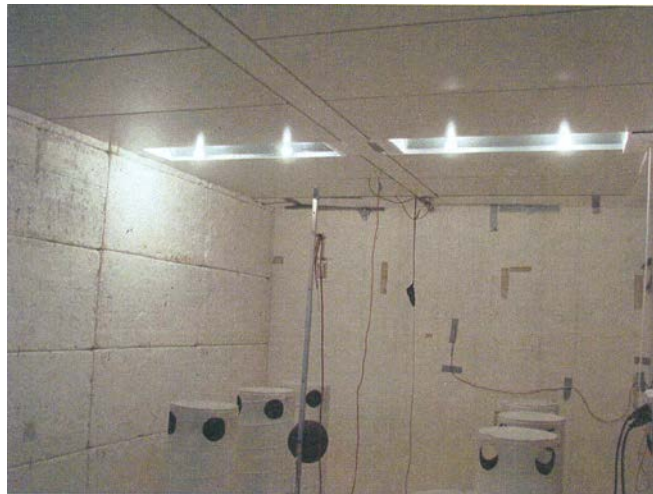


## **Bericht über die Ergebnisse von FEM-Vergleichsrechnungen**

(im Auftrag der Firma Beka Heiz- und Kühlmatten GmbH)

zu Messungen an einem Testraum zu Projekt \*\*\*/Frankfurt a.M.



### **Abstract**

Mit dem Angebot einer modernen Finite-Elemente-Berechnungssoftware ist es erstmalig möglich, komplexe physikalische Prozesse und Abläufe sichtbar zu machen. Dabei können die verschiedenen Einflüsse und Quellen, welche zunächst unabhängig auf ein Gesamtsystem einwirken, in ihrer Gesamtwirkung bildlich und somit anschaulich dargestellt werden. Mit der Nachstellung einer aufwendigen Messreihe in einer Klimakammer mittels dieser Software kann die weitgehende Übereinstimmung dieser Berechnung mit den vorliegenden Messergebnissen nachgewiesen werden. Zusätzlich erhält man aber sofort Hinweise für Optimierungsmöglichkeiten, die sich im Experimentalfall nicht ergeben. Insbesondere liefert der Strömungsverlauf Aussagen, die im Experimentalfall schwer sichtbar zu machen sind. Es ist daher möglich, künftige Klimamessexperimente zuvor zu optimieren und vielleicht auch völlig zu ersetzen.

### **Einführung**

Für einen Kompetenzwettbewerb wurden als Nachweis für das Angebot der Klimatisierungsvariante des jeweiligen Anbieters Messungen an einem Testraum gefordert. Dieser Testraum musste einem nachgestellten Arbeitszimmer im Auftragsobjekt entsprechen. Die dafür durchgeführten Untersuchungen betrafen die drei geforderten Messungen für:

- eine Leistungsmessung Kühlfall
- eine Leistungsmessung Heizfall und
- eine Leistungsmessung Kühlfall mit einem Lastprofil

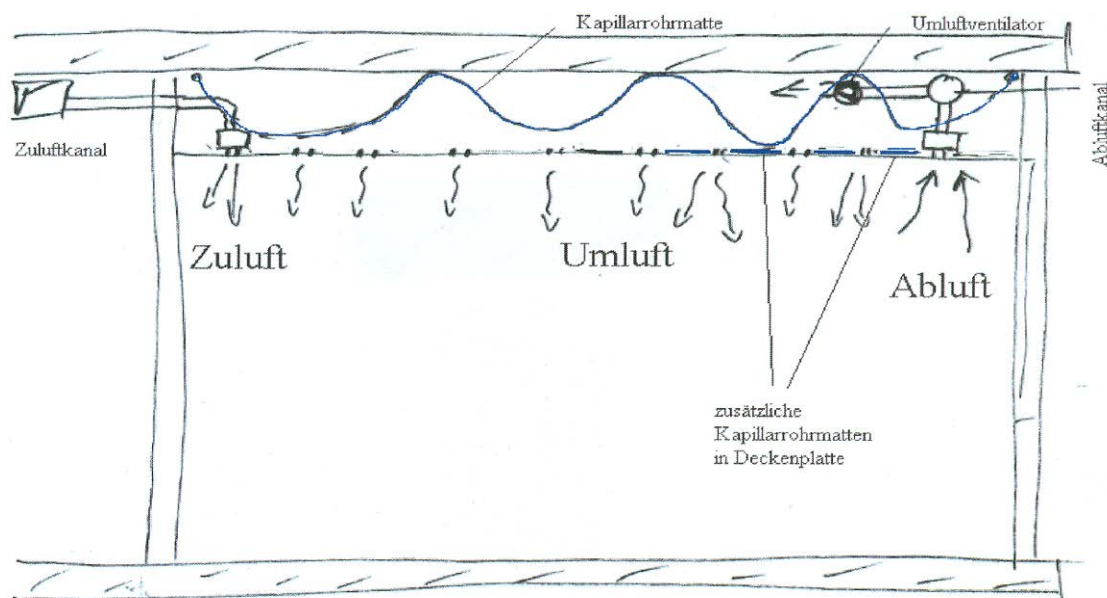
Ausgangsmaterial für die Messungen und die daraufhin erfolgten Berechnungen waren Forderungen und Angaben der Ausschreibung<sup>1</sup> zum Projekt \*\*\*/Frankfurt a.M. und die Festlegungen für den Test an der Klimakammer die in dem HLK - Untersuchungsbericht<sup>1</sup> festgehalten wurden.

