

# Kunstmuseum Stuttgart

## ***Entwicklung der Klimakonzepte***

Von Diplomphysiker Andreas Niewianda, DS-Plan GmbH Stuttgart

Alles andere als alltäglich präsentierten sich zum Projektstart die Herausforderungen an die Planer der Raumklimakonzepte des Kunstmuseums Stuttgart. Der Schwerpunkt der Aufgaben lag in der Entwicklung von Systemen, die ganzjährig eine hohe thermische Behaglichkeit im äußeren Glaskubus gewährleisten und die gleichzeitig energiesparend und ressourcenschonend arbeiten. Unter Leitung der Architekten wurde ein interdisziplinäres Team aus Bauphysikern, Fassadenberatern, Lichtplanern und Gebäudetechnikern zusammengestellt. Zur Unterstützung der Planung wurde der Fachbereich Energiemanagement von DS-Plan engagiert. Was zunächst nur als Konzeptentwicklung für eine gesteuerte natürliche Belüftung des äußeren Glaskubus und Simulationen der sich im Jahresverlauf einstellenden Temperaturen angedacht war, entwickelte sich im Verlauf des Projekts zu einer umfangreichen Beratungs- und Konzeptentwicklungstätigkeit, in der fast das gesamte Spektrum der Simulationswerkzeuge von DS-Plan zum Einsatz kam.

Es stellte sich bald heraus, dass das Gebäude mit der nun eingesetzten, innovativen Technik nicht ohne den Einsatz von modernsten Simulationswerkzeugen geplant werden können hätte. Die im Wettbewerb vorgeschlagenen Ansätze des Planungsbüros PIV für die Gebäudetechnik des extrovertierten Glaskubus und der unterirdischen Bereiche wurden im Verlauf der Entwurfsplanung durch den Einsatz der Simulationen zur Umsetzungsreife entwickelt und durch die Ideen der DS-Plan-Fachleute abgerundet und optimiert. Darüber hinaus wurden weitere, innovative Elemente integriert, wie zum Beispiel die als Sonnenschutz fungierenden Multifunktionslamellen zur Heizung und Kühlung in der Ebene 4. Doch dazu später.

### **Raumklimakonzept Ebene 4**

Die Ebene 4 war ursprünglich als Dachgarten konzipiert und sollte nur in der warmen Jahreszeit für Veranstaltungen am Abend genutzt werden. Dafür war eine natürliche Lüftung mit einem auffahrbaren Glasdach angedacht. Im Verlauf des Projekts erweiterten sich die Nutzungsvorstellungen. Zum Abschluss der Genehmigungsplanung war eine Nutzung als Veranstaltungsbereich mit Vorträgen auch im Winter mit bis zu 400 Personen vorgesehen.

Das Gebäudetechnikkonzept sah eine Fußbodenheizung vor. Darüber hinaus war eine Lüftungsanlage mit einer Luftmenge von ca. 16.000 m<sup>3</sup>/h für die Frischluftversorgung vorgesehen. Mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen konnte gezeigt werden, dass mit den ursprünglich vorgesehenen Weitwurfdüsen die Behaglichkeitskriterien wegen zu hoher Luftgeschwindigkeiten nicht gewährleistet werden können. Stattdessen wurden nun Schlitzauslässe auf der Einhausung der Küche und entlang den Fassaden vorgeschlagen (siehe Abbildung 1). Damit ließen sich die Luftgeschwindigkeiten im Winter gegenüber der Variante mit Weitwurfdüsen deutlich reduzieren (Abbildung 2). Die Schlitzauslässe entlang der Fassade wirken darüber hinaus einem Kaltluftabfall entgegen.

## **Konzept der natürlichen Lüftung**

Das Konzept der natürlichen Lüftung der Ebene 4 wurde dazu parallel von DS-Plan entwickelt. Dazu wurden Abluftöffnungen im Glasdach vorgesehen, die auch als Rauchabzug im Brandfall fungieren. Die Klappen werden in Abhängigkeit der Wettersituation und Innenraumtemperatur geöffnet. Wegen der Möglichkeit zur natürlichen Lüftung wird die mechanische Lüftungsanlage nur im Winter und an sehr heißen Sommertagen benötigt. So werden die Betriebskosten für Luftkühlung und Ventilatorstrom minimiert.

Die Zuluft gelangt über Klappen auf der Südwestfassade und über Klappen im Treppenhaus auf der Nordfassade in das Gebäude. Zwischen dem Treppenhaus und dem Veranstaltungsraum der Ebene 4 befinden sich über den Türen weitere Lüftungslamellen, so dass die Luft unter Nutzung der Auftriebshöhe von ca. 20 m in den Raum einströmen kann. Ein Strömungswächter stellt sicher, dass in der Betriebszeit die Strömungsgeschwindigkeiten nicht zu Zegerscheinungen führen. Hierzu wird die Belüftung über die Dachklappen gedrosselt (siehe Abbildung 3).

Die natürliche Lüftung wird automatisch gesteuert. Unterhalb einer Außenlufttemperatur von 12 °C wird die Lüftungsfunktion nur dann aktiviert, wenn in Folge von starker Solarstrahlung im Bereich der Ebene 4 eine Raumtemperatur von über 25 °C gemessen wird (Stufe 1). Oberhalb von Außenlufttemperaturen von 12 °C wird die mechanische Lüftungsanlage abgeschaltet und in Stufen die natürliche Lüftung aktiviert. Bis zu einer Außenlufttemperatur von ca. 18 °C wird z.B. nur die erste der 5 Dachklappen geöffnet (Stufe 2).

