THERMISCHE BEHAGLICHKEIT UND ENERGIEAUFWAND BEI FLÄCHENHEIZUNGEN IN BÜROGEBÄUDEN

Benjamin M. Behrendt[1], Bjarne W. Olesen und Lorenzo Mattarolo
International Center for Indoor Environment,
Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark

Kontakt E-Mail: [1]benbe@byg.dtu.dk

KURZFASSUNG

Die vorliegende Studie befasst sich mit der Anwendbarkeit von Flächenstrahlungssystemen unter bestimmten kritischen Bedingungen.

Dem Risiko von Kondensation an den aktiven Flächen sowie den Leitungen während der Kühlsaison wurde dabei besonderes Augenmerk geschenkt.

Es wurde getestet, ob durch Kombination des Systems mit natürlicher Belüftung sichergestellt werden kann, dass eine thermisch akzeptable Umgebung erreicht wird.

Durch unterschiedliche Platzierung der Messstellen für Taupunkt und operative Temperatur soll der Einfluss einzelner interner Konditionen bewertet werden.

ABSTRACT

This report is concerned with the feasibility of radiant systems in certain critical environments.

A focus of the study was put on the condensation risk on active surfaces as well as on the pipes themselves.

It has been tested if natural ventilation in combination with the system can secure a thermal acceptable environment.

The influence of individual internal conditions was tested by placing the sensors for operative temperature and dew point to different locations.

Schlüsselwörter:

Kondensation, Kühlen, Energieaufwand, Computersimulation, thermische Behaglichkeit, Flächenheizung, Flächenkühlung

EINLEITUNG

Es wurden Simulationen mit IDA Indoor Climate and Energy (Version 3) und dem dazugehörigen Modul für Strahlungssysteme durchgeführt.

Es wurden insgesamt fünf Zonen simuliert, wobei der Fokus in dieser Arbeit auf den Zonen mit hohen latenten Wärmen, hier die Konferenzräume, lag.

Die folgenden Resultate beziehen sich daher auf die Konferenzräume.

Die Simulation wurde für vier Orte in Schweden durchgeführt: Malmö (mit Wetterdaten einer Messstation in Kopenhagen), Göteborg, Stockholm und Kiruna. Malmö, Göteborg und Stockholm liegen dabei im Süden Schwedens, wohingegen Kiruna die nördlichste Stadt Schwedens ist (rund 1000km nördlich von Stockholm).

SIMULATIONEN

Das Schema des simulierten Gebäudes ist in Abbildung 1 dargestellt. Tabelle 1 beinhaltet die wichtigsten Eckdaten für die Simulationen. Die hier genannten Werte wurden für alle durchgeführten Simulationen verwendet.

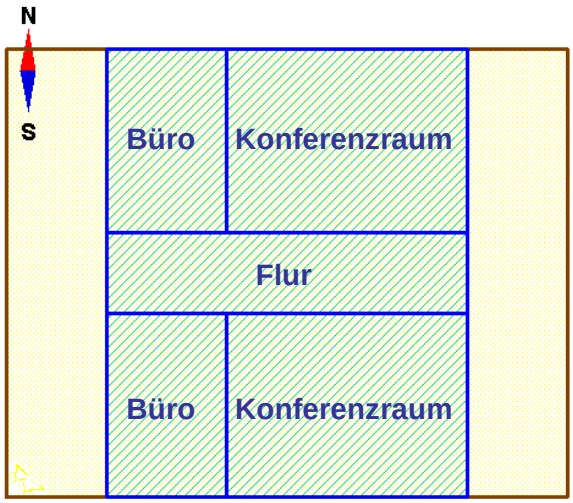

Abbildung 1 Schema des simulierten Gebäudes

Tabelle 1 Im Modell verwendete Annahmen und interne Bedingungen

	KONFERENZ-RAUM	BÜRO
Grundfläche	39,6 m^2	19,8 m^2
Personen	12 occ., 1,1 Met, 0,5 – 1 Clo	2 occ., 1,2 Met, 0,5 – 1 Clo
Licht	100 W	50 W
Equipment	350 W	
Infiltration	0,1 ACH	
Verschattungsfaktor	0,5 (wenn Top > 23°C)	
Lasten und Systeme	8:00 – 12:00 und 13:00 – 17:00	

Die Simulationen wurden sowohl für die Sommer- als auch die Wintersaison durchgeführt. Der Betrieb aller Anlagen richtet sich nach den in Tabelle 1 angegebenen Zeiten. Außerhalb dieser Zeiten sind die Systeme inaktiv.

