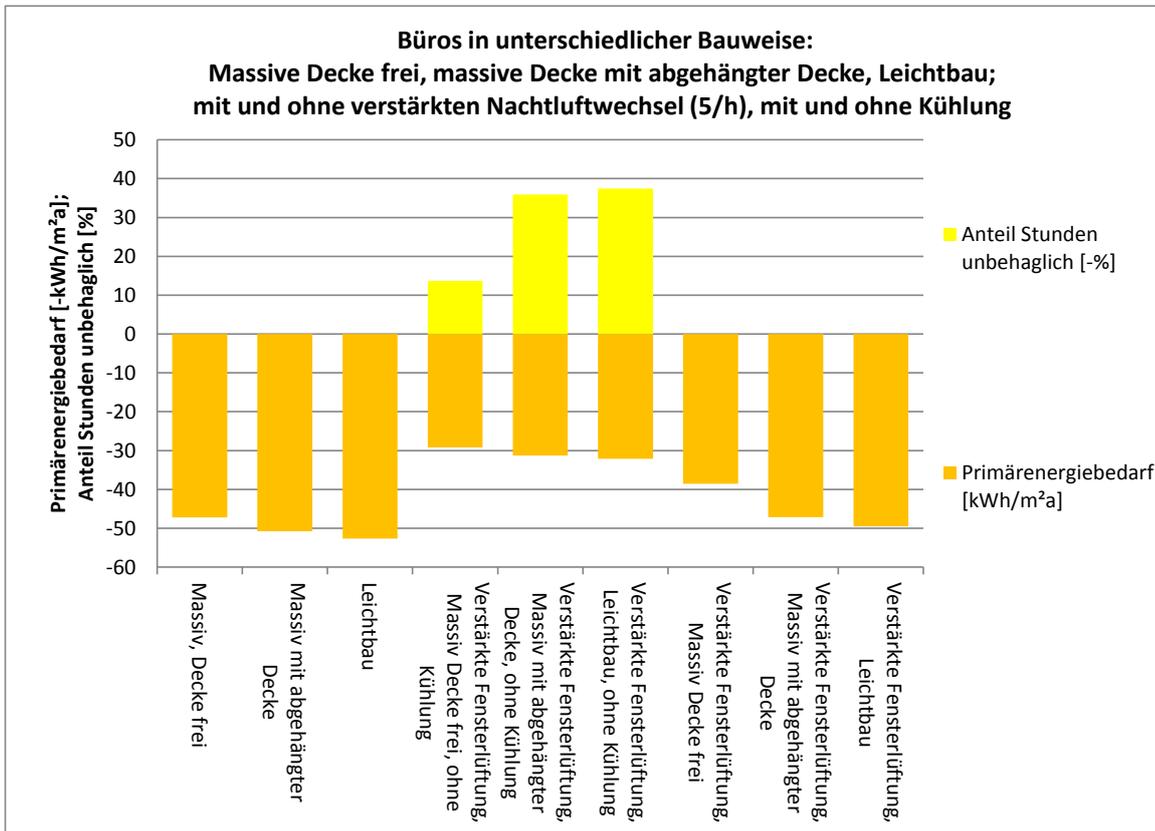
- Wird einzig die Zuluft auf 20 °C gekühlt bei Beibehaltung des hygienischen Luftwechsels kann der Primärenergiebedarf gegenüber einer idealen Kühlung um ca. 30 % abgesenkt werden. Der Anteil von unbehaglichen Stunden bei üblicher Bürokleidung steigt auf 5 % an (ca. 130 Stunden im Jahr).
- Auch bei Vorhandensein einer aktiven „idealen“ Kühlung kann Primärenergie von ca. 20% allein durch den verstärkten Nachtluftwechsel eingespart werden, wobei in diesem Fall hoher Komfort auch in den heißen Wochen gesichert werden kann.

Derartige natürliche Kühlkonzepte erfordern die starke Mitwirkung und Einbindung des Nutzers, bereits in der Planung, vor allem nach Bezug des Gebäudes. Sie müssen mit den wesentlichen Eigenschaften der natürlichen, passiven Kühlung vertraut sein, ihre Kleidung dem Raumklima anpassen und sich der starken Primärenergieeinsparung bewusst sein. Die hohen Nachtluftwechsel sind nur durch großzügige, gegen Schlagregen und gegen Einbruch geschützte Fassadenöffnungen erzielbar. Zudem muss der Öffnungsgrad flexibel oder zumindest in Stufen an das Außenklima anpassbar sein. Eine hohe wirksame Speichermasse ist von Vorteil. Daher sind die Konzepte oft nur mit Bauherren möglich, die das Gebäude dann auch selber beziehen und früh in das Gebäudeklimakonzept eingeführt sind.

### **5.7.2. Thermische Hülle und konstruktive Ausbildung**

Thermische Hülle und konstruktive Durchbildung wirken sich vielfältig auf das thermische Verhalten aus:

- Hohe, wirksame Speichermassen dämpfen die Wirkung von Wärmeeinträgen durch Sonne und innere Lasten: Besonders im Fall ohne aktive Kühlung können so die Temperaturspitzen deutlich reduziert werden. Mit einer aktiven Kühlung werden durch hohe wirksame Massen vor allem die Kühl-Leistungen deutlich reduziert, d.h. eine größere Auswahl an Kälteabgabesysteme kann möglich werden oder extremere Auslegungsbedingungen können abgedeckt werden.
- Durch den sehr guten Wärmeschutz wird der Heizwärmebedarf deutlich gesenkt, zudem reduziert sich die Heizsaison zeitlich bedeutsam. Ohne passive Kühlmaßnahmen (Fensterlüftung) verlängert sich die Kühlperiode in leichtem Ausmaß.
- Die Oberflächentemperaturen sind durch die Passivhaus-Verglasung hoch und daher auch in kalten Perioden für den Komfort unproblematisch.
- Ein optimierter außenliegender Sonnenschutz bietet guten Schutz vor hohen solaren Einträgen, wobei die Tageslichtnutzung möglichst wenig eingeschränkt ist, d.h. die Regelung erfolgt in Abhängigkeit von Tageslichtversorgung