In der FEM-Software Comsol Multiphysics™ wurden nun die Parameter der Testraum-messungen übernommen und somit ein direkter Vergleich der Methoden ermöglicht. Ziel dieses Vergleichs war der Nachweis der Aussagefähigkeit der FEM-Berechnungen, um mit anderen Modellen Voraussagen zur Raumklimatisierung zu treffen und vor allem auch Raumanordnungen zu optimieren.

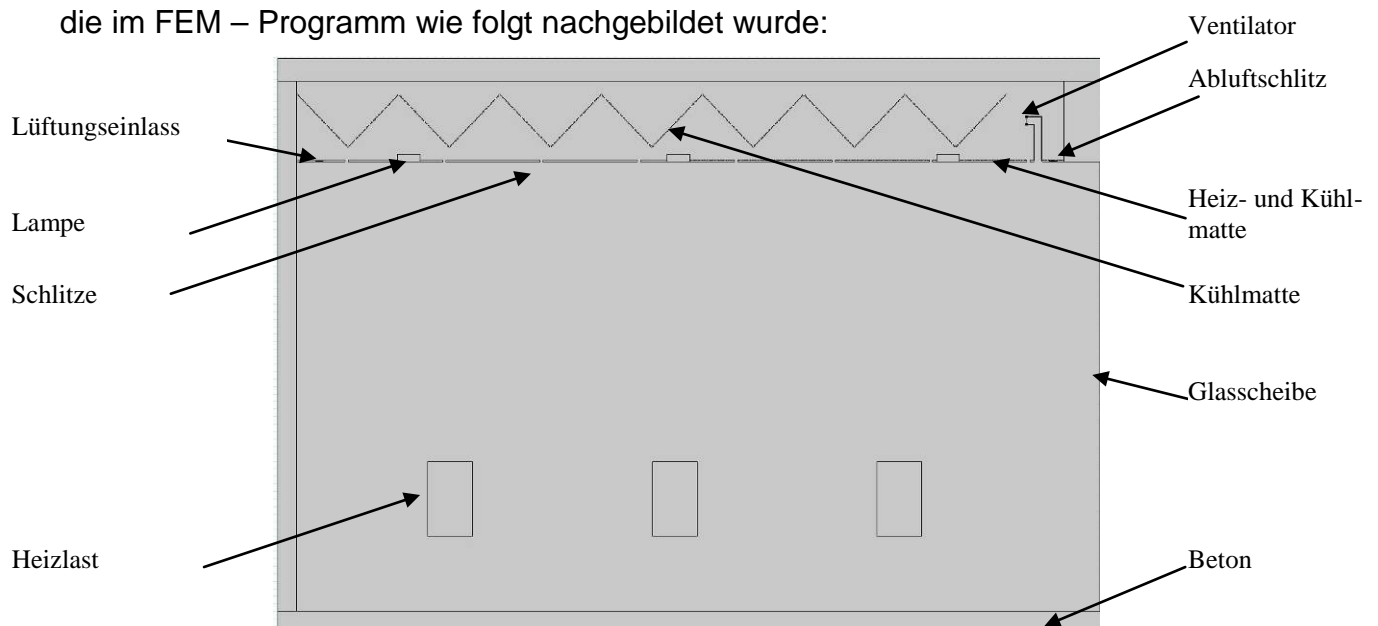
## Geometrie

Die Berechnungen wurden standardgemäß an einem 2D-Modell durchgeführt, um unter vereinfachten Bedingungen die wichtigen ersten Erkenntnisse zu gewinnen.