Lüftung

In den Sommermonaten wurde mit Luft bei Umgebungstemperatur gelüftet. Zur Vermeidung von Zug wurde ein unteres Limit von 17°C eingehalten, auf das die Zuluft gegebenenfalls aufgeheizt wurde. Als Zuluftraten wurden Kategorie C (entsprechend dem Standard EN ISO 15251; 4 l/s·pers + 0.4 l/sm^2) und Kategorie „low“ (nicht im Standard enthalten; 2 l/s·pers + 0.4 l/sm^2) untersucht. Der Fall „low“ stellt die Situation dar, in der sich mehr Personen in dem Raum befinden als ursprünglich vorgesehen.

Flächenstrahlungssystem – „Cooling Panel“

Cooling Panels wurden in allen Räumen modelliert. Sie bestehen aus MDF-Platten (Medium Density Fiberboard), einem EPS-Paneel (Expanded Polystyrene), einer geformten Aluminiumschicht, PEX-Rohren mit einem Innendurchmesser von 8mm und einer Wandstärke von 1,8mm sowie einem Verlegeabstand von 120mm. Der Aufbau ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Die Paneele waren ganzjährig aktiv.

Abbildung 2 Schematische Darstellung eines "Cooling Panels"

Flächenstrahlungssystem – Bodensystem

In der zweiten Simulation kam ein Bodensystem zum Einsatz.. Das System besteht aus Rohren mit einem Durchmesser von 17mm, die in eine 45mm Estrichschicht eingelassen sind. Direkt unter den Rohren ist eine 30mm starke Isolation vorgesehen. Der eigentliche Boden ist 150mm stark und besteht aus Beton. Abbildung 3 ist eine schematische Darstellung des Bodens.

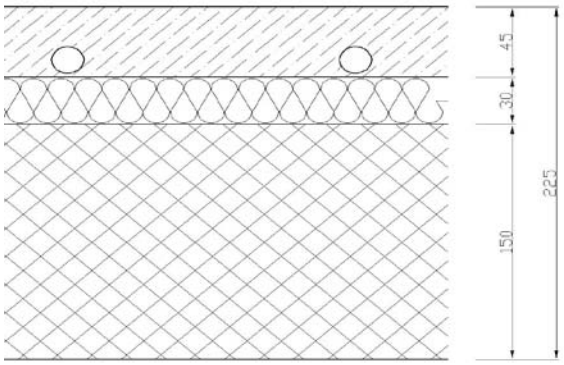

Abbildung 3 Schema des Bodensystems

Vorlauftemperaturkontrolle

Es wurden zwei unterschiedliche Funktionen für die Kontrolle der Vorlauftemperatur (T_s) untersucht. Beiden gemein ist, dass T_s immer größer als 17°C sein muss um Probleme durch Strahlungsasymmetrie zu vermeiden. Eine weitere Randbedingung ist, dass T_s die Taupunkttemperatur (T_{dp}) nie unterschreiten darf. Die erste Kontrolle ist sowohl von der Umgebungstemperatur (T_{ex}) als auch von der operativen Temperatur (T_{op}) abhängig, vgl. Gl. 1. Die yweite untersuchte Kontrolfunktion ist lediglich von T_{ex} abhängig, vgl. Gl. 2 (Olesen et al., 2004).

$$T_s = 0{,}52 \cdot (20 - T_{ex}) - 16 \cdot (T_{op} - 22) + k \quad (1)$$

$$T_s = 0{,}35 \cdot (18 - T_{ex}) + h \quad (2)$$

mit k_0=20; h_0=18.

Taupunktmessung

Weiterhin wurde untersucht welchen Einfluss auf die Performace unterschiedliche Orte für die Messung der Taupunkttemperatur haben. Zu diesem Zweck wurden Simulationen verglichen, bei denen die Taupunkttemperatur in einem Büro bzw. in einem Konferenzraum gemessen wurde.

ERGEBNISSE

Die Ergebnisse sind stark von den klimatischen Bedingungen abhängig. Für die hier untersuchten Orte sind diese vorwiegend moderate Luft- und niedrige Taupunkttemperaturen. Unter anderen Bedingungen können deutlich abweichende Ergebnisse festgestellt werden.