- Der Primärenergiebedarf erhöht sich durch eine leichte Bauweise oder durch die abgehängte Decke um ca. 10 % gegenüber der Ausgangsvariante mit frei liegender Massivdecke. Der Komfort ist bei idealer Kühlung in allen 3 konstruktiven Varianten sehr ähnlich, die Kühl- und Heizleistungen steigen ebenfalls erheblich an.
- Deutlich stärker wirkt sich die vorhandene Speichermasse in den Fällen ohne Kühlung aus, wobei eine natürliche Kühlung mit verstärktem Nachtluftwechsel einen nicht unwesentlichen Teil der am Tag aufgenommenen Lasten nach außen transportieren kann. Der Anteil an unbehaglichen Stunden steigt von knapp über 10 % auf über 30 % an. Dieser hohe Anteil kann durch verstärkte Fensterlüftung am Tag oder durch leichtere Bekleidung deutlich reduziert werden (s.o.), trotzdem ist gerade für Kühlkonzepte, die den Temperaturabfall in der Nacht nutzen, eine hohe und leicht zugängliche Speichermasse unbedingt notwendig.

Grundsätzlich ist gerade für das Nutzungsprofil Büro eine thermisch dämpfende Baukonstruktion von hohem Wert. Ist diese im Rohbau vorgesehen, sollte sie möglichst zugänglich bleiben. Das träge Verhalten führt auch zu geringeren Anforderungen an die Reaktionszeit des Heiz- und Kühlsystems und so zu einem insgesamt ausgeglicheneren Raumklima.

Wird eine Leichtbauweise gewählt, so ist besonders auf thermisch günstige Zuluft einbringung zu achten, moderater Fensteranteil und hocheffizienter Sonnenschutz sind unumgänglich.

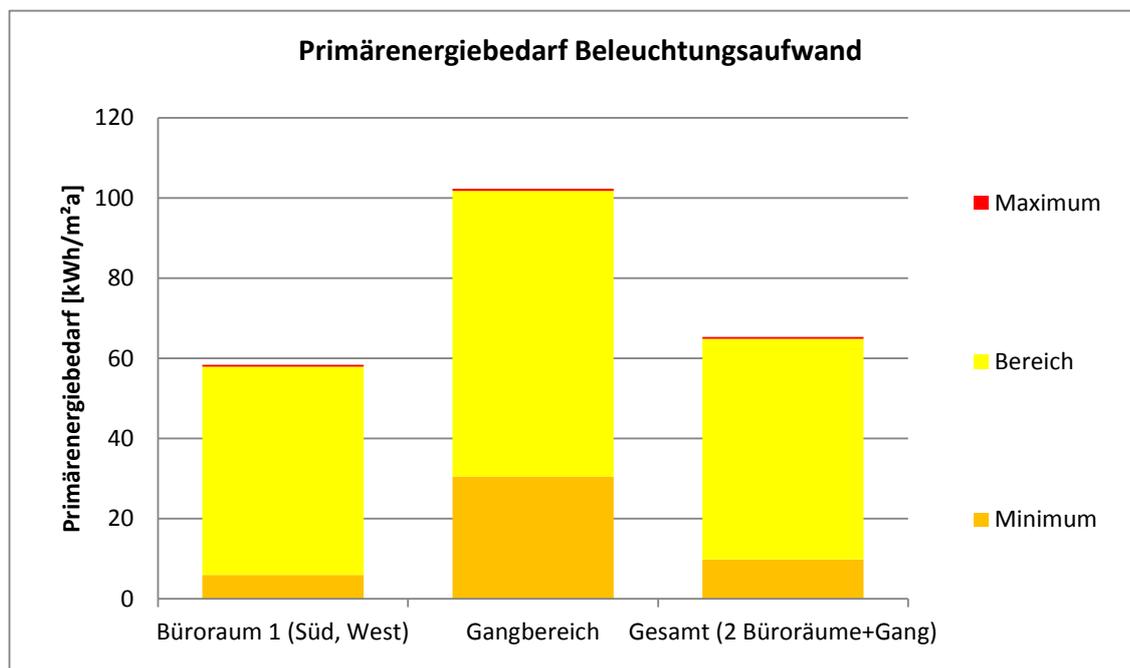
Um passive Maßnahmen im Sommer wie im Winter möglichst optimal für die Raumklimatisierung einsetzen zu können, sind einerseits alle Wärmeströme über die thermische Hülle möglichst gut dosiert zu führen: Der hohe Wärmeschutz und die gute Luftdichtigkeit von Passivbüros bringt den Wärmeaustausch durch

Wärmeleitung und Konvektion auf einen nur in geringem Maße schwankenden Wert. Durch einen optimierten Sonnenschutz wird einerseits die solare Einstrahlung wenn gewünscht stark reduziert, allerdings wird trotzdem eine hohe Versorgung mit Tageslicht sichergestellt. Dies ist nur mit einem außenliegenden Sonnenschutz möglich, ausschließlich innenliegende Sonnenschutzmaßnahmen sind nur nach Norden hin möglich. Die (hocheffiziente) Beleuchtung addiert nur das Licht, das für den Arbeitsprozess notwendig ist, nicht mehr. D.h. auch hier werden unnötige Wärmeeinträge minimiert. Trotz dieser intelligenten passiven Hülle werden durch Personen und Arbeitshilfen noch bedeutende Wärmeleistungen tagsüber an Raumluft und -oberflächen abgegeben. In diesen Fällen hilft eine hohe wirksame Speichermasse zum Ausgleich von Raumtemperaturschwankungen in passiver Weise. Leichtbauten sollten durch massive Innenschichten (schwere Innenputze oder Platten, Estriche, Bauteilschichten mit PCM-Materialien) in ihrer thermischen Speicherkapazität unterstützt werden.

### 5.7.3. Belichtung und Beleuchtung

Wesentlichen Einfluss auf die ökologischen Belastungen durch die Büronutzung hat die künstliche Beleuchtung. Diese hängt wiederum von architektonischen, lichttechnischen, strömungstechnischen und noch anderen Faktoren ab.