Bei höheren Außenlufttemperaturen bis 24 °C gehen die Abluftklappen im Dach vollständig auf. Zur Vermeidung von Zegerscheinungen wird die Zuluftgeschwindigkeit im Bereich der Ebene 4 gemessen. Bei Überschreitung von im Betrieb flexibel einstellbaren Schwellwerten wird der Zuluftstrom durch Schließen der Abluftklappen wieder gedrosselt (Stufe 3). Diese Betriebsstufe wird auch für die Nachtauskühlung genutzt (siehe Abbildung 4).

Erst oberhalb von Außenlufttemperaturen von 24 °C werden die Klappen in der Südwestfassade geöffnet. Damit ist die maximale Durchlüftung der Ebene 4 erreicht. Eine Strömungssimulation für diesen Betriebsfall im Sommer zeigt Abbildung 5.

Bei sehr hohen Außenlufttemperaturen werden die Lüftungsklappen geschlossen und die mechanische Lüftung wird aktiviert. So wird ein weiteres Aufheizen über die Behaglichkeitsgrenzen hinaus vermieden.

## **Multifunktionslamellen Ebene 4**

Eine Besonderheit der Ebene 4 des Kunstmuseums ist der Bereich mit Multifunktionslamellen mit einer Fläche von ca. 240 m<sup>2</sup> (Abbildung 6). Die Idee zur Entwicklung dieser Lamellen-Heiz-Kühldecke entstand unter dem Aspekt, dass in der Ebene 4 Vortragsveranstaltungen mit sitzenden Zuhörern möglich sein sollten. Um den Gästen einen aktiven Sonnenschutz unter dem Glasdach anbieten zu können, wurde der Einsatz von horizontal montierten, drehbaren Lamellen vorgeschlagen, um im Winter die Sonnenstrahlung zur Nutzung der solaren Energiegewinne durchzulassen und im Sommer ausreichend Schatten zu spenden. Die Lamellen sind von oben mit einer gut reflektierenden Oberfläche und einer Wärmedämmschicht versehen. Auf diese Weise wird die an den Lamellen absorbierte Strahlung weitestgehend nach oben abgegeben und erhöht nicht die Wärmelast auf die Nutzungsbereiche. Die entstehende Wärme wird bei offenen Lüftungsklappen durch das Dach

abgeführt. Weiterhin werden die Lamellen auf ihrer Unterseite mit wasserdurchströmten Heiz-/Kühlregistern versehen und fungieren somit als Heiz-Kühldecke. Die Gäste befinden sich demzufolge in einem Bereich, der sowohl von unten über die Fußbodenheizung/-kühlung als auch von oben über die Multifunktionslamellen behaglich temperiert wird. Als Zusatznutzen sind die Lamellen auf Vorschlag des Bauphysikers mit schallabsorbierenden Materialien belegt, die zur Dämpfung der Schallreflexionen beitragen.

Die Temperaturverteilung in der Ebene 4 mit diesen Lamellen wurde in einer Strömungssimulation ermittelt. Die Ergebnisse für den Sommerfall sind in Abbildung 7 dargestellt. Man erkennt, dass trotz hoher Temperaturen unter dem Dach die thermische Behaglichkeit unterhalb der Lamellen deutlich verbessert werden kann. In Extremfällen muss im Sommer zur Verbesserung der Raumklimawerte die mechanische Lüftungsanlage herangezogen werden.

### **Raumklimakonzept Umgang Kubus**

Die transparente Hülle der Ausstellungsbereiche des Kubus erstreckt sich von der Ebene 1 bis Ebene 3. Zur Pufferung von Energieeinträgen über Solarstrahlung werden die mit Naturstein verkleideten Wände und die Böden des Kubus herangezogen. Im Mörtelbett zwischen Beton und Naturstein sind Rohrschlangen verlegt, die im Sommer mit kühlem Wasser (minimal ca. 16 °C) durchströmt werden. Auch die Fußböden der Umgänge sind mit einer Bauteilaktivierung ausgestattet. In Folge der Pufferwirkung der massiven Bauteile erfolgt auch bei starker Sonneneinstrahlung nur ein allmählicher Temperaturanstieg der Lufttemperaturen. Mit Hilfe der aktiven Kühlung der Wände und der Böden wird die Wärme zeitversetzt wieder abgeführt. Die hohen Vorlauftemperaturen der Bauteilkühlung erlauben eine maximale Ausnutzung des Freikühlbetriebs ohne Kältemaschine.

Im Winter werden die Wände und Böden mit niedrigen Vorlauftemperaturen beheizt, um auch in der kalten Jahreszeit ein behagliches Raumklima in den Umgängen herzustellen.

Zur Verhinderung einer zu starken Aufheizung der Umgänge bei direkter Sonneneinstrahlung wird eine speziell für das Projekt angepasste, bedruckte Sonnenschutzverglasung eingesetzt. Zur Erzielung einer optimalen Sonnenschutzfunktion waren DS-Plan's Kenntnisse des Glasmarkts hilfreich. Durch die aktive Mitarbeit am Konzept der Glasaufbauten konnte ein über die bedruckten Bereiche gemittelter g-Wert von ca. 24 % erreicht werden. Für eine transluzente Ganzglasfassade ohne außen liegenden Sonnenschutz ist dies ein sehr guter Wert.

Ein zusätzlicher, innen liegender Sonnenschutz ist bei diesem Konzept nicht erforderlich, da die im Abstand von weniger als 2 m hinter der Verglasung liegende Wand die Strahlungsreflektion und Kühlung übernimmt und die äußeren Wärmelasten so nur zu einem geringen Teil im Raum wirksam werden. Wäre ein innen liegender Sonnenschutz verwendet worden, läge die Luftmenge für die Kühlung in Folge der höheren konvektiven Wärmeeinträge deutlich höher.