Als Vorbild für die Anordnung diente die Zeichnung für die weiterentwickelte Konzept-idee im HLK-Bericht:



die im FEM – Programm wie folgt nachgebildet wurde:



Die verwendeten Abmaße lauten:

Raumhöhe bis zur Zwischendecke:	3,00 m
Raumhöhe gesamt:	3,54 m
Dicke der Decken- und Bodenplatte:	0,15 m
Dicke der Innenwand:	0,125 m
Dicke der Glasscheibe:	0,01 m
Dicke der Betonblende über dem Fenster:	0,24 m
8 Schlitze:	0,02 m
Stärke der Zwischendecke:	0,008 m
Lampenformat:	0,05 x 0,15 m
Heizkörper in 0,5 m Höhe:	0,3 x 0,5 m
Kapillarendurchmesser:	0,13
Kapillarenabstand:	0,01 m
Anzahl der Kapillarrohre (horizontale Anordnung):	235 (2,35 m)
Anzahl der Kapillarrohre (horizontale Anordnung):	700 (7 m)

## **Material**

---

Nach der Eingabe der Geometrie müssen dem Programm die verwendeten Materialien genannt werden, wobei die mitgelieferte Materialdatenbank verwendet wurde. Dabei wurden folgende Materialien gewählt:

Luft unter Normaldruck

Stahl für die Zwischendecke, die Lampen, das Lüftungsrohr und die Heizkörper

Beton für alle Wände

Glas (Quarz) für die Glasscheibe

PP copolymer (Appryl 3120 MU 5) für die Heiz- und Kühlmatten

## **Physikalische Voraussetzungen**

---

Anschließend erfolgen im Programm die Angaben der physikalischen Voraussetzungen, der Randbedingungen und der Leistungseinträge. Für die nachfolgenden Berechnungen wurden folgende Voraussetzungen gemacht:

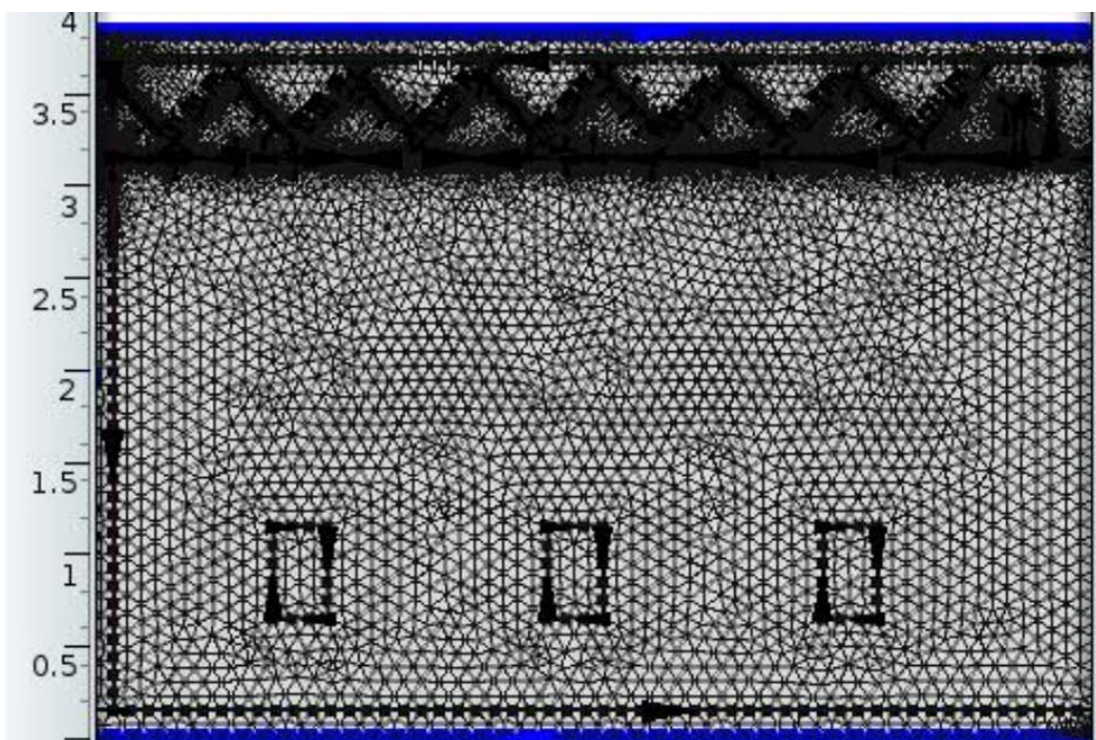
Wandtemperatur aller Innenwände:	24,0 °C
Start-Raumtemperatur:	22,0 °C
Glastemperatur im Heizfall:	-12,0 °C
Glastemperatur im Kühlfall:	32,0 °C
Temperatur der Zuluft:	18,0 °C
Starttemperatur der Kapillaren	17,5 °C

Flowrate der Zuluft/Abluft:	90 m <sup>3</sup> /h
Flowrate des Ventilators:	90 m <sup>3</sup> /h
Lampen-Heizleistung:	200 W
Leistung der Maschinenlast:	325 W
Kühlleistung der Kapillarrohrmatten:	950 W
Heizleistung der Kapillarrohrmatten:	1350 W
Volumenkraft von jedem Volumenelement:	$g_{\text{Erde}} \cdot \text{Volumenelement} \cdot \rho_{\text{Luft}}(T)$