Beschränken wir uns auf die Betrachtung eines Büroabschnitts mit 2 Büroräumen, die beidseitig an den Gang anschließen, ergibt sich ein Primärenergieaufwand für die Beleuchtung von 10 bis 65 kWh/m<sup>2</sup>a.



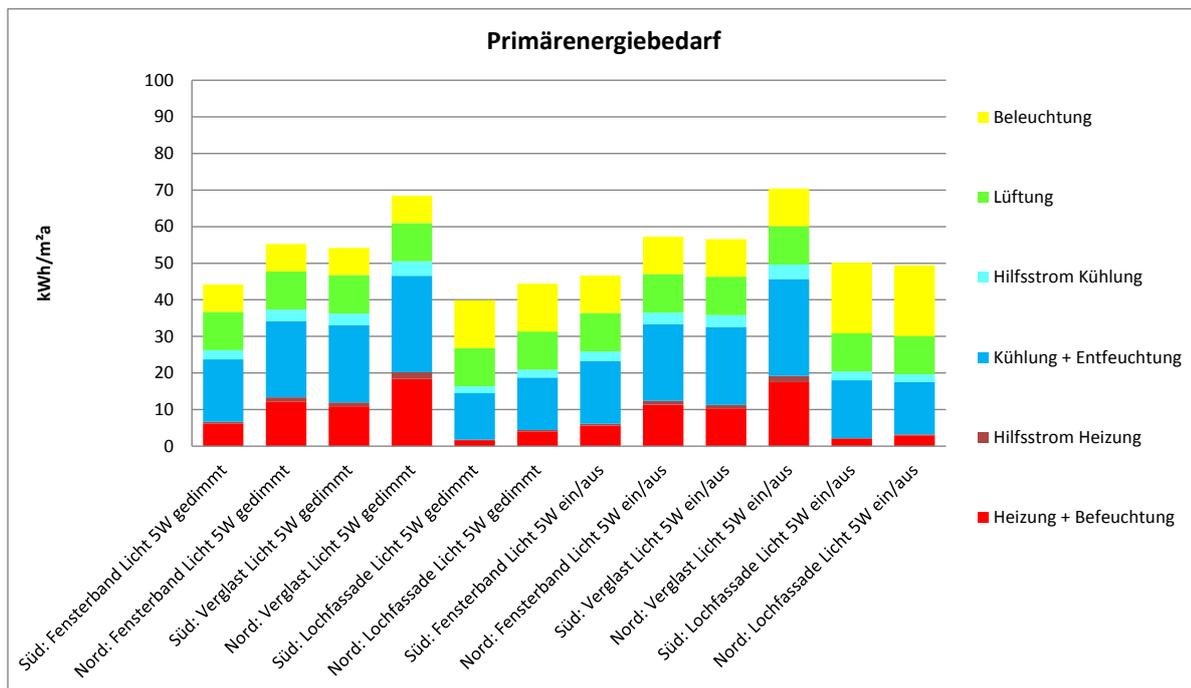
Beleuchtung	Büroraum 1 (Süd, West)	Gangbereich	Gesamt (2 Büroräume+Gang)
Primärenergiebedarf	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a
Minimum	5.9	30.5	9.8
Bereich	52.0	71.3	55.0
Maximum	57.9	101.8	64.8

Deutlich wird, dass insbesondere der Gangbereich durch die nicht vorhandene Tageslichtversorgung auch im besten Fall (5 W installierte Lichtleistung!) einen hohen flächenbezogenen Strombedarf aufweist. Bezogen auf das gesamte Gebäude ist daher vor allem auch der Anteil an nicht tageslichtversorgten Gangflächen wichtig. Da in der gewählten Geometrie nur ein vergleichsweise geringer Ganganteil von 16 % vorhanden ist, ist der Einfluss der Gangbeleuchtung in großen Bürogebäuden mit meist größeren Verkehrsflächen (ohne oder mit geringer Tageslichtversorgung) meist noch höher.

Den niedrigsten Beleuchtungsaufwand weisen voll verglaste Büroräume und nur wenige höheren solche mit Fensterband (ohne Sturz) auf. Voraussetzung sind geringe installierte Lichtleistungen und Lampen, die dimmbar (und anwesenheitsgesteuert) das gewünschte Beleuchtungsniveau sicherstellen. Bei Belegung mit 2 Personen und den fassadenseitig angeordneten Arbeitsplätzen ist der Unterschied zu den Varianten mit Lochfassade gering (Primärenergiebedarf gesamt 16,4 Lochfassade anstatt 11,6 kWh/m<sup>2</sup>a für das Fensterband).

Da die Beleuchtung mit natürlichem und künstlichem Licht durch die freigesetzte Wärme Einfluss auf das thermische Verhalten hat, sind für eine umfassende Bewertung der Umweltbelastung Belichtung auch die Belastungen für Kühlung und Heizung einzubeziehen. Indirekt wird auch der Befeuchtungsaufwand mitbeeinflusst, so er einen Mindestwert an relativer Feuchte sicherstellt, die wiederum von der Raumlufttemperatur abhängt.

Ein Vergleich für unterschiedliche Fassadentypen zeigt die folgende Abbildung:



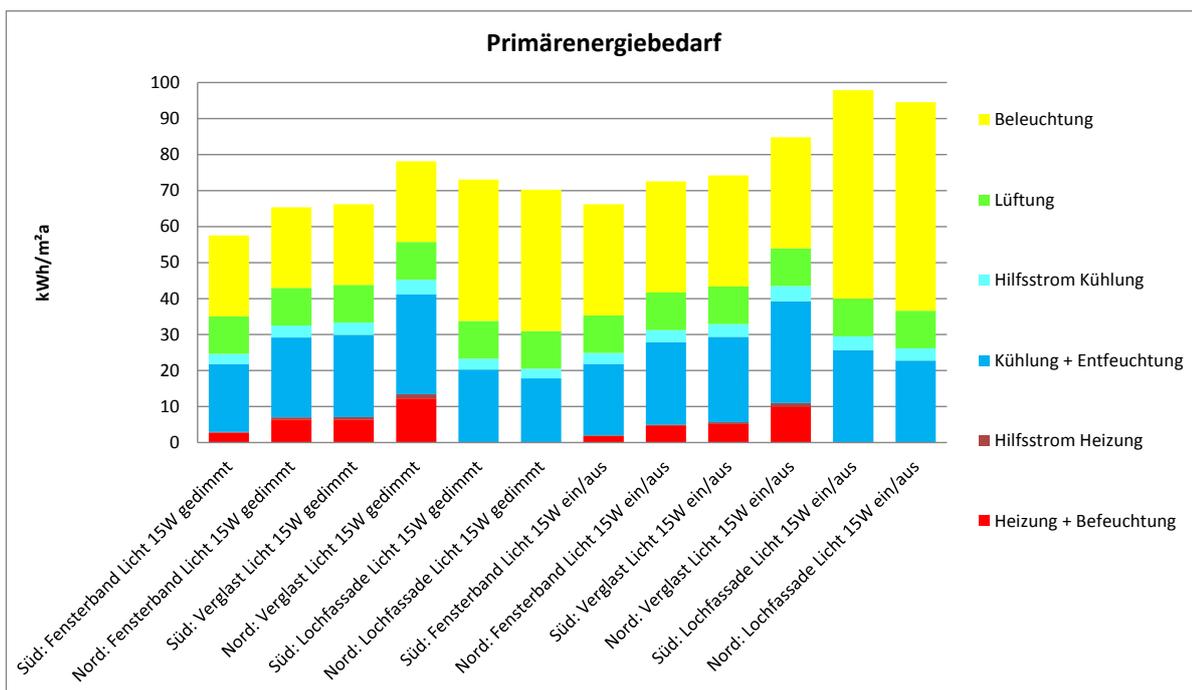
- Je nach Fassade, Orientierung und Belichtung ergibt sich ein Primärenergiebedarf von 40 bis 70 kWh/m<sup>2</sup>a (inkl. Luftbeförderung, keine Be- und Entfeuchtung).
- Am günstigsten liegt die Lochfassade mit gedimmten Leuchten: Der Beleuchtungsaufwand liegt zwar höher als mit den beiden anderen Fassadensystemen, Heizwärme- und Kühlbedarf können allerdings deutlich reduziert werden.
- Ist nur eine ein/aus Beleuchtung (wenn auch tageslichtgesteuert) vorhanden, ist die Fensterbandvariante und die Lochfassade in etwa gleichwertig (wenn auch im Falle der Fensterband-

fassade deutliche Unterschiede zwischen Süd- und Nordbüros vorhanden sind). Allerdings ist der künstliche Beleuchtungsaufwand im Fall der Lochfassade deutlich höher als im Fall des Fensterbandes (und der vollverglasten Fassade).

Anmerkung: Hier sollte der Hinweis nicht fehlen, dass bei Systemen, die die Abwärme der künstlichen Beleuchtung vor allem im Deckenbereich abgeben und dort die Abluft absaugen (was üblich ist) und die die Zuluft im Bodenbereich (Quellluft, Drallluftauslässe im Boden) einblasen, nur ein Teil der Abwärme thermisch wirksam wird (Kolbenströmung). Diese Lösung ist mit allen Fassadensystemen möglich, wirkt sich primärenergetisch günstig vor allem in den Lochfassadensystemen aus (Verringerung Kühlbedarf bei nur moderater Steigerung Heizwärmebedarf).

- Vollverglaste Bürogebäude haben den Nachteil, den künstlichen Lichtbedarf gegenüber der Fensterbandfassade nicht zu reduzieren (da Bezug Beleuchtungsstärke Arbeitsplatz), der Kühl- und Heizwärmebedarf erhöht sich allerdings deutlich.
- Deutlich ist auch, dass die Funktion Dimmbarkeit sich vor allem bei einer Lochfassade stark auswirkt, während mit Fensterband und Vollverglasung der Unterschied zu ein/aus eher gering ist. D.h. Dimmen ist besonders günstig bei mittlerem Lichtangebot. Bei schlechtem Tageslichtangebot ist die künstliche Beleuchtung meistens in Betrieb, bei sehr gutem Tageslichtangebot ist es (draußen und drinnen) hell oder (frühmorgens und abends) dunkel.

Mit installierten Leistungen von 15 W/m<sup>2</sup> ergibt sich naturgemäß ein entsprechend höherer Strombedarf:



- Da es sich bei der installierten Leistung um eine relative Erhöhung handelt, wirkt sie sich ungünstig vor allem für die Variante Lochfassade stark aus: Die Lochfassade wird, wenn ein/aus Regelung ausgeführt wird, zur ungünstigsten Fassadenlösung. Der Beleuchtungsaufwand liegt in allen Varianten höher als der Primärenergiebedarf für Heizen, Kühlen und Lüften.
- Die Büros mit Lochfassade weisen einen Heizwärmebedarf annähernd bei 0 auf.
- Den Primärenergie-Richtwert von 60 kWh/m<sup>2</sup>a kann nur die Variante Fensterband mit gedimmten Lampen einhalten.

- Die Fensterbandvariante ist in allen Regelungsvarianten die primärenergetisch günstigste Variante: Gegenüber der Lochfassade ist der Beleuchtungsaufwand deutlich niedriger, gegenüber der vollverglasten Büros ist Heiz- und Kühlenergiebedarf deutlich niedriger.
- Die vollverglaste Variante steigt im Primärenergiebedarf gegenüber der Ausführung mit 5 W/m<sup>2</sup> installierter Leistung ebenfalls proportional an, allerdings liegt sie im Fall von dimmbaren Lampen in etwa gleichauf mit der Lochfassade, im Falle von ein/aus deutlich niedriger wie diese.