Um die Ausstellung von hochwertigen Kunstwerken aus aller Welt zu ermöglichen, fordern Sachversicherer für wertvolle Exponate eine strikte Einhaltung von Luftfeuchtenwerten von 55 % + - 5%. Die Besucher gelangen über große Türen von den Umgängen in die Ausstellungsräume. Bei Museumsbetrieb findet in Folge dessen ein ständiger Luft- und Feuchtigkeitsaustausch zwischen dem verglasten Umgang und innerem Kubus statt. Um zu vermeiden, dass sich Schwankungen der Luftfeuchtigkeit von den Umgängen auf die Ausstellungsebenen auswirken, wird die absolute Luftfeuchtigkeit in den Umgängen auf die

der Ausstellungsräume geregelt. Zum Ausgleich dieser Schwankungen ist in den Umgängen der Ebenen 1 bis 3 eine Lüftungsanlage mit einem bis zu ca. 5-facher Luftwechsel vorgesehen. Das Regelverhalten der Systeme zur Be- und Entfeuchtung wird durch die Pufferwirkung der gekühlten massiven Bauteile unterstützt und die Kühlleistung der Luftkühler kann über weite Teile der Betriebszeit deutlich reduziert werden.

### **Simulation der Kühlung der Ausstellungsräume**

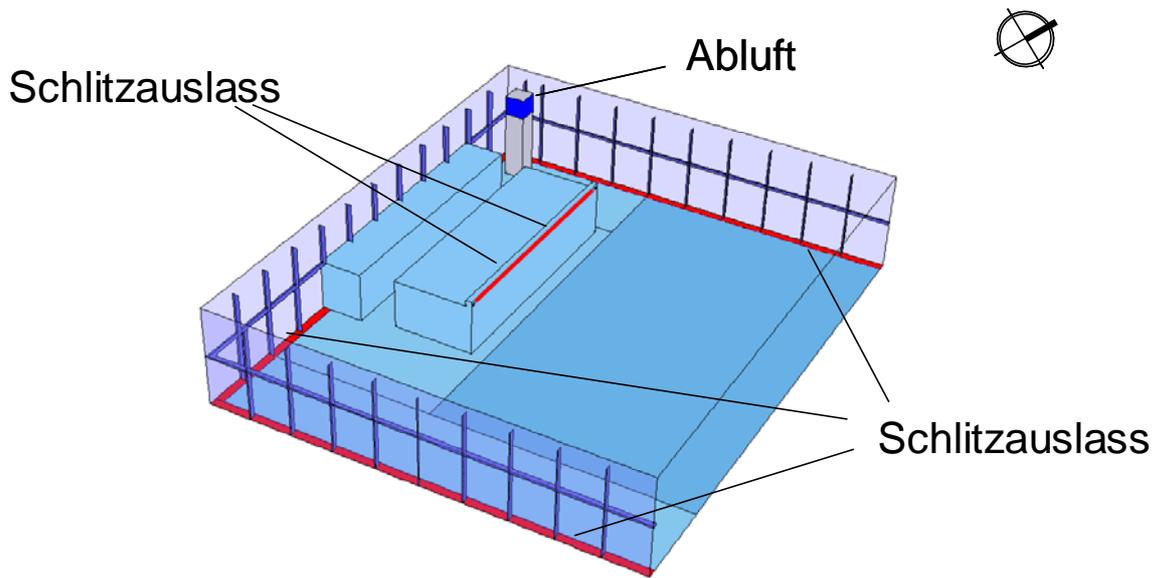
Das Kühlkonzept der Ausstellungsräume ist in Abbildung 8 dargestellt. Es werden Lichtdecken installiert, die durch streuende Folien von den Räumen abgetrennt sind. Zwischen den gekühlten Betondecken und diesen Folien sind die Leuchtmittel installiert. Die konvektive Wärmeabgabe der Leuchten wird mit der Abluft, die durch den Deckenhohlraum geführt wird, abgesaugt. Ein Großteil der radiativen Wärmeabgabe wird durch die Betonkernkühlung der Massivdecke abgeführt. Das sichtbare Licht, das im Ausstellungsbereich als Wärmelast wirksam wird, wird über die Luftkühlung und die Fußbodenkühlung abgeführt. Mit Simulationen konnte gezeigt werden, dass dieses System auch bei Effektbeleuchtung mit Strahlern mit nicht zu hohen Wärmelasten für eine ausreichende Entwärmung der Galerie genutzt werden kann. Voraussetzung ist der 24-stündige Betrieb der Kühlung, da Wärmelasten von bis zu  $70 \text{ W/m}^2$  wirksam werden.

Einen Temperaturverlauf über mehrere Tage zeigt Abbildung 9. Man erkennt, dass sich hohe Temperaturen im Bereich der Lichtdecke einstellen, die darunter liegenden Räume aber angenehm kühl gehalten werden können. Das höhere Temperaturniveau der Abluft erlaubt in dieser Betriebsart eine sehr effektive Rückkühlung. Weiterhin können auch für den Betrieb der Ausstellungsräume über weite Teile des Jahres die Rückkühlwerke ohne aktiven Kältemaschineneinsatz genutzt werden.

