

Endbericht über die Ergebnisse des Transferbonus-Projekts

Verbesserung des Raumklimas und Einsparung von Heizenergie durch den Einsatz der thermokeramischen Membrantechnologie (ClimateCoating) als Innen- und/oder Außenanstrich an Gebäuden

Abstract

Mit dem Angebot einer modernen Finite-Elemente-Berechnungssoftware ist es erstmalig möglich, komplexe physikalische Prozesse und Abläufe mit allen teilnehmenden physikalischen Prozessen 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. Die Untersuchungen sollen Aussagen liefern, wie die thermische Wirkung im Detail vonstatten geht und auf welche Parameter zur Optimierung Einfluss genommen werden kann.

Einführung

Die Farbe „ClimateCoating“ mit der Zusammensetzung 50 % Keramik-Vakuum-Hohlkugeln im μm -Bereich und einer auf Acrylbasis beruhenden Bindung für den Innen- und Außenanstrich zeigt neben einer hohen Stabilität eine Reihe vorteilhafter Eigenschaften zur Wärmedämmung und Verbesserung des Raumklimas. Durch das Verständnis der einzelnen physikalischen Prozesse können Aussagen zur Wirkung gemacht werden. Zusätzlich sollen Animationen über den zeitlichen Verlauf während der Erwärmung mit unterschiedlichen Heizquellen für den Entwickler Detailkenntnisse vermitteln, als auch dem Verbraucher gegenüber eine bildliche Erläuterung des Erwärmungseffektes bringen.

1. Simulationen (Finite Elemente Methode-FEM) zum Raumklima (Temperaturverteilung, Luftströmung, Konvektion, Wärmestrahlung, Wärmeleitung) (AP 1)

Abrechenbarer Schritt: Entwurf eines identischen 2-dimensionalen Modells entsprechend den Vorgaben zum Raumklimaverbesserung mit Animation (Abrechenbarer Schritt für die 3. Projektwoche)

Zur Prüfung von Raumklimamodellen wurde zunächst begonnen, an Raumklimavarianten die geforderten physikalischen Prozesse an einem Raummodell darzustellen. Dazu wurde sowohl ein Heizfall für eine Wintersituation als auch ein Kühlfall für eine Sommersituation programmiert und getestet:

Heizfall bei einer Deckenheizung

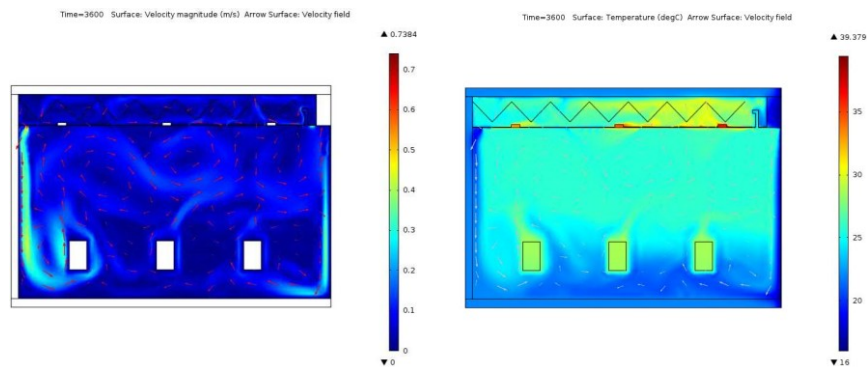


Abb.1 Strömungsbild links und Temperaturverteilung rechts in einem durch eine Strahlungsheizung in der abgehängten Decke und einer ständigen Lüftung klimatisierten Büroraum. Der Kälteeintritt kommt von einem auf der rechten Seite befindlichen Fassadenfenster. Die drei Rechtecke in der Raummitte simulieren die thermische Belastung durch Geräte oder Personen.