Das Kondensationsrisiko steigt an, wenn die Lüftung unter die Minimalanforderungen reduziert wird oder der Raum überladen ist.

Die Platzierung der Sensoren kann das Kondensationsrisiko deutlich beeinflussen. Es muss darauf geachtet werden, dass, sollte sich der Sensor nicht im Raum mit den höchsten latenten Lasten befinden, eine Minimaltemperatur für die Vorlauf-temperatur eingehalten wird.

Zwischen den unterschiedlichen verwendeten Regelungsverfahren konnten nur geringe Unterschiede in Bezug auf Komfort und Kondensationsrisiko festgestellt werden. Steuerungen, bei denen eine Raumabhängigkeit enthalten war, haben bei ähnlichem Energieverbrauch geringfügig besser abgeschnitten.

Beim Einsatz einer Deckenheizung muss beachtet werden, dass es bei einem hohen Wärmebedarf, z.B. auf Grund schlechter Isolierung, ein erhöhtes Risiko für Strahlungsasymmetrien gibt.

Bei korrekter Dimensionierung der Fußbodenheizung hatte diese keine negative Auswirkung auf die lokale Behaglichkeit. Auch bei erhöhtem Wärmebedarf kann die Fußbodenheizung die Behaglichkeitsbedingungen erfüllen, das Risiko für Strahlungsasymmetrien ist vergleichsweise gering.

Lüftung - Reduzierte Lüftungsrate

Die Reduzierung der Lüftungsrate von Kategorie C (4 l/s·pers + 0.4 l/sm^2) zu Kategorie „low“ (2 l/s·pers + 0.4 l/sm^2) hatte unterschiedliche Folgen. In den Städten Kiruna und Göteborg, die ein allgemein kühleres Klima haben, blieben die Auswirkungen verhältnismäßig gering. Wie in Abbildung 4 zu sehen, wurde hingegen in Malmö und Stockholm Kategorie B in Bezug auf die thermische Behaglichkeit in mehr als 5% der Zeit verfehlt.

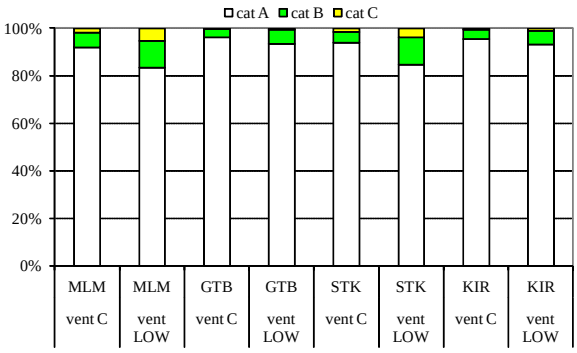

Abbildung 4 Thermische Behaglichkeit - Kategorien A bis C nach Standard EN ISO 15251

Der Einfluss auf die Taupunkttemperatur wird in Abbildung 5 deutlich. Durch die reduzierte Lüftungsrate steigt dieser um bis zu 2°C. Dies führt vor allem in Malmö und Stockholm zu Problemen, da die Taupunkttemperatur hier 24°C erreicht.

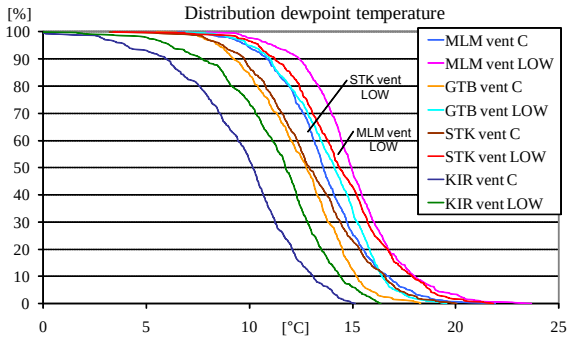

Abbildung 5 Akkumulierte Taupunkttemperatur in Abhängigkeit von Ort und Lüftungsrate

Wie aber in Abbildung 6 zu sehen ist, herrscht auch in Malmö und Stockholm zu jeder Zeit eine Temperaturdifferenz (ΔT) von wenigstens 2,5°C zwischen der Oberfläche des aktiven Bauteils (T_{surf}) und der Taupunkttemperatur (T_{dp}). Dies könnte in einigen Fällen zu Kondensation führen, unabhängig davon, ob die reduzierte oder aber die Lüftungsrate entsprechend Kategorie C gewählt wurde.