### **Fazit**

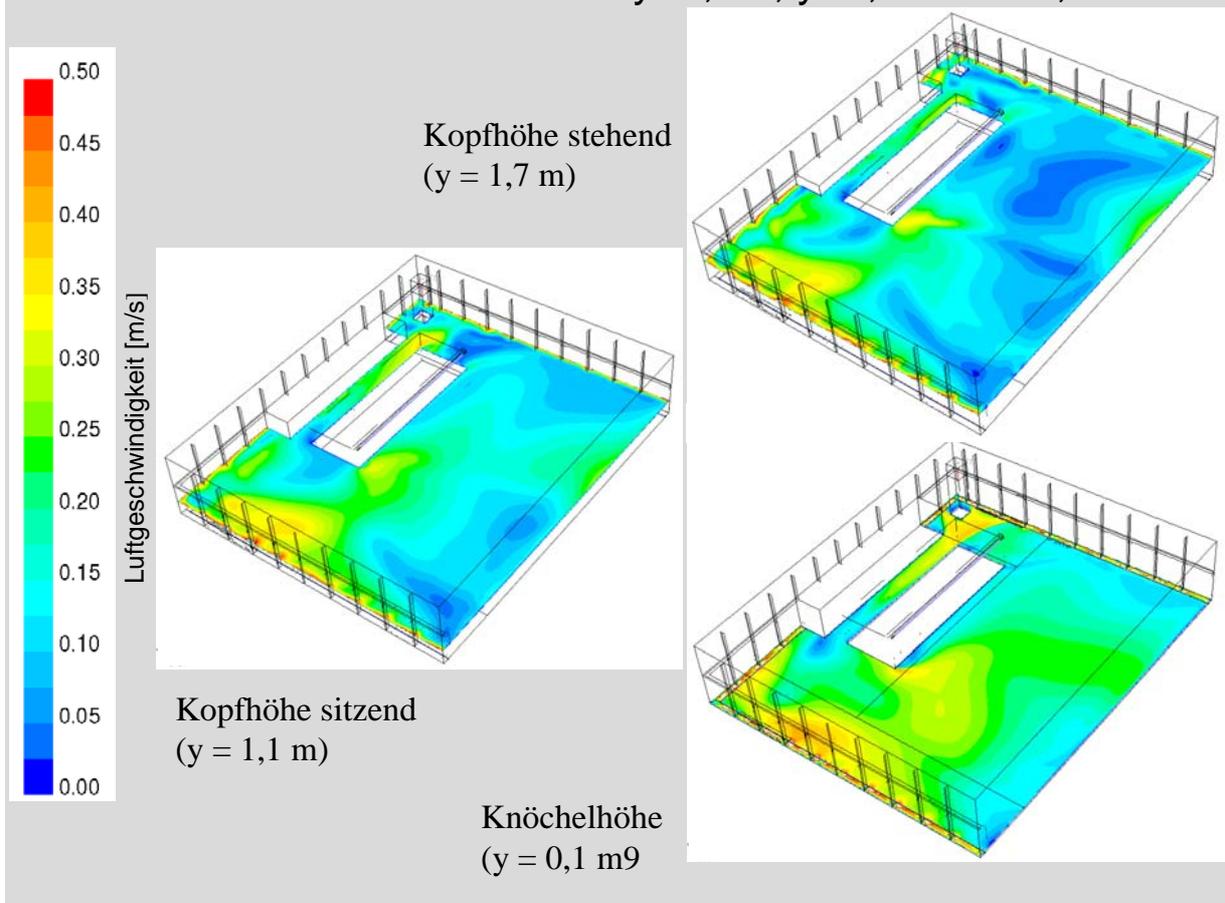
Für das Kunstmuseum Stuttgart wurden neue Wege hinsichtlich der Raumklimasysteme für Museen eingeschlagen und konsequent mit Simulationsrechnungen zur Anwendungsreife entwickelt. Die Dachterrasse des Museums ist durch das ausgeklügelte Konzept der Heizung und Kühlung in Kombination mit der Sonnenschutzisolierverglasung im Sommer und Winter nutzbar. Die Forderung der Stadt Stuttgart nach einer 25%-igen Unterschreitung der Wärmeschutzverordnung 1995 konnte ebenfalls erfüllt werden. Durch die größtenteils eingesetzten Flächenkühlssysteme und die intelligente Ablufführung über Lichtdecken können über einen großen Teil der Kühlperiode die Rückkühlwerke und die Außenluft für die Kühllastabfuhr genutzt werden. Die natürliche Lüftung der Ebene 4 erlaubt zusätzlich eine Nachluftspülung und trägt damit ebenfalls zur Energieeinsparung bei. Durch die in der Planung gefundenen Lösungen konnten die Investitions- und Betriebskosten in erheblichem Umfang reduziert werden. Auf lange Sicht werden damit sowohl die Finanzen der Stadt Stuttgart als auch die Umwelt geschont.

**Abbildungen:**



**Abbildung 1: Umpositionierung der ursprünglich als Weitwurfdüsen ausgebildeten Zuluftauslässe entlang der Fassade und auf der Einhausung der Küche.**

- horizontale Schnittebenen in  $y=0,1\text{m}$ ,  $y=1,1\text{m}$  und  $1,7\text{m}$  Höhe



**Abbildung 2: Strömungsgeschwindigkeiten bei Betrieb der mechanischen Lüftung nach Umplanung auf Schlitzauslässe an Stelle von Weitwurfdüsen.**