## Vernetzung

Anschließend muss die Fläche mit einem Netz aus Drei- und Vierecken überzogen werden, welche angepasst, an die physikalischen Probleme durch das Programm erfolgt. Das bedeutet, dass das Programm den Vernetzungsgrad an die „Problemzonen“ anpasst. Die erstellte Vernetzung ergab folgende Statistik:

Minimum element quality:	0.001709
Average element quality	0.9118
Triangular elements	77057
Edge elements	6257
Vertex elements	3744



Ergebnisdarstellung der Vernetzung des 2D-Raumes.

## FEM-Berechnung

Die anschließende FEM-Berechnung kann in zwei Varianten erfolgen:

- statisch Berechnung eines asymptotisch erreichten Endzustands und
- dynamisch Berechnung von Zeitabläufen, die hier in Sekundenschritten erfolgten.



Dazu wurden in einer statischen Vor-Berechnung die Anfangstemperaturen für die Lampen und die Maschinenlast bestimmt. Diese Temperaturen sind nicht vorgegeben und müssen daher aus den Gegebenheiten mit einer stationären Berechnungsvariante errechnet werden:

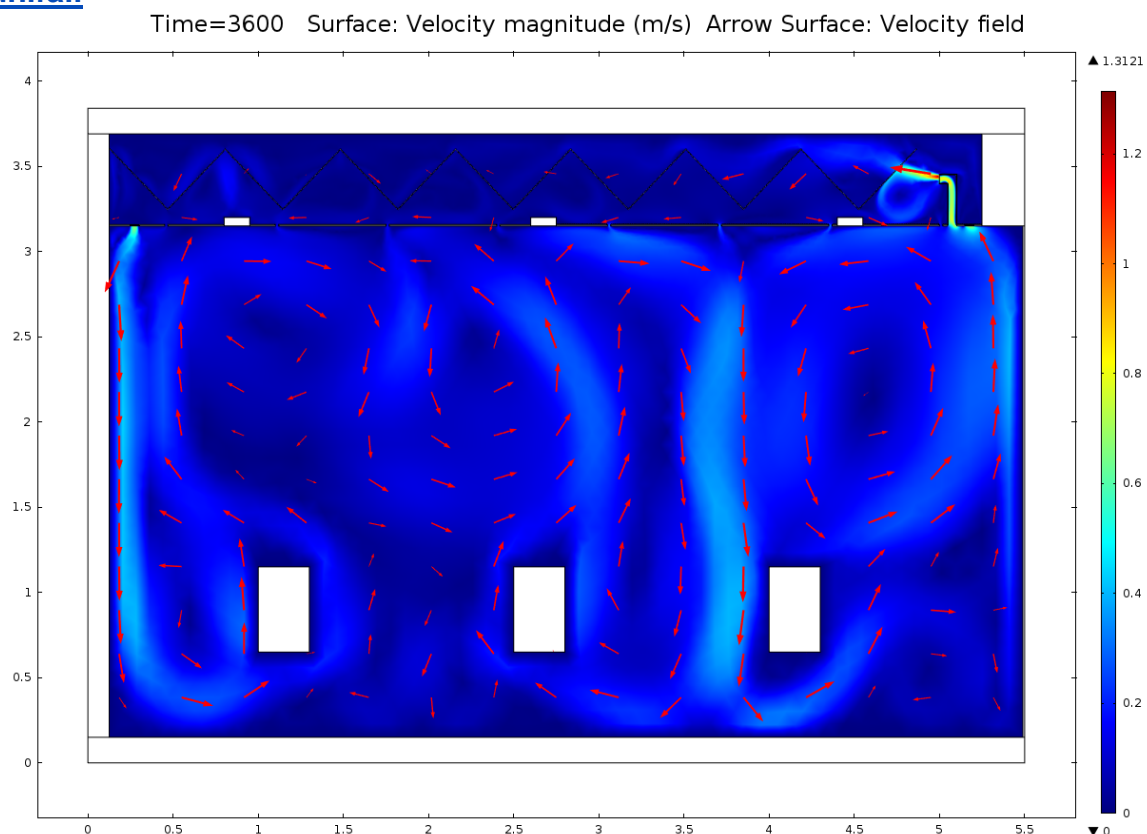
Anfangstemperaturen der Maschinenlast–Dummies: 30 °C