Insgesamt können zum Komplex Tageslichtversorgung, Beleuchtung und dem damit einhergehenden Primärenergiebedarf die folgenden Schlüsse gezogen werden:

- Primärenergetisch ist die Lösung Fensterband gegenüber der Lösung Vollverglasung für alle Varianten in installierter Leistung und Regelung im Vorteil.
- Die Lösung Lochfassade ist bei sehr geringer installierter Leistung nur mit optimaler Regelung gegenüber der Fensterbandlösung leicht im Vorteil, wenn die fensternahen Arbeitsplätze belegt sind. Bei höheren installierten Beleuchtungsleistungen sind Lochfassaden primärenergetisch ungünstig.
- Umgekehrt ausgedrückt: Bei niedriger installierter Beleuchtungsleistung mit stark bedarfs-gerechter Regelung (dimmbar, anwesenheitsgesteuert) ist die Fassadenlösung von unter-geordneter Bedeutung (wenn sturzfrei konstruiert).
- Insgesamt hat die Beleuchtung von nicht (oder nur geringfügig) tagesbelichteten Gang- und Verkehrsflächen einen wesentlichen Einfluss auf den Gesamt-Primärenergiebedarf. In diesen ist die Minimierung der installierten Leistung, die Belichtung mit Tageslicht und die Regelung (dimmbar, vor allem anwesenheitsgesteuert) von besonderer Bedeutung für das ökologische Verhalten des Gebäudes.
- Fixe Verschattungen, Eigenverschattung und Verschattung durch Nachbargebäude oder Hügel können sich wesentlich auf die Tageslichtversorgung auswirken, und somit auch auf den Gesamt-Primärenergiebedarf: Der Kühlbedarf sinkt, der Heizbedarf steigt gegenüber den unverschatteten Büroräumen, der Beleuchtungsbedarf steigt. Ohne Sturz sind sich die Varianten für die fensternahen Arbeitsplätze allerdings ziemlich ähnlich.

#### **5.7.4. Gebäudetechnik**

Verlässt man ideale Heiz- und Kühlsysteme, addieren sich zu den Verlusten der Wärmeverteilung auch diejenigen der realen Abgabe- und Regelungsverluste. Unter einer idealen Heizung oder Kühlung wird die Zufuhr von Wärme, bzw. die Abfuhr von Wärme verstanden, um die definierten Solltemperaturen exakt einzuhalten. Im Gegensatz dazu stehen reale Systeme, die jedenfalls Schwankungen, bzw. Hysteresen aufweisen und damit nicht exakt eine vordefinierte Solltemperatur einhalten können, sondern um diese schwanken.

Während das System Deckenfancoil bereits sehr nahe an das in der Simulation abgebildete ideale Heiz- und Kühlsystem herankommt (Abgabe fast vollständig an Raumluft, nur leichte Schwingungen der Raumluft), sind Flächenheizsysteme durch die meist vorhandene Masse deutlich träger. Andererseits werden durch diese auch Flächen konditioniert, deren Oberflächentemperatur auch auf das Behaglichkeitsempfinden der NutzerInnen wirkt.

Gegenüber der Ausgangsvariante mit idealem Heiz- und Kühlsystem erhöht sich der Primärenergiebedarf durch den Einsatz von Flächenheizsystemen um ca. 20 bis 30 %. Gleichzeitig erhöht sich die Behaglichkeit wesentlich, da fast nur noch Klasse A im Büroraum vorhanden ist. Hier öffnet sich auch ein Feld möglicher Optimierungen, die entweder den Primärenergiebedarf (und meist auch das Komfort-niveau) reduzieren oder beide steigen.

Neben den hohen Behaglichkeitsniveaus von Flächenheizungen und -kühlungen ist als großer Vorteil die vereinfachte Einbindungen von natürlichen Wärme- und „Kälte“-quellen zu nennen, z.B. Abwärme für die Beheizung oder solare Kühlung oder Grundwasser- oder Erdwärmennutzung für die Kühlung. Dadurch kann der primärenergetische Aufwand z.T. rein auf den Wassertransport reduziert werden.

Zu beachten ist, dass die verfügbaren Kühl- und Heizleistungen in den meisten Fällen deutlich unter denjenigen von Luftsystemen liegen, somit eine gut an die NutzerInnen angepasste Dimensionierung und insbesondere Regelung unbedingt erforderlich ist. Dies ist vor allem bei hohen inneren Lasten notwendig, um auch in heißen Perioden den gewünschten Komfort sicherstellen zu können.

Hygienischer Luftwechsel, bedarfsgerecht und mit hoher Wärme- und Feuchterückgewinnung und die Feuchteabgabe einiger Pflanzen garantiert für Bürogebäude verhältnismäßig hohe und behagliche Raumluftfeuchten im Winter von 30 bis 40 %. Die für die „Befeuchtung“ erforderliche Energie wird dem Raum entzogen und führt dort zu einer nicht unerwünschten Kühlung, Probleme durch Schimmel, Bakterien etc. können durch eine vergleichsweise unaufwändige Pflege der Pflanzen sichergestellt werden.

Alternativ ist auch eine künstliche, adiabate Befeuchtung andenkbar, die sich primärenergetisch günstig vor allem mit Doppelrotationstauscher realisieren lassen.

In sehr schwülen Phasen erhöht sich die Raumluftfeuchte deutlich, mit den Pflanzen und ohne Entfeuchtung treten kurzfristig bis zu 15 g/kg Feuchte auf. Eine Entfeuchtung kostet nur wenig Primärenergie, muss allerdings verhältnismäßig hohe Leistungen aufweisen, um 12 g/kg, den Schwülegrenzwert, sicher einhalten zu können. Eine Entfeuchtung in schwülen Wetterperioden ist vor allem bei Flächenkühlungen jedenfalls vorzusehen.

### **5.7.5. Schlussfolgerung**

Passivhausbüros weisen per se schon sehr gute Voraussetzungen auf, um ganzjährig hohen thermischen Komfort mit niedrigem Primärenergiebedarf zu verbinden: Natürlich vorhandene Wärme- und „Kälte“-quellen werden zur Raumkonditionierung verstärkt eingebunden, alle vorhandenen Wärmeflüsse in die thermische Hülle werden durch passive Techniken (hoher Wärmeschutz, hohe Luftdichtigkeit, bedarfsgerechte Lüftung, hohe Wärme- und Feuchterückgewinnung, optimaler und tageslichtgesteuerter Sonnenschutz) gesteuert und optimal genutzt. Die inneren Wärmelasten werden durch effiziente Beleuchtung und Arbeitshilfen reduziert, zudem wird deutlich Strom dadurch gespart.