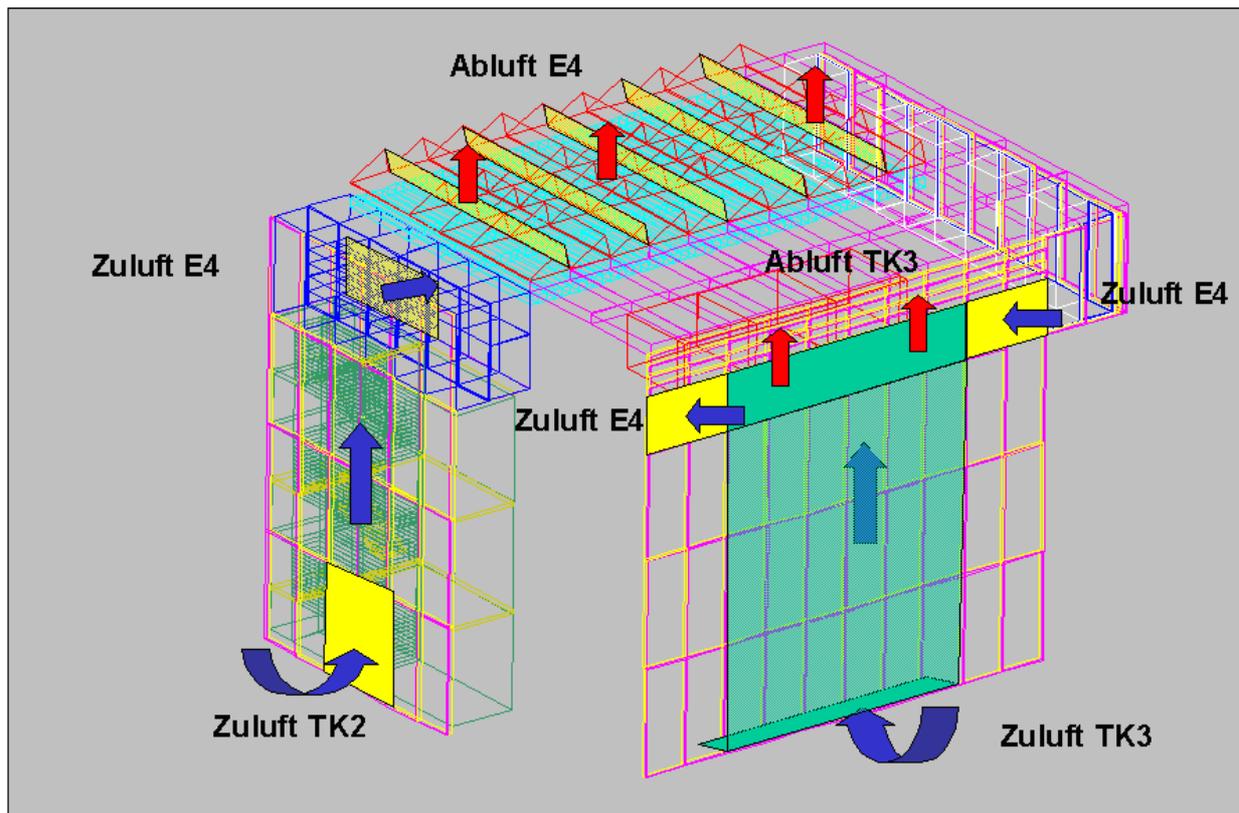


Abbildung 3: Konzept der natürlichen Lüftung des Fluchttreppenhauses