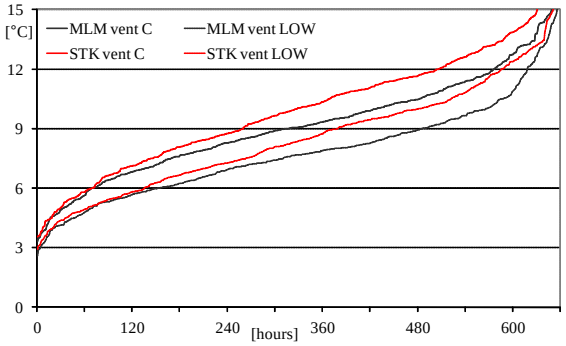

Abbildung 6 $\Delta T = T_{surf} - T_{dp}$ (Unterschied zwischen Oberflächen- und Taupunkttemperatur)

Taupunktmessung – Änderung der Messstelle

Um zu beurteilen, in wie weit eine ungeschickte Plazierung der Sensoren Einfluss auf die Güte des Raumklimas hat, wurde der Aufstellungsort variiert. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, wird bei der Plazierung der Sensoren in einem Büro eine höhere termische Behaglichkeit in den Konferenzräumen erreicht. Dieses Verhalten war zu erwarten, da eine Begrenzung der Vorlauftemperatur nun nicht anhand der Zone mit den größten Lasten, sondern anhand eines eher unproblematischen Büros. Der Einfluss ist allerdings mit Änderungen kleiner 5% vergleichsweise gering. Beide Standorte sind daher Akzeptabel.

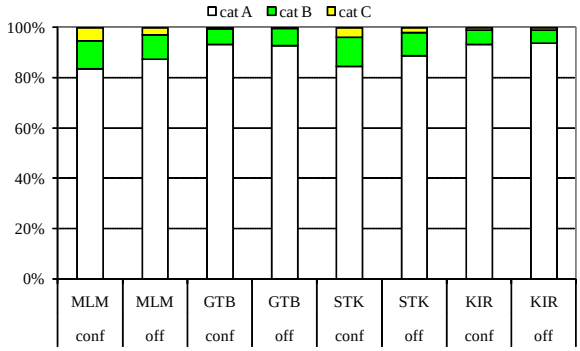

Abbildung 7 Auswirkungen der gewählten Messstelle auf die thermische Behaglichkeit

In Abbildung 8 werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Plazierungen deutlich. Der Zeitraum, in dem die Vorlauftemperatur durch die Taupunkttemperatur begrenzt wird, unterscheidet sich in beiden Fällen deutlich. Es ist aber zu beachten, dass bei abnehmender Begrenzung durch die Taupunkttemperatur die Vorlauftemperatur stärker durch die minimale Vorlauftemperatur beschränkt wird.

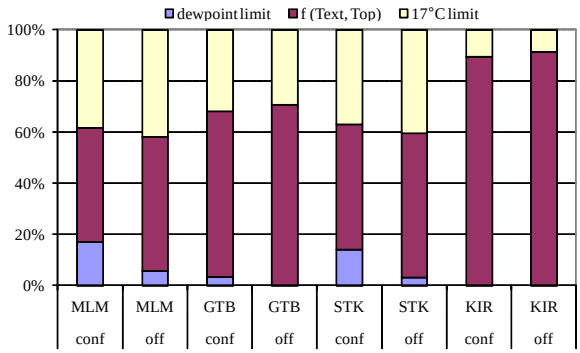

Abbildung 8 Vorlauftemperaturkontrolle in Abhängigkeit von der Sensorplatzierung

Der Temperaturunterschied zwischen Oberflächentemperatur und Taupunkttemperatur verändert sich, wie in Abbildung 9 gut zu sehen ist, nur bei kleineren Temperaturdifferenzen um 0,5 bis 1K. Dies fürt zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Kondensation. Da die Oberflächentemperatur aber noch um 2K über der Taupunkttemperatur liegt besteht trozsem nur ein Begrenztes Kondensations-risiko.