Diese Grundausstattung wird durch eine intelligente Heizwärme-, Kälte- und Frischluftzufuhr unterstützt, die Abwärme im Sommer möglichst wenig im Raum wirksam werden lässt (siehe Kapitel Strömungssimulation). Trotz des einfachen Grundkonzepts ist eine Vielzahl an Lösungen möglich, um die energetischen Grenzwerte und Komfortanforderungen, die an Passivbüros gestellt werden, einhalten zu können.

## 6 Ausblick und Empfehlungen

Der Passivhausstandard, ursprünglich für Wohnhäuser entwickelt, trifft bei der Büronutzung auf anspruchsvolle Anforderungen, die von denen bei Wohnnutzungen abweichen. Geht es bei Wohnungen darum, eine Gebäudehülle zu schaffen, die trotz geringer innerer Wärmequellen auch im Winter thermische Behaglichkeit bei minimalen Heizwärmebedarf schafft, so sind bei Büros die Folgen großer innerer Wärmequellen und hohen Frischluftbedarfs bei hoher Belegungsdichte, entsprechender Geräteausstattung und Beleuchtung zu bewältigen: Trockenheit der Luft im Winter bei hoher Lüftungsintensität, Kühlbedarf im Sommer, ja sogar zuweilen im Winter. Dazu sollten Büroräume ausreichend und blendfrei natürlich belichtet sein.

Unter dem Druck solcher Anforderungen verlangen Systeme einige Aufmerksamkeit, die auch in „passiv“ konzipierten, gut gedämmten, wärmebrückenfreien und luftdichten Bürogebäuden höchst aktiv sein müssen. Dies sind die mechanischen Verschattungseinrichtungen vor den Fenstern und die Lüftungsanlagen sowie Wärme- und Kälteabgabesysteme.

Die Ergebnisse der Lichtsimulationen führen zur Empfehlung großzügiger sturzfreier Fensterflächen. Die gute Wirkung und energetische Effizienz passender Verschattungseinrichtungen werden durch Licht- wie durch thermische Simulationen belegt. Im Ausblick müssen aber auch Fragen der Kosten, Wartung, Windbeständigkeit, Dauerhaltbarkeit, Ästhetik sowie die automatische oder manuelle Regelung der Verschattungseinrichtungen erwähnt werden, die nicht Untersuchungsgegenstand waren und zukünftig bearbeitet werden sollten.

Die Ergebnisse der thermischen Simulationen verweisen auf drei Optimierungswege, die die Klimatisierungsaufgabe im Büro weniger aufwändig machen können: die Minimierung der inneren Wärmequellen aus Geräten und Beleuchtung, verstärkter Fensterluftwechsel im Sommer, nachts und am Tag sowie die mögliche Ausweitung der Toleranz gegenüber höheren Temperaturen im Sommer durch Fensterlüftung und gelockerte Kleidungsvorschriften.

Leichte Bauweisen, aber auch Massivbauten mit abgehängten Decken benötigen höhere Heiz- und Kühlleistungen und damit auch höheren Primärenergieverbrauch (rund 10 %) gegenüber Gebäuden mit freiliegenden Massivdecken. Dieser Befund steht allerdings in einem Spannungsverhältnis zur Anforderung, vor allem größere Büroräume akustisch zu bedämpfen, wofür meist abgehängte Decken verwendet werden. Eine weitere offene Frage, deren Bearbeitung bereits geplant ist.

Die Variation der Lüftungsintensitäten hatte das Ergebnis, dass höhere Luftvolumenströme den Primärenergiebedarf deutlich hochtreiben, aber den Komfort nur wenig beeinflussen. Verringerte Luftmengen bewahren zudem im Winter die ohnehin geringe Luftfeuchte. Mittels Strömungssimulation sollte die Effektivität des Luftaustauschs bei verringerten Lüftungsintensitäten getestet werden.

Die Ergebnisse der Strömungssimulationen geben reichhaltige Einblicke in die Wirkungsweise verschiedener Kombinationen von Luftzufuhr sowie kälte- und wärmeabgebenden Systemen. Die Untersuchungen zeigen Vorteile einer Aufteilung der Funktionen Lüftung und Wärme/Kälteabgabe für den Komfort. Allerdings benötigen die trägeren Flächenkühl- und -heizsysteme wesentlich ausgefeiltere Regelungsstrategien, die auf erwartbare Temperaturänderungen schon reagieren, bevor diese eintreten. Der Passivhausstandard erleichtert die Ausführung von Deckenheizungen, deren Einsatz aus Komfortgründen sehr stark begrenzt werden müsste.

Der Ort der Luftzufuhr im Raum und die Temperaturführung haben beträchtlichen Einfluss auf die Effektivität des Luftaustauschs. Bei einigen Systemen ist der eigentlich ungewollten Fallströmung entlang der auch in Passivhäusern kühleren Fensterscheibe die Funktionalität des Luftaustauschs zu verdanken, während der Konvektor bei Betrieb dem Luftaustausch entgegenwirkt. Generell ist die bodennahe Lufteinbringung vorteilhaft. Einige weitere Systeme sollten noch mit Hilfe von CFD-Simulation untersucht werden. Zusammenfassend lässt sich sagen: Eine Gebäudehülle nach dem Passivhausstandard mit ihren bekannten Vorteilen bei Primärenergiebedarf, thermischem Komfort und der Raumluftqualität ist auch bei Bürogebäuden empfehlenswert. Zusätzliche Aufmerksamkeit verlangt die anspruchsvolle Nutzung als Büro: Minimierte innere Wärmequellen bezogen auf einen Arbeitsplatz, außenliegender funktioneller Sonnenschutz und innenliegender Blendschutz bei großzügiger Verglasung, richtig positionierte, effektive Luftführung in den Räumen, gut einregulierte Kühl- und Heizflächen oder richtig dimensionierte zugluftarme Luftkühlungen und -heizungen sind höchst aktive Bestandteile einer Passivhauslösung im Bürobereich.