und der Ebene 4.

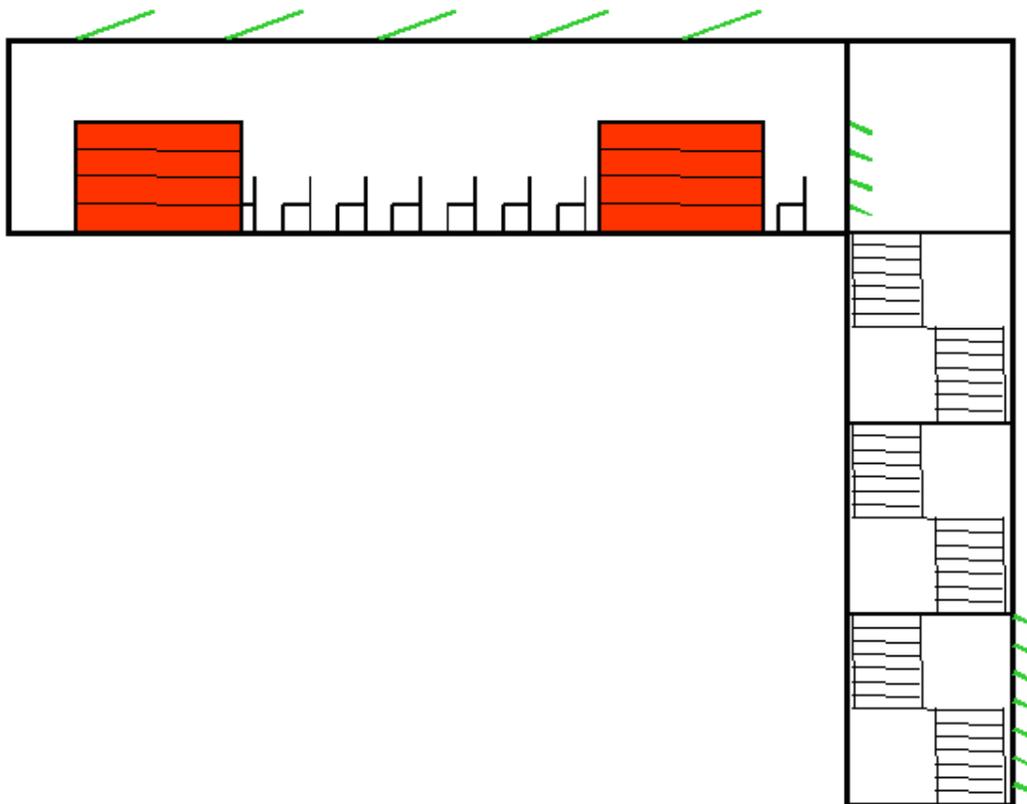
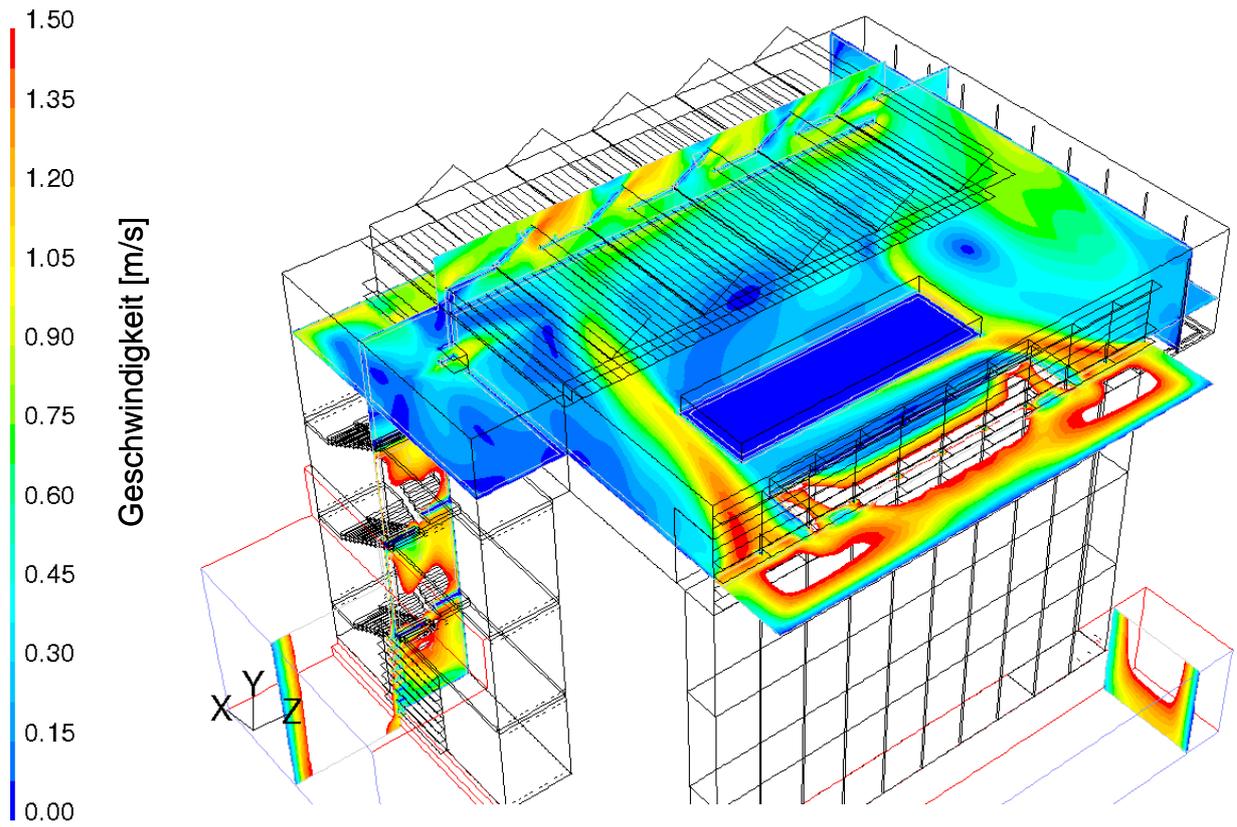