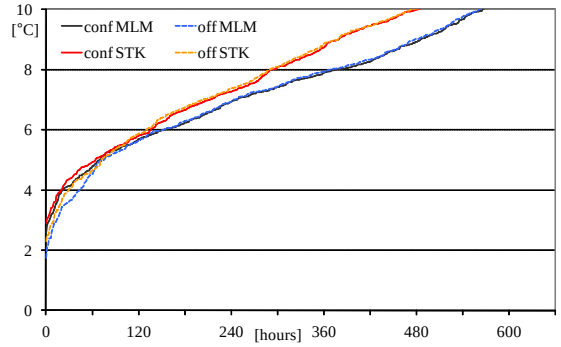

Abbildung 9 $\Delta T = T_{surf} - T_{dp}$ bei variation der Sensorstandorte

Kontrolle der Vorlauftemperatur

Beim Vergleich der beiden Strategien zur Kontrolle der Vorlauftemperatur konnten keine nennenswerten Unterschiede festgestellt werden. Wie in *Abbildung 10* zu sehen ist, ermöglichen beide Kontrollen das Erreichen von zumindest Kategorie B für deutlich über 90% der Zeit. Das Einbeziehen von T_{op} geht aber einher mit einer leichten Steigerung der thermischen Behaglichkeit. Dies wird durch die leicht erhöhten Anteile der Kategorie A deutlich.

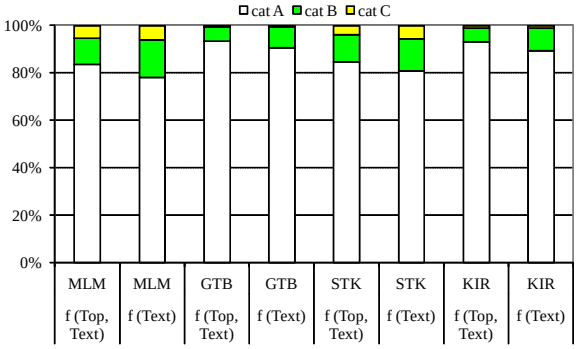

Abbildung 10 Auswirkungen der verwendeten Kontrollfunktion auf die thermische Behaglichkeit

Mit Hilfe von GenOpt wurden Gl. 1 und 2. optimiert. Dabei wurden für k bzw. h Werte entsprechend Tabelle 2 angenommen. Über die Berechnung des Index n, wie in Abbildung 11 exemplarisch dargestellt, können die Werte für k bzw. h in Abhängigkeit von den Anforderungen gewählt werden. Für die weitere Analyse wurden die in Tabelle 2 farblich markierten Werte gewählt.

Tabelle 2 Fälle für die GenOpt-Analyse

K WERTE FÜR GL. 1 $T_s = f(T_{ex}, T_{op})$		H WERTE FÜR GL. 2 $T_s = f(T_{ex})$	
k_0=20	k_1=18	h_0=18	h_1=22
k_2=19	k_3=20	h_2=23	h_3=24
k_4=21	k_5=22	h_4=25	h_5=26
k_6=23	k_7=24	[°C]	

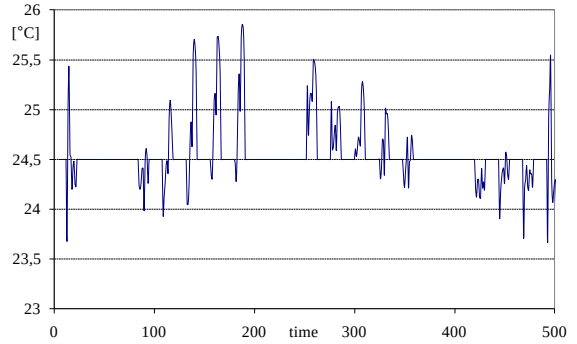

Abbildung 11 Exemplarische Berechnung des Index n bei einer neutralen Temperatur von 24,5°C

Abbildung 12 zeigt den Zusammenhang zwischen Komfort-Index n und dem Energieverbrauch auf.

Wird ein besserer, d. h. kleinerer Komfort-Index n angestrebt, steigt hier der Energieverbrauch grundsätzlich an.

Die in Abbildung 13 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass eine Feinjustierung der Kontrollfunktion zu einer erheblichen Verbesserung des Ergebnisses führen kann, ohne dabei den Energieverbrauch wesentlich zu verändern.