Kühlfall bei einer Deckenkühlung

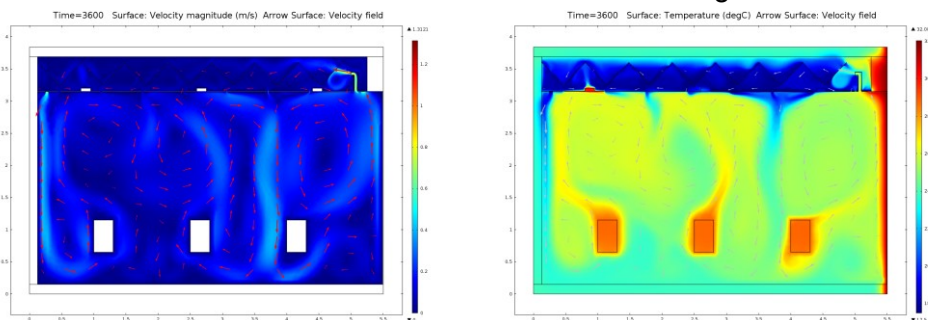


Abb.2 Strömungsbild links und Temperaturverteilung rechts in einem durch Kühlmatten in der abgehängten Decke und einer ständigen Lüftung klimatisierten Büroraum. Der Wärmeeintritt kommt von einem auf der rechten Seite befindlichen Fassadenfenster. Die drei Rechtecke in der Raummitte simulieren die thermische Belastung durch Geräte oder Personen.

Fazit: Die zur Prüfung von Raumklimamodellen entwickelten Klimasimulationen konnten alle physikalischen Prozesse darstellen. Die hohe Anschaulichkeit gestattete es alle Einzelprozesse detailliert zu studieren.

2. Simulationen zur Raumklimaverbesserung durch keramische Hohlkugeln im Farbanstrich (ClimateCoating) und Interpretation des einfachen Jalousie-Effekts der Hohlraumkugeln (AP2)

Abrechenbarer Schritt: Entwurf eines identischen 3-dimensionalen Modells entsprechend den Vorgaben zur Raumklimaverbesserung mit den ClimateCoating-Farben mit Animation. (Diskussion und Präsentation der ersten Ergebnisse). Abrechenbarer Schritt für die 4. Projektwoche

Zur Untersuchung der Prozesse in der ClimateCoating-Farbe war es notwendig, ein nahezu identisches Mikromodell zu entwickeln, welches die Anordnung der Hohlkugeln mit einer statistischen Verteilung der Position und der Größe wiedergibt. Dazu wurde eine mathematische Methode zur statistisch verteilten Anordnung dieser Kügelchen in einem Kubus von 300 x 500 x 500 entwickelt, welches sowohl in Optikprogramm (OptiCAD) wie auch in das FEM-Programm (Comsol Multiphysics) implementiert werden konnte.

Kugelanordnung für Testrechnungen

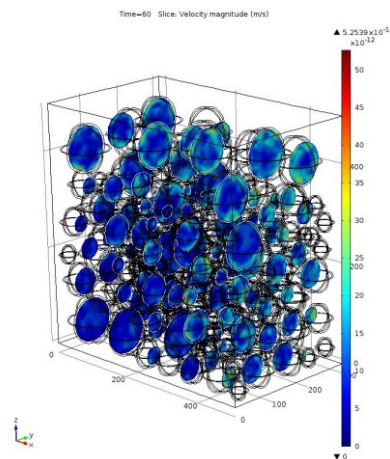


Abb.3 Statistisch verteilte und in der Größe variiertes Kugelanordnung in einem quaderförmigen Volumenstück. Danach wurden Untersuchungen zur Streuung des Lichts an einer Einzelhohlkugel wie auch an diesem Testquader durchgeführt.

In einer frequenzabhängigen Studie zwischen 10 und 22 THz bzw. 13 und 30 μm ergaben sich beim Auftreffen eines Strahlungsfeldes auf eine Hohlkugel für die elektrische Feldstärke folgende Strahlungsprofile.