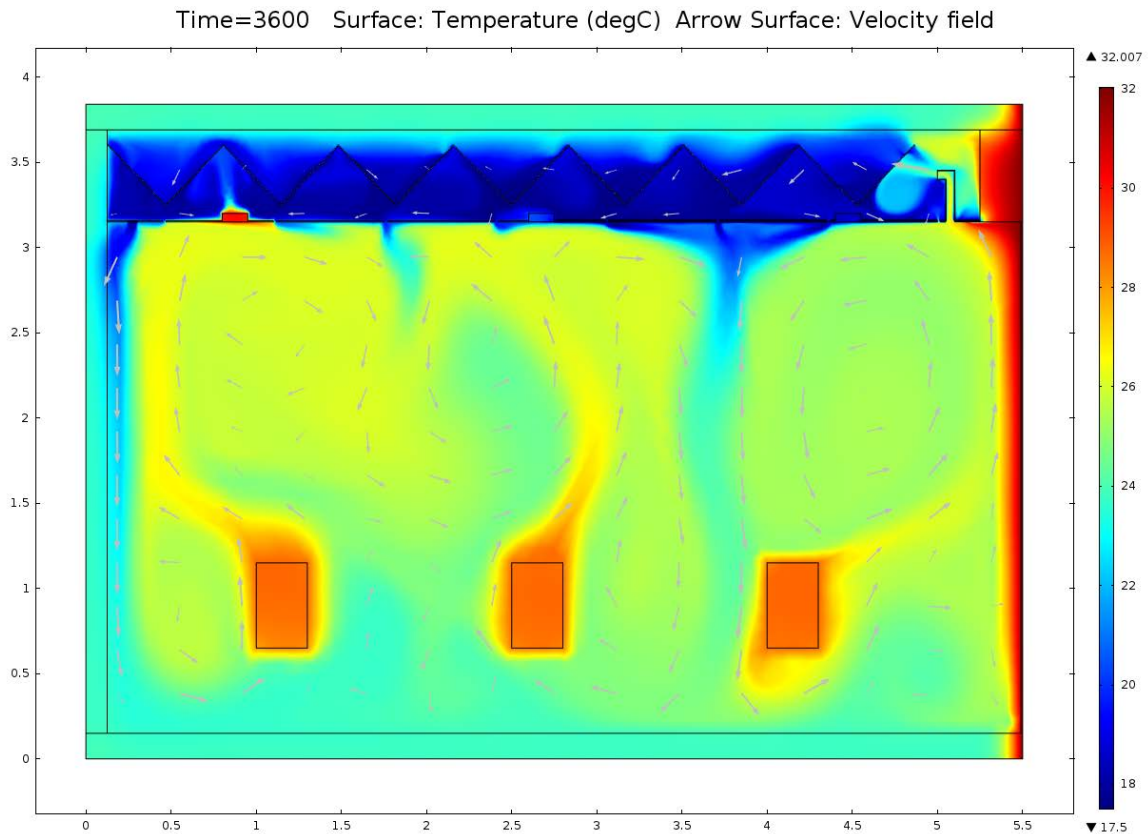
Anfangstemperaturen der Lampen: 30 °C

Anfangstemperaturen des Betons außen: 31 °C

Die eigentlichen Berechnungen erfolgten dann für den Kühl- und Heizfall unter den oben genannten Voraussetzungen. Dabei wurde eine zeitabhängige Ausgabe auf 1 s Zeitschritten gesetzt. Die berechnete Gesamtzeit jeder Studie wurde auf 3600 s = 1 Stunde eingestellt, da in dieser Zeit der Testraum ausreichend klimatisiert wurde und man eine eingeschwungene Klimasituation erhält. Aus den sich ergebenden Animationen für den Heiz- und Kühlfall, die als Anlage beigefügt werden, wurden die beiden letzten Bilder des Geschwindigkeitsfeldes und des Temperaturfeldes mit eingezeichneten Geschwindigkeitspfeilen unten abgebildet. Dabei berechnet das Programm an den Netzknotenpunkten einen exakten Wert mit max. 1% Fehler und interpoliert im restlichen Gebiet. Die nachfolgenden Abb. stellen dann den jeweiligen dynamischen Endzustand dar.

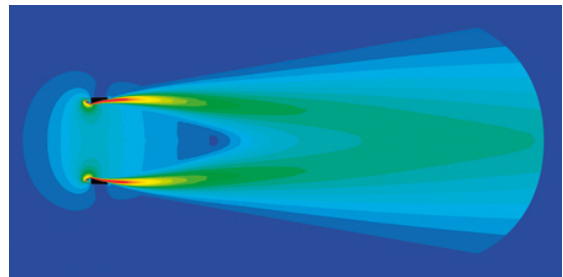
### Kühlfall





Der im Temperatur - Bild erreichte „Endzustand“ des für den Kühlfall berechneten Raumklimas zeigt:

- Die mittlere Raumtemperatur, die aufgrund der ständigen leichten Luftströmung im Raum nicht einheitlich ist, erreicht im Mittel 24 – 26 °C. Im Test der Klimakammer wurde ein Wert von 23,8 °C in der vorgeschriebenen Messhöhe von 1,7 m erzielt.
- Die mittlere Temperatur im Deckenraum liegt im Bereich 18 -20 °C. Im Testbericht der Klimakammer werden für die Temperatur im Deckenraum 21,8 °C angegeben.
- Die Kühlleistung der Matten im Deckenraum ist deutlich überdimensioniert. Zudem wird die kühle Luft des Deckenraums schlecht in den Raum eingebracht.
- Die warme Luft am Fenster steigt sofort auf und wird mit der Abluft günstig entfernt.
- Das Umluftrohr steht dagegen ungünstig und sollte mehr zur Raummitte verschoben werden, da dann die wärmere Luft an der Glasscheibe vollständig in den Abluftkanal strömen kann und das Umluftrohr die kühlere Luft des Innenraums in den Umluftbereich bringt. Damit wird die Kühlung effektiver betrieben.
- Der Ventilator könnte vollständig eingespart werden. Wenn man die Zuluftöffnung analog dem „Dyson“-Ventilator gestaltet, erreicht man einen sehr hohen Mitnahmeeffekt mit der einströmenden Frischluft (bis zu 15-fach) und erzielt damit einen deutlich besseren Kühleffekt.

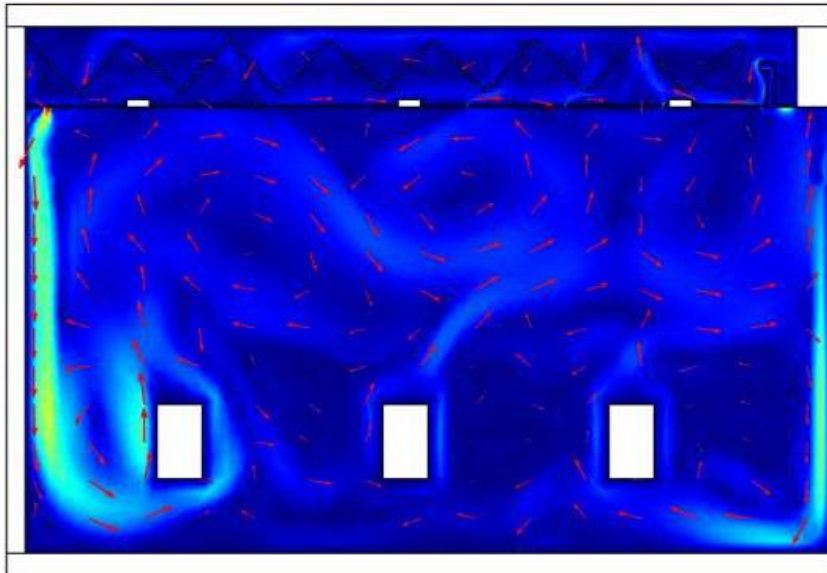


Die zu dieser Berechnung angefertigte Animation hat den Dateinamen:

TestRaum\_2D\_Tbft2\_solve\_Fan90\_8Schlitze\_ML\_hoch\_kuehl\_1080p.mp4

## Heizfall

Time=3600 Surface: Velocity magnitude (m/s) Arrow Surface: Velocity field



▲ 0.7384

0.7

0.6

0.5

0.4

0.3

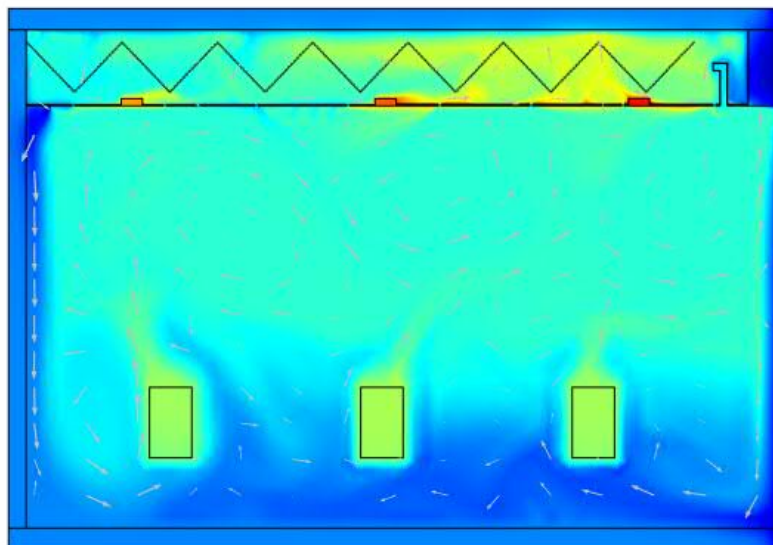
0.2

0.1

0

▼ 0

Time=3600 Surface: Temperature (degC) Arrow Surface: Velocity field



▲ 39.379

35

30

25

20

▼ 16

Der im Temperatur - Bild erreichte Endzustand des für den Heizfall berechneten Raumklimas zeigt:

- Die mittlere Raumtemperatur, die aufgrund der sehr geringen Luftströmung im Raum in nahezu zwei Bereiche geteilt wird, erreicht im oberen Teil im Mittel ca. 24 °C und im Bodenbereich 21 – 22 °C. Im Test der Klimakammer wurde ein Wert von 23 °C erzielt.
- Die mittlere Temperatur im Deckenraum liegt im Bereich 25 -31 °C. Im Testbericht der Klimakammer werden dafür keine Angaben gemacht.
- Bei Nutzung des Zuluftstroms zur Schaffung eines Saugeffekts für eine Umluft im Deckenbereich könnte deutlich mehr Energie von den Heizmatten entnommen und in den unteren Raum transportiert werden. Dies würde auch die Luft im Bodenbereich mehr erwärmen.
- Bei einer Führung des Zuluftrohres durch den Deckenbereich würde man eine Vorkonditionierung der Zuluft erreichen.

Die zu dieser Berechnung angefertigte Animation hat den Dateinamen:

TestRaum\_2D\_Tbft2\_solve\_Fan90\_8Schlitze\_ML\_hoch\_heiz\_1080p.mp4

## Dynamischer Kühlbetrieb mit einem Lastprofil

Abschließend wurde der im Testraum durchgeführte 24-Studentest aufgrund des hohen Rechenaufwands für nur eine Betriebsweise nachgebildet.

A Tagbetrieb von 4:30 Uhr bis 22.00 Uhr mit Vorlauftemperatur: 15 °C  
 Nachtbetrieb von 22:00 Uhr bis 4:30 Uhr mit Vorlauftemperatur: 18 °C  
 Belüftung des Raues: 24 h – Betrieb

Diese Betriebsweise ergab im Testraum und in der Simulation folgenden Verlauf:

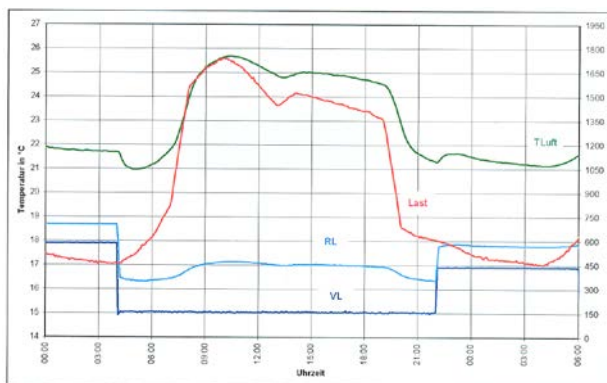
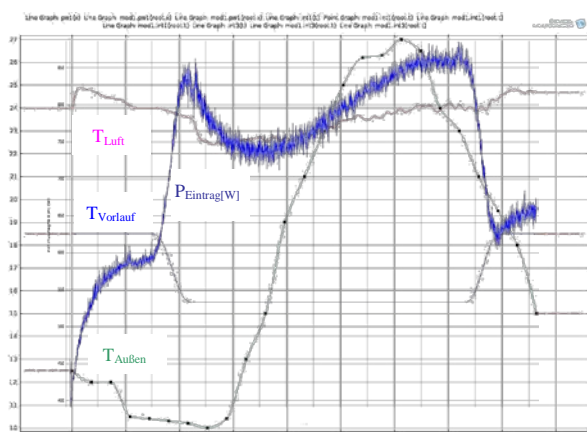