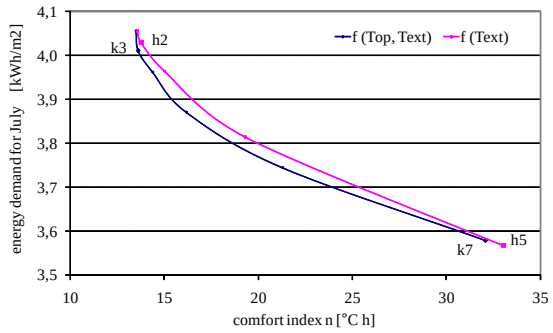

Abbildung 12 Abhängigkeit von Komfort-Index n und Energieverbrauch

Dies wird besonders beim Vergleich der in Abbildung 13 gegenüber gestellten Fälle k7 und h5 deutlich. In diesem Fall ist die Einbeziehung der operativen Temperatur in die Regelung der Anlage positiv zu bewerten. Vergleicht man hingegen die Fälle k3 und h2 miteinander, findet sich kein nennenswerter Unterschied zwischen den erreichten Kategorien.

Die Fälle k3 und h2 schneiden zwar gegenüber den Fällen k7 und h5 besser ab, erwartungsgemäß geht dies allerdings zu Lasten des Energieverbrauchs.

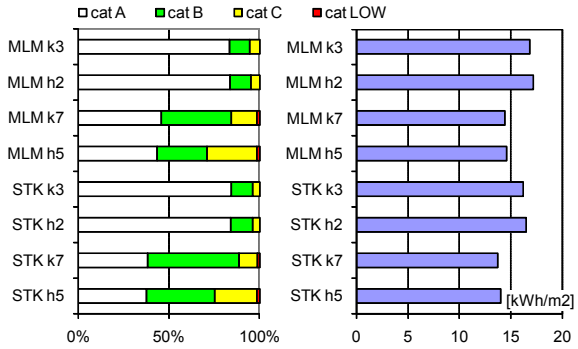

Abbildung 13 Unterschiede der Parameteruntersuchung der Kontrollfunktion für ausgesuchte Parameter

Aufhebung der minimalen Vorlauftemperatur

Verzichtet man auf eine absolute minimale Begrenzung der Vorlauftemperatur, erhöht sich sowohl die Zeit, in der die normale Kontrollfunktion zur Anwendug kommt, als auch der Zeitraum, in dem die Vorlauftemperatur durch die Taupunkttemperatur begrenzt wird. In Abbildung 14 wird deutlich, dass die Wahl des Standortes für die Temperatur- und Taupunktmessung erhebliche Auswirkungen haben kann. Bei ansonsten unveränderten Bedingungen wird die Vorlauftemperatur sowohl für den Fall Malmö als auch Stockholm 10% länger ducht die Taupunkttemperatur begrenzt, wenn die Sensoren im Konferenzraum plaziert waren. In den Fällen, in denen sie in den Büros angeordnet waren, ist daher mit einem erhöhten Kondensationsrisiko in den Konferenzräumen zu rechnen.

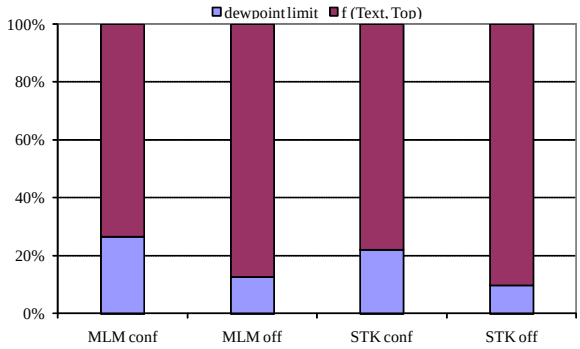

Abbildung 14 Vorlauftemperatur ohne minimale Begrenzung

Durch die veränderte Vorlauftemperatur ändert sich, wie in Abbildung 15 dargestellt, auch die Oberflächentemperatur über den gesamten Simulationszeitraum. In Malmö beschränken sich die größeren Abweichungen allerdings auf Temperaturen oberhalb von 22°C. Die Abweichungen bei niedrigeren Oberflächentemperaturen sind so geringfügig, dass nicht mit einer Beeinflussung des Kondensationsrisikos zu rechnen ist. Für Stockholm sind aber die Abweichungen gößer als in Malmö und sie sind vor allem auch bei niedrigeren Temperaturen vorhanden. So sinkt die minimale Oberflächentemperatur um etwa 0,2°C, wenn die Sensorik im Büro steht. Zwar wird durch diese Änderung kein Einfluss auf den lokalen Komfort genommen, in ungünstigen Fällen kann diese Temperaturänderung aber zu einer vermehrten Kondensation am Boden führen.