## 7 Literaturverzeichnis

### 7.1 Literatur zu Strömungssimulationen

- [1] ParallelNS user's guide: University of Göttingen / Technical University of Dresden 2001
- [2] Knopp, T., Lube, G., Gritzki, R., Rösler, M.: A near-wall strategy for buoyancy-affected turbulent flows using stabilized FEM with applications to indoor air flow simulation. Computer Meths. Applied Mechan. Engrg. 194 (2005) 3797-3816
- [3] Gritzki, R.: Bestimmung der Effektivität nutzerbedingter Fensterlüftung mit Hilfe numerischer Simulationsverfahren. Dissertation, TU Dresden Fakultät für Maschinenwesen, Der Andere Verlag, Osnabrück, 2001
- [4] Gritzki, R., Richter, W., Rösler, M.: How to predict the air exchange efficiency for hybrid ventilation systems. Int. Journal of Ventilation, Vol. 1, HybVent S. 33-39
- [5] Klein, S. A., Duffie J. A., Beckman, W. A.: TRNSYS - A Transient Simulation Program. ASHRAE Trans 82 (1976), S. 623
- [6] Perschk, A.: Gebäude-Anlagen-Simulation unter Berücksichtigung der hygrischen Prozesse in den Gebäudewänden, Dissertation, TU Dresden Fakultät für Maschinenwesen, 2000
- [7] Seifert, J.: Zum Einfluss von Luftströmungen auf die thermischen und aerodynamischen Verhältnisse in und an Gebäuden. Dissertation, TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, 2005
- [8] Gritzki, R., Perschk, A., Richter, W., Rösler, M.: Gekoppelte Simulation zur Spezifikation von Heiz- und Kühlkörpern, Tagungsband BauSIM 2008, Kassel 2008
- [9] Geist, A. et al: PVM: Parallel Virtual Machine – a users guide and tutorial for networked parallel computing, MIT Press, Cambridge, Mass. 1994
- [10] Richter, W.: Handbuch der thermischen Behaglichkeit – Heizperiode - ;Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Dortmund/Berlin/Dresden, 2003
- [11] 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

### 5.8. Literatur zu Thermische Simulationen

- [Lechner et al 2010] Lechner R. et al: PH Office: Standard für energieeffiziente Bürobauten. Haus der Zukunft, Wien, 2010
- [Schnieders 2009] Schnieders, Jürgen: Passive Houses in South West Europe. Passivhausinstitut, Darmstadt, 2009
- [IBO 2008] IBO (Hg.): Passivhaus-Bauteilkatalog – Ökologisch bewertete Konstruktionen / Details for Passive Houses – A catalogue of ecologically rated constructions. Wien: Springer 2008

# 8 Anhang

## 8.1 Bauliche Varianten

### 8.1.1 Bauteilaufbauten opak

AW1		AW massiv hinterlüftet					
Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung						
		Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub> :	0,13		
				außen R <sub>sa</sub> :	0,13		
Teilfläche 1	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 2 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 3 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Summe Breite	
						Dicke [mm]	
1.	Spachtel		0,400			1	
2.	STB		2,300			180	
3.	Mineralwolle, therm.entk. Abstandhalter		0,040			320	
4.	Winddichtung Stamisol FI, sd=0,05m					0	
5.	Hinterlüftung					50	
6.	Eternit					8	
7.							
8.							
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe	
						55,9 cm	
				U-Wert:	0,120 W/(m <sup>2</sup> K)	Anforderung	
				Rw	65 dB	U 0,50	
						Rw 47	

AW1: Außenwand massiv hinterlüftet

AW2		AW Leichtbau hinterlüftet					
Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung						
		Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub> :	0,13		
				außen R <sub>sa</sub> :	0,13		
Teilfläche 1	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 2 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 3 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Summe Breite	
						Dicke [mm]	
1.	Gipskartonplatten		0,210			15	
2.	Steinwolle		0,040			80	
3.	Gipsfaserplatte		0,360			13	
4.	Dampfbremse luftdicht, PE E2 >0,25mm		0,250			0	
5.	Mineralwolle zwischen Holzständerwerk	Ständer		0,130		280	
6.	2x10mm Gipsfaserplatte		0,360			20	
7.	Winddichtung Stamisol FA, sd=0,05m					0	
8.	U-profile vertikal/ hinterlüftet					30	
9.	Faserzementplatten					8	
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe	
			12,0%			44,6 cm	
				U-Wert:	0,123 W/(m <sup>2</sup> K)	Anforderung	
				Rw	65 dB	U 0,50	
						Rw 47	

AW2: Außenwand Leichtbau hinterlüftet

DE1		Decke Estrich						
Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung	Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub>	0,17			
				außen R <sub>sa</sub>	0,17			
Teilfläche 1	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 2 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 3 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Summe Breite		
						Dicke [mm]		
1. Teppichboden	0,170					5		
2. Estrich	1,400					60		
3. PAE-Folie						0		
4. EPS T 32/30 (EPS 1000)	0,040					30		
5. Beschüttung, EPS Zementgebunden	0,130					50		
6. STB	2,300					280		
7.								
8.								
9.								
10.								
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe		
						<b>42,5</b>	cm	
						<b>Anforderung</b>		
						U	<b>0,90</b>	
						Rw	<b>58</b> dB	
						Ln,w	<b>48</b> dB	
						U-Wert:	<b>0,60</b> W/(m <sup>2</sup> K)	
						Rw	<b>67</b> dB	
						Ln,w	<b>38</b> dB	