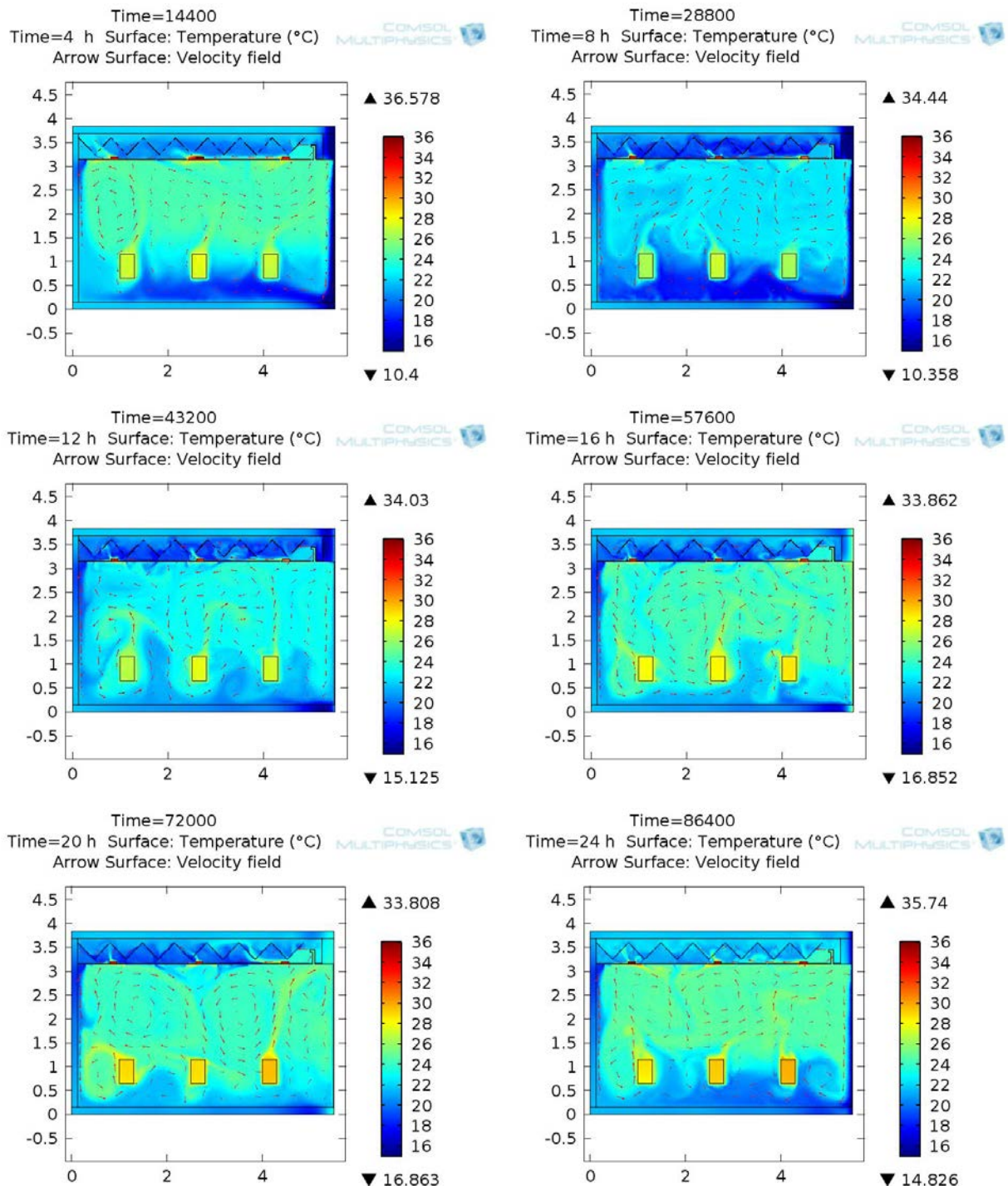
Bild 5: Verlauf der Temperaturen und der Raumlast für die Variante A



Im Gegensatz zum Testraum ist die Maschinenlast in der Simulation konstant geblieben. Daher nahm die Raumtemperatur einen relativ ähnlichen Verlauf.



Die Berechnung des dynamischen Kühlfalls über 24 h ergab dann in 4 Std.–Abständen folgende Bildfolge:



Die zu dieser Berechnung angefertigte Animation hat den Dateinamen:

TestRaum\_2D\_Tbft2\_solve\_Fan90\_8Schlitze\_ML\_hoch\_kuehl\_1Tag\_A\_1080p.mp4

## Zusammenfassung

Die Rechnungen zeigen zunächst ein sehr detailliertes Bild, welches die gemessenen Temperaturen im Mittel weitgehend übereinstimmend erreicht. Da jedoch die Luftströmungen im Raum sehr unterschiedlich sind, zeigen sich auch die Unterschiede in den

verschiedenen Raumteilen, welche bei einer Messung in der Klimakammer erst bei einem Netz von Temperatursensoren (Mapping) zutage treten.

Zudem soll noch eine Bemerkung zum 2D-Rechenmodell gemacht werden. Dieses Modell stellt natürlich nicht ein 100-%-iges Abbild des Testraums dar. Die Anordnung wurde aber so gewählt, dass nur geringe Abweichungen zu einem 3D-Raum entstehen. Bereits dieses 2D-Modell arbeitet mit ca. 80.000 Elementen, die bei der Luftströmung ständig einen neuen Zustand als Ausgangszustand für die verschiedenen physikalischen Parameter nehmen muss. Daher werden jedes Mal mehrere Matrizen mit je 80.000 Elementen miteinander verrechnet. Das ergibt ca. 200.000 Freiheitsgrade. Das ergibt immer Rechenzeiten von vielen Stunden und Tagen. Es ist daher verständlich, dass eine 3D-Berechnung unter diesen Umständen nur mit Großrechentechnik möglich ist.