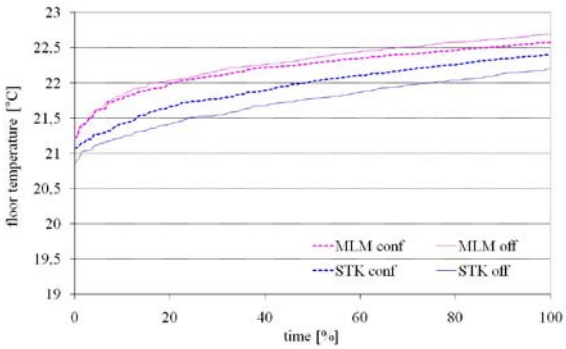

Abbildung 15 Verteilung der Oberflächentemperatur bei verändertem Aufstellungsort der Sensoren

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die durchgeführte Analyse hat sich hauptsächlich auf das Kondensationsrisiko bei Verwendung von Flächenstrahlungssystemen bezogen. Die Ergebnisse sind stark von den klimatischen Bedingungen abhängig. Der Sommer in Schweden zeichnet sich vor allem durch moderate Temperaturen und

vergleichsweise geringe Taupunkttemperaturen aus. Unter anderen Bedingungen ist zu erwarten, dass eine ähnliche Untersuchtung zu anderen Ergebnissen kommt.

Das Kondensationsrisiko ist erwartungsgemäß mit einer Veringerung der Lüftungsrate bzw. bei Überbelegung des Raumes angestiegen. Gerade bei der Verwendung von Flächenstrahlungssystemen ist daher eine bedarfsorientierte Auslegung von besonderer Bedeutung.

Die Untersuchung hat ebenfalls erwartungsgemäß gezeigt, dass die Platzierung der Sensoren einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dies trifft im besonderen Maße zu, wenn es keine minimale Begrenzung der Vorlauftemperatur gibt. Zur Minimierung des Kondensationsrisikos sollten die Sensoren daher immer im Raum mit den höchsten Lasten plaziert sein. Anders aber als in einer Simulation kann gerade diese Anforderung zu großen Problemen führen. Es ist zum Beispiel nicht anzunehmen, dass ein Konferenzraum im gleichen Umfang genutzt wird wie ein normales Büro. Empfehlenswert wäre daher eine individuelle Raumsteuerung. Um den Zusatzaufwand hierfür ins Verhältnis zum zusätzlichen Nutzen zu setzen, sind weitere Untersuchungen notwendig.

Die Güte der verwendeten Regelungssysteme hat direkten Einfluss auf die thermische Behaglichkeit und den Energieverbrauch. Die Wahl des Regelungssystems muss daher mit Blick auf den gewünschten thermischen Komfort und die benötigte Leistung getroffen werden. Es ist aufgefallen, dass in einzelnen Fällen eine Regelung, die ausschließlich auf der externen Temperatur beruht, mit einer Regelung, die zusätzlich die operative Temperatur berücksichtigt, konkurieren kann. Bei ungünstigeren Bedingungen ist allerdings die Berücksichtigung der operativen Temperatur vorteilhaft. Bei annähernd gleichem Energieverbrauch kann dadurch ein besseres thermisches Raumklima geschaffen werden.

Der Verzicht auf eine untere Grenze der Vorlauftemperatur führt in den hier vorliegenden Fällen nicht zu einer Beeinträchtigung des thermalen Wohlbefindens. Die Oberflächentemperaturen erreichen auch ohne diese Begrenzung minimale Temperaturen geringfühgig unterhalb von 21°C.

Abschließend ist festzustellen, dass Flächenkühlsysteme in Schweden anwendbar sind und dabei gute bis sehr gute Ergebnisse erwartet werden können, wenn die oben genannten Punkte bei der Planung und dem Betrieb der Anlage berücksichtigt werden.

LITERATUR

EN ISO 15251, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, CEN, 2006

GenOpt, Generic Optimization Program, LBNL, Berkeley, 2008

IDA Indoor Climate and Energy 3.0, EQUA Simulation Technology Group, Sweden

Olesen, B.W., Dossi, F.C., 2004. Operation and Control of Activated Slab Heating and Cooling system, CIB World Building Congress