Strahlungsprofile an einer Hohlkugel

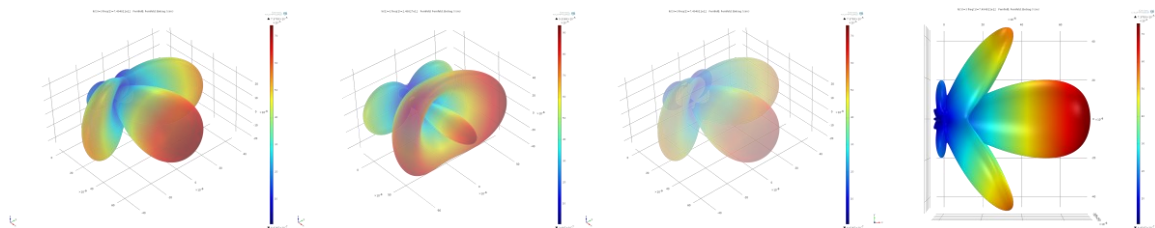


Abb.4 Strahlungsprofile für das elektrische Fernfeld beim Auftreffen einer ebenen Welle auf eine Hohlkugel bei unterschiedlichen Wellenlängen. In den Bildern sind Beispiele mehrerer räumlicher Einzelprofile veranschaulicht.

Diese Studie zeigt deutlich die nahezu vollständig vorwärtsgerichtete Strahlungsintensität, die eine vernachlässigbare Rückstreuung bildet.

Mit der gleichen Kugelanordnung wurde auch in einem optischen Programm eine Strahlanalyse (Beamtracing) durchgeführt. Auch hier wurde ein paralleles Strahlenbündel auf das mit Kugeln gefüllte Quader (siehe Abb. 3) gerichtet. Es zeigt sich, dass wiederum eine vorwärts gerichtete Streuung entsteht (Abb.5), die lediglich an der Wand reflektiert wird. Erst wenn man den Kugeln auf der Oberfläche eine vollständige Reflexion zuordnet (Abb. 6), erhält man eine Rückstreuung. Diese Rückstreuung wird jedoch nahezu vollständig wie in einem Lichtleiter in der Farbschicht gehalten, wie man aus Abb. 7 erkennen kann.