Abbildung 4: Stufe 3 der natürlichen Lüftung. Gedrosselter Sommerlüftungsfall. Treppenhaus 2 geöffnet, Dach ganz geöffnet, Klappen Südwest geschlossen. Gilt, wenn  $24\text{ °C} > T_a > 18\text{ °C}$  und ggf. bei Nachlüftung nach heißen Tagen. Die Fußbodenkühlung ist in Betrieb. Die Kühldecke ist je nach Empfindungstemperatur in Zone 4 ein- oder ausgeschaltet.



**Abbildung 5: Luftgeschwindigkeiten bei vollständig geöffneten Klappen im Dach und in der Südwestfassade.**

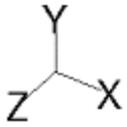
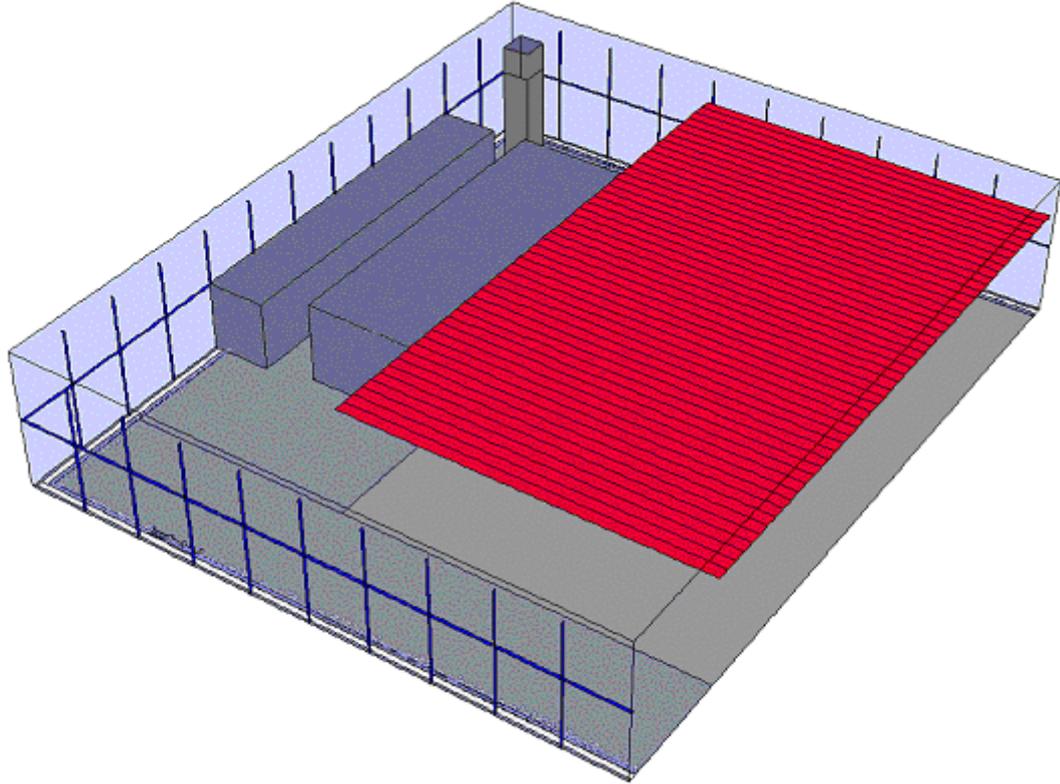
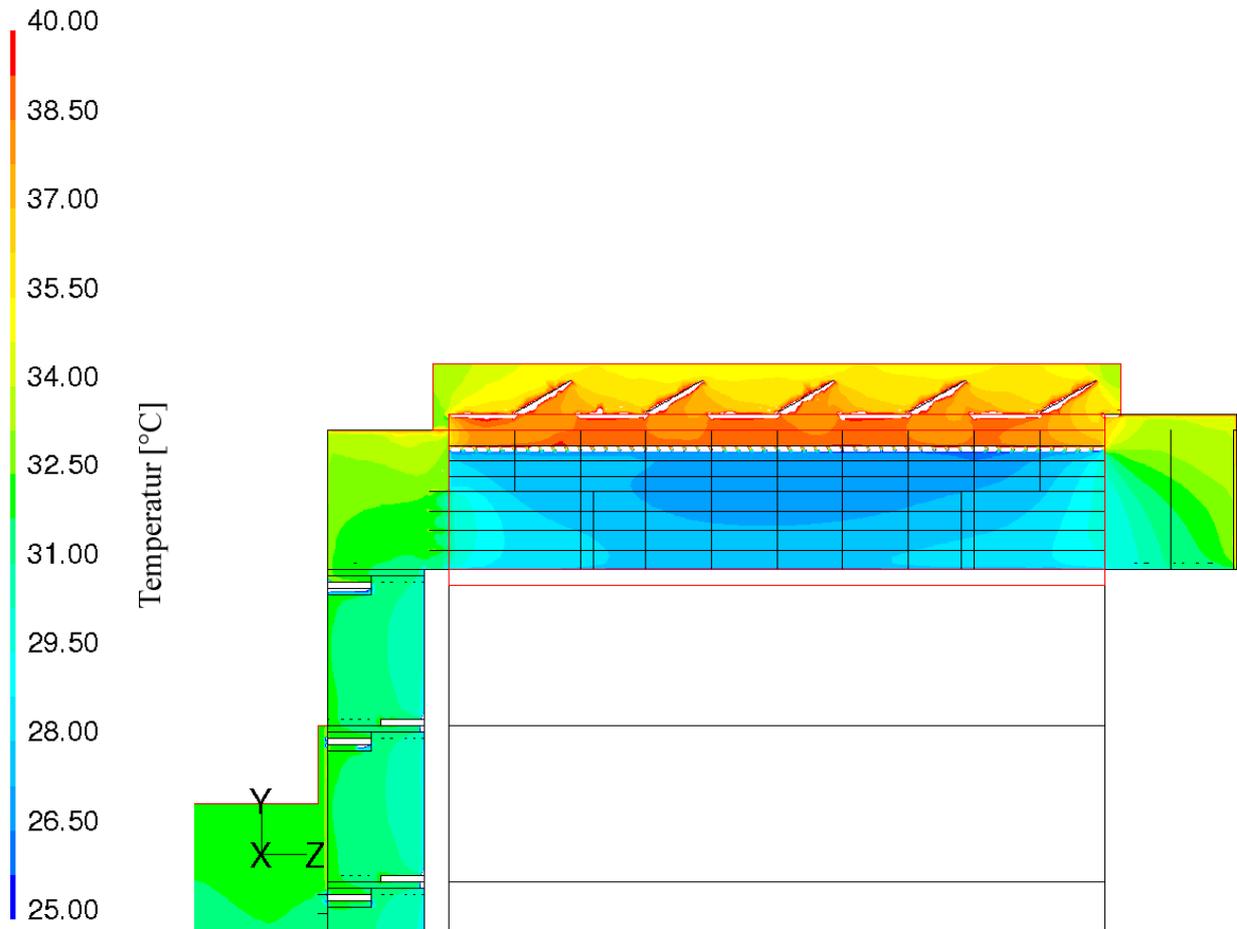


Abbildung 6: Ebene 4 mit Multifunktionslamellen-Feld (rot).



**Abbildung 7: Schnitt durch die Ebene 4 im Hochsommer bei geöffneten Lüftungsclappen und Betrieb der Flächenkühlssysteme (Fußbodenkühlung und Multifunktionslamellen). Die hier dargestellte Temperaturverteilung kann bei Betrieb der mechanischen Lüftung noch verbessert werden.**