DE1: Decke mit Estrich

DE2		Decke Doppelboden						
Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung	Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub>	0,17			
				außen R <sub>sa</sub>	0,17			
Teilfläche 1	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 2 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 3 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Summe Breite		
						Dicke [mm]		
1. Teppichboden	0,170					5		
2. Doppelboden, z.B. Calciumsulfatplatte	0,130					32		
3. Hohlraum, z.B. Dibo-Boden oder gleichwertig	0,600	Luftraum				100		
4. Mineralwolle als Hohlraumdämpfung	0,040					30		
5. STB	2,300					280		
6.								
7.								
8.								
9.								
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe		
						<b>44,7</b>	cm	
						<b>Anforderung</b>		
						U	<b>0,90</b>	
						Rw	<b>58</b> dB	
						Ln,w	<b>48</b> dB	
						U-Wert:	<b>0,60</b> W/(m <sup>2</sup> K)	
						Rw	<b>67</b> dB	
						Ln,w	<b>38</b> dB	

DE2: Decke mit Doppelboden

DE1b Decke Estrich mit abgehängter Akustikdecke						
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung		Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub> : 0,17		
				außen R <sub>se</sub> : 0,17		
Teilfläche 1	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 2 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 3 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Summe Breite Dicke [mm]
1. Teppichboden	0,170					5
2. Estrich	1,400					60
3. PAE-Folie						0
4. EPS T 32/30 (EPS 1000)	0,040					30
5. Beschüttung, EPS Zementgebunden	0,130					50
6. STB	2,300					280
7. Luftraum	0,176					30
8. Glaswolle	0,040	40kg/m <sup>3</sup>				40
9. Gipskartonplatte	0,210					15
10.						
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
						51,0 cm
				U-Wert: 0,34 W/(m <sup>2</sup> K)	Anforderung U 0,90	
				Rw 67 dB	Rw 58 dB	
				Ln,w 38 dB	Ln,w 48 dB	

DE1b: Decke mit Estrich und abgehängter Akustikdecke

DE2b Decke Doppelboden mit abgehängter Akustikdecke						
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung		Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub> : 0,17		
				außen R <sub>se</sub> : 0,17		
Teilfläche 1	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 2 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 3 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Summe Breite Dicke [mm]
1. Teppichboden	0,170					5
2. Doppelboden, z.B. Calciumsulfatplatte	0,130					32
3. Hohlraum, z.B. Dibo-Boden od gleichwertig	0,600	Luftraum				100
4. Mineralwolle als Hohlraumdämpfung	0,040					30
5. STB	2,300					280
6. Luftraum	0,176					30
7. Glaswolle	0,040	40kg/m <sup>3</sup>				40
8. Gipskartonplatte	0,210					15
9.						
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
						53,2 cm
				U-Wert: 0,35 W/(m <sup>2</sup> K)	Anforderung U 0,90	
				Rw 67 dB	Rw 58 dB	
				Ln,w 38 dB	Ln,w 48 dB	

DE2b: Decke mit Doppelboden und abgehängter Akustikdecke

De3		Decke Leichtbau						
Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung	Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub>	0,17			
				außen R <sub>sa</sub>	0,17			
Teilfläche 1	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 2 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 3 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Summe Breite		
						Dicke [mm]		
1. Teppichboden	0,170					5		
2. Doppelboden, z.B. Calciumsulfatplatte	0,130					32		
3. Hohlraum, z.B. Dibo-Boden od gleichwertig	0,600	Luftraum				100		
4. Mineralwolle als Hohlraumdämpfung	0,040					30		
5. Holzlattung	0,130					40		
6. Schüttung	0,700					50		
7. Holzschalung	0,130					25		
8. Luftraum	0,176					30		
9. Glaswolle	0,040	40kg/m <sup>3</sup>				40		
10. Gipskartonplatte	0,210					15		
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe		
						<b>36,7</b>	cm	
						<b>Anforderung</b>		
		U-Wert:	<b>0,30</b>	W/(m <sup>2</sup> K)	U	<b>0,90</b>		
		Rw	<b>67</b>	dB	Rw	<b>58</b>	dB	
		Ln,w	<b>38</b>	dB	Ln,w	<b>48</b>	dB	

DE3: Decke Leichtbau

IW1		Leichtbauwand						
Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung	Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub>	0,13			
				außen R <sub>sa</sub>	0,13			
Teilfläche 1	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 2 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 3 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Summe Breite		
						Dicke [mm]		
1. GKP	0,210					12,5		
2. Steinwolle zw. C-Profilen	0,040					75,0		
3. GKP	0,210					12,5		
4.								
5.								
6.								
7.								
8.								
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe		
						<b>10,0</b>	cm	
						<b>Anforderung</b>		
		U-Wert:	<b>0,44</b>	W/(m <sup>2</sup> K)	U	-		
		Rw	<b>47</b>	dB	Rw	-		

IW1: Innenwand als Leichtbauwand

IW2		Glaswand						
Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung	Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub>	0,13			
				außen R <sub>sa</sub>	0,13			
Teilfläche 1	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 2 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Teilfläche 3 (optional)	λ <sub>[W/(mK)]</sub>	Summe Breite		
						Dicke [mm]		
1. VSG	1,000					8,0		
2.								
3.								
4.								
5.								
6.								
7.								
8.								
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe		
						<b>0,8</b>	cm	
						<b>Anforderung</b>		
		U-Wert:	<b>3,73</b>	W/(m <sup>2</sup> K)	U	-		
		Rw	<b>50</b>	dB	Rw	-		

IW2: Innenwand als Glaswand

## 8.1.2 Fenster

<b>FE1</b>		
Ug	0,6	W/m <sup>2</sup> K
Ur	0,9	W/m <sup>2</sup> K
Psi	0,035	W/m <sup>2</sup> K
g-Wert	50	%
Uw	0,77	W/m <sup>2</sup> K

FE1: Fenster1

<b>FE2</b>		
Ug	0,6	W/m <sup>2</sup> K
Ur	1,2	W/m <sup>2</sup> K
Psi	0,05	W/m <sup>2</sup> K
g-Wert	50	%
Uw	0,79	W/m <sup>2</sup> K

FE2: Fenster2

<b>FE3</b>		
Ug	0,6	W/m <sup>2</sup> K
Ur	0,9	W/m <sup>2</sup> K
Psi	0,035	W/m <sup>2</sup> K
g-Wert	30	%
Uw	0,77	W/m <sup>2</sup> K

FE3: Fenster3