Beamtracing an einem mit SiO_2 Hohlkugeln gefüllten Quader

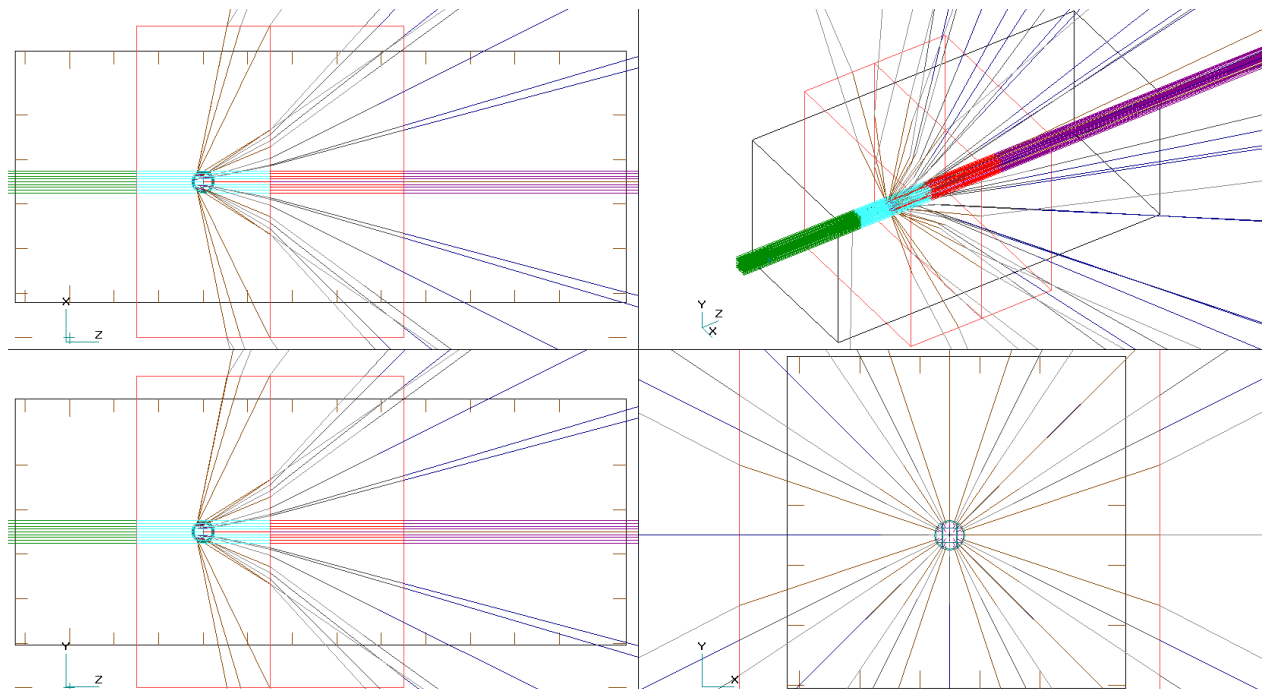


Abb.5 Das Modell stellt eine Hohlkugel aus SiO_2 dar, die in einer Acrylschicht eingebettet ist. Dahinter befindet sich die Betonwand, der zur besseren Erkennbarkeit keine hohe Absorption zugeordnet wurde. Es ergibt sich eine ausschließlich vorwärts gerichtete Strahlung, die dann absorbiert wird. Dies führt zu einer Erwärmung der Farbschicht.

Beamtracing an einem mit verspiegelten SiO_2 Hohlkugeln gefüllten Quader

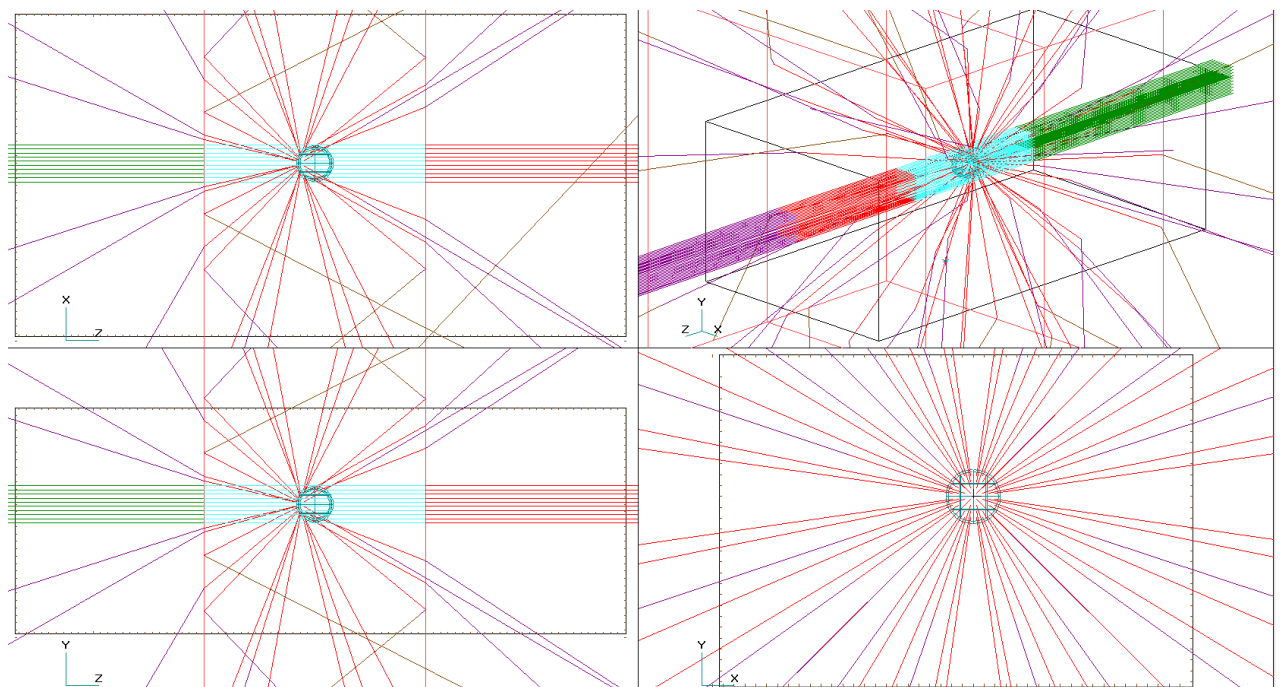


Abb.6 Das Modell ist identisch mit Abb. 5, die Kugel besitzt hier aber einen Reflexionsfaktor von eins. Auch hier werden nahezu alle Strahlen in der Acrylfarbe gehalten und treten nicht mehr aus. Dies führt aber zu einer Erwärmung der Farbschicht.