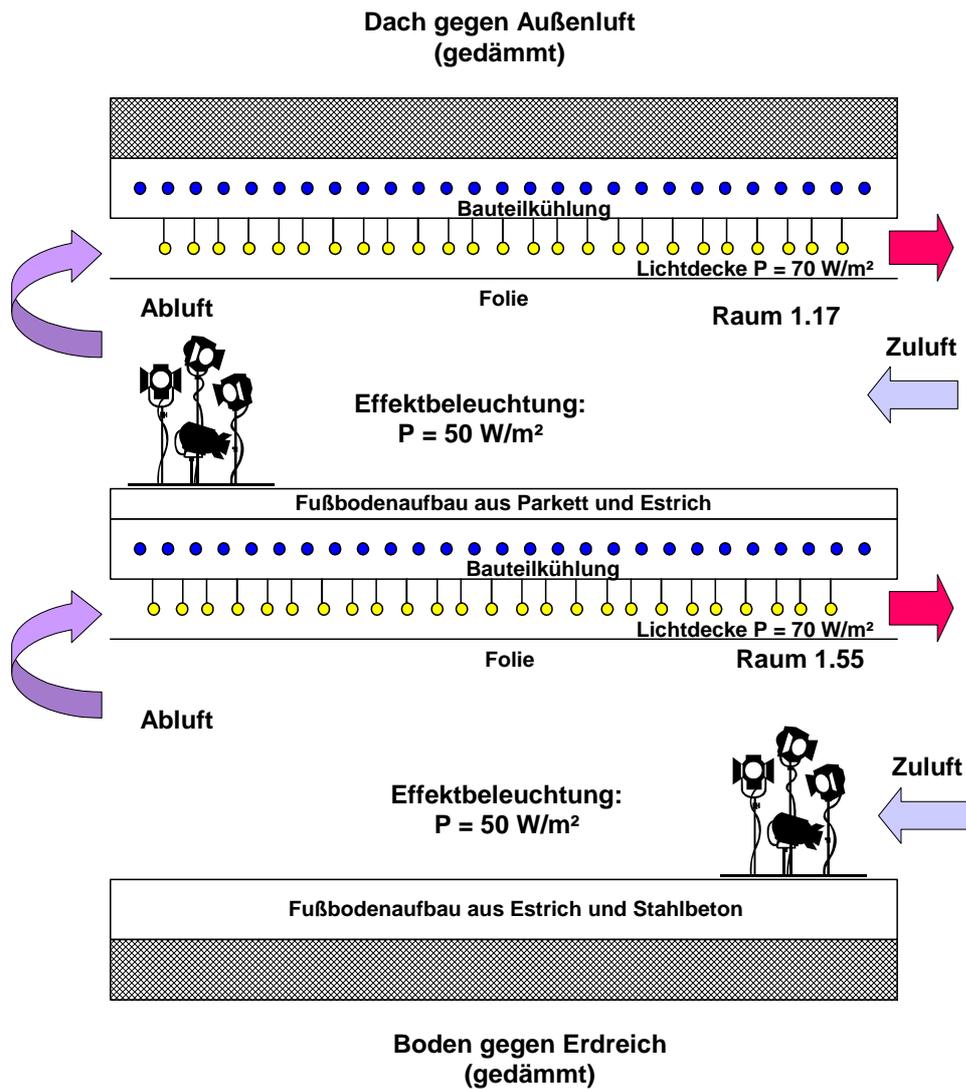


Abbildung 8: Prinzip-Schnitt für das Konzept der Kühlung der Ausstellungsräume. Es ist entweder die Lichtdecke oder die Effektbeleuchtung in Betrieb.

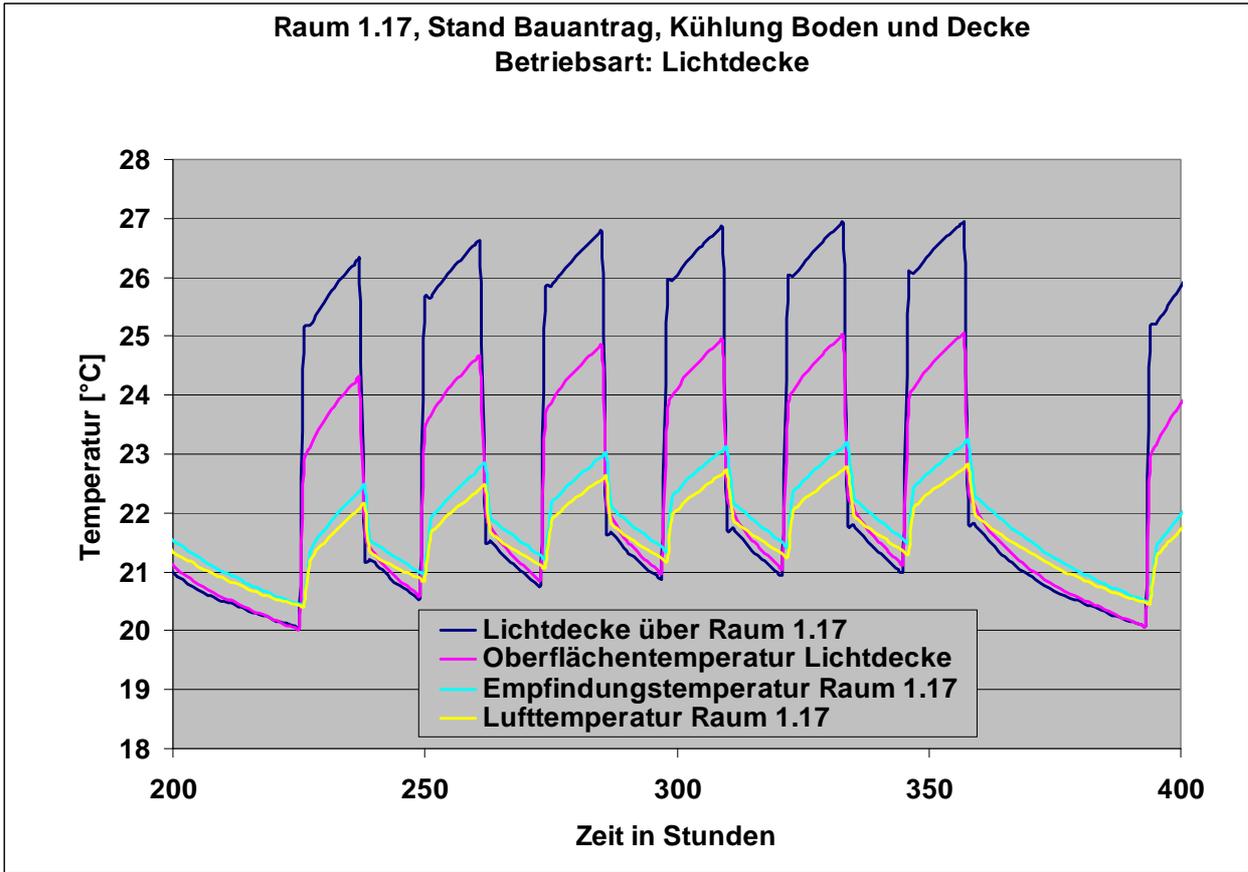


Abbildung 9: Simulation der Kühlung eines Ausstellungsraums in der Betriebsart Lichtdecke.