Beamtracing an einem mit SiO_2 Hohlkugeln gefüllten Quader mit verlängerter Farbschicht

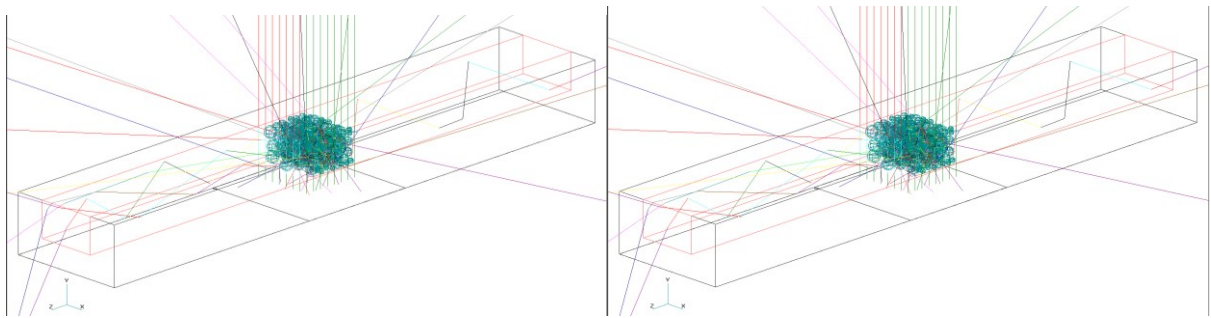


Abb.7 Das Kugelmodell ist identisch mit Abb. 5. Die Kugeln besitzen links eine natürliche Oberfläche und rechts einen Reflexionsfaktor von eins. In beiden Fällen ergibt sich ein ähnliches Bild, alle Strahlen werden in der Acrylfarbe, die hier verlängert wurde, gehalten und treten nicht mehr aus. Dies führt in beiden Fällen zu einer Erwärmung der Farbschicht.

Beamtracing an einem mit SiO_2 Hohlkugeln gefüllten Quader mit verlängerter Farbschicht

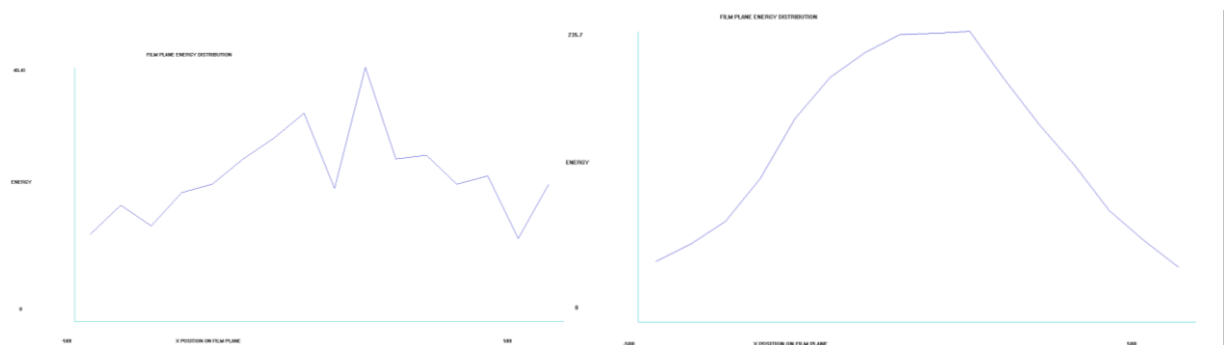


Abb.8 Die beiden Streudiagramme wurden auf der in Abb. 7 unter dem Kugelquader als Rechteck erkennbaren Flächendetektor empfangen. Im linken Fall mit natürlichen Kugeln ergibt sich eine Rückstreuung von ca. 10% der eingestrahnten Strahlen, im rechten Fall eine Rückstreuung von ca. 35%.

Fazit: In diesem Arbeitsschritt wurde in 3-D-Modellen das Streu- und Reflexionsverhalten im Mikro- raum untersucht. Hierbei konnte anschaulich nachgewiesen werden, dass eine wichtige Eigenschaft der Farbe ihre Streuung und Absorption in der dünnen Farbschicht ist. Im Gegensatz zu der bisherigen Vermutung ist aber die Reflexion gering. Als Optimierung muss in weiteren Entwicklungsprojekten die Wirkung einer diskutierten Vergütung der Oberfläche durch eine metallisch reflektierende Schicht (z. B. Aluminium) untersucht werden. Dazu sind jedoch auch spezielle messtechnische Untersuchungen als Datenlieferant für eine Simulation erforderlich.

3. Interpretation von vorhandenen Messergebnissen durch Simulationen unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Pankow, München und von der Pergula-Gruppe (AP 3)

Abrechenbarer Schritt: Interpretation von vorhandenen Messergebnisse durch Simulationen unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Pankow, München und von der Pergula-Gruppe. (Abrechenbarer Schritt für die 7. Projektwoche)

Für die Simulation des Pankower Experiments wurden drei Modelle durchgerechnet:

- Eine Topfhälfte mit einem Tontopf unbehandelt und eine Heizquelle in der linken Ecke einer rotationssymmetrisch berechneten Scheibe
- Eine Topfhälfte mit einem Tontopf innen beschichtet mit Acryl und eine Heizquelle in der linken Ecke einer rotationssymmetrisch berechneten Scheibe
- Eine Topfhälfte mit einem Tontopf innen beschichtet mit Acryl und die hohlen Mikrokugeln zu etwa 50 % und eine Heizquelle in der linken Ecke einer rotationssymmetrisch berechneten Scheibe.

Die Messpunkte für die folgenden Graphiken mit ihrer jeweiligen Nummerierung

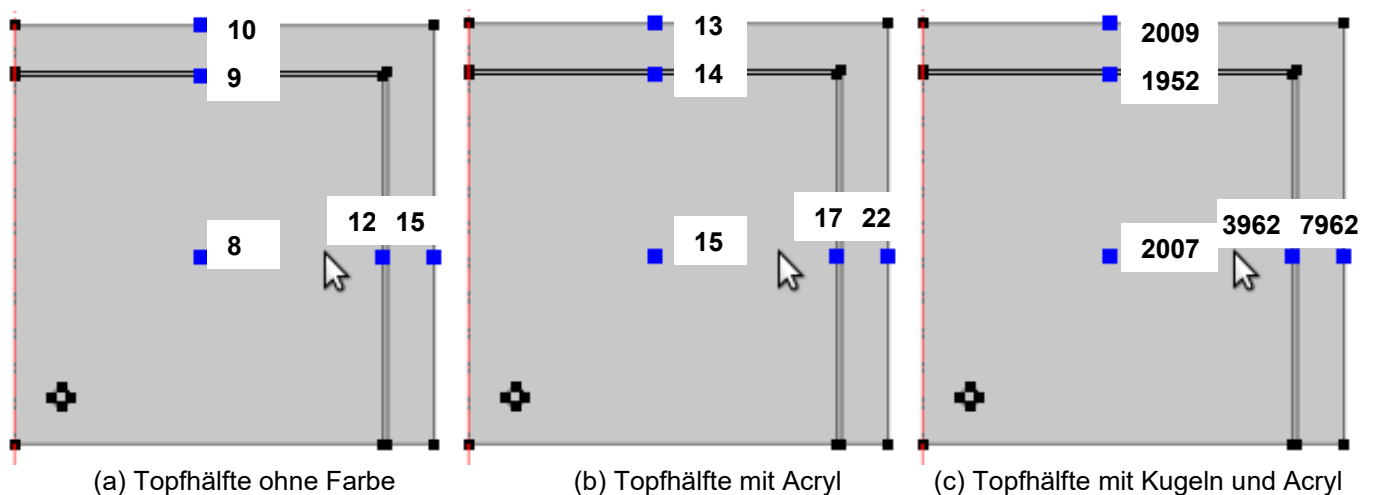


Abb.9 Zur Berechnung des Pankower Experiments wurden drei Raumscheiben modelliert, die mit der Symmetriebedingung eine rotationssymmetrische Anordnung eine dem Blumentopf ähnliche Geometrie ergeben. Zur Bestimmung der Erwärmung wurden Messpunkte für die Erstellung einer Graphik definiert, die in dieser Darstellung nummeriert ihre Positionen anzeigen.

Mit den in Abb. 9 dargestellten Modellen wurden die Bedingungen des Blumentopfexperiment nachgestellt. Der obere und rechte Rand wurden einem Tonmaterial zugeordnet, die dann folgende dünne Schicht jeweils ohne Farbe (a), in der Mitte der Acrylfarbe (b) und rechts der Themoshieldfarbe (c) zugeordnet, wobei jedoch gegeneinander verschobene regelmäßige Hohlkugeln konstruiert wurden. Der Innenraum wurde als Luft programmiert. Links unten wurde eine Heizquelle mit jeweils 15 W eingestellt. Die berechneten Heizzeiten betrugen 6 Minuten.

Temperaturprofile nach 5 Minuten Heizzeit

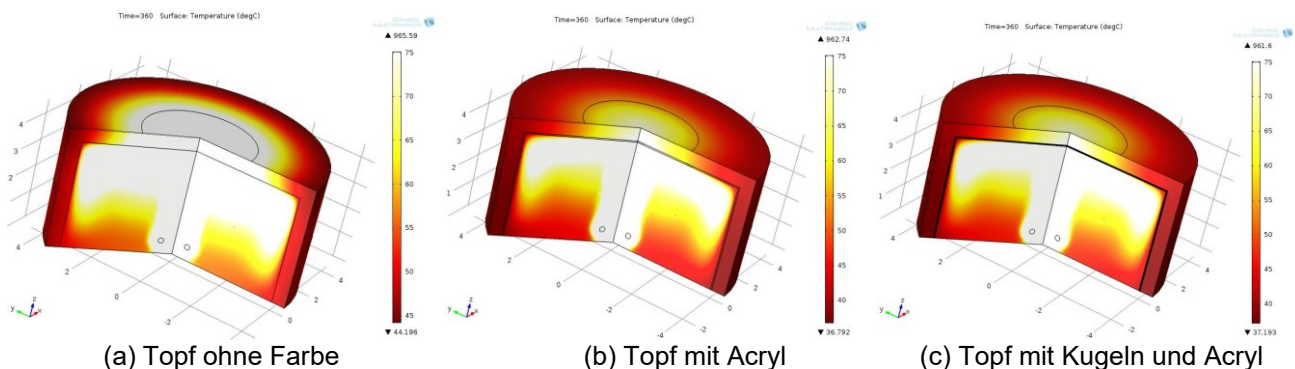


Abb.10 Ergebnisse der Berechnung der Temperaturverteilung bei einer Erwärmung durch eine Heizquelle mit 15 W. Die Bilder zeigen, dass in Fall (a) eine deutlich höhere Erwärmung der Topfoberseite entsteht, die in den Fällen (b) und (c) abnimmt. Der Temperaturanstieg ist deutlicher in den folgenden Grafiken zu sehen.

An Hand der in Abb. 9 dargestellten Meßpunkten konnten nun die Temperaturverläufe graphisch ermittelt werden. Sie ergaben analog zu dem Pankower Experiment einen Temperaturanstieg und eine günstige Temperaturverteilung im Falle (c).

Fazit: In diesem Arbeitsschritt wurde in 3-D-Modellen das Streu- und Reflexionsverhalten mit Mikrokugeln untersucht. Eine nahezu gleichmäßige Temperaturverteilung im Innenraum, die dem menschlichen Wohlbefinden entgegenkommt, kann nur mit den Mikrokugeln im Acryl erreicht werden.

In den drei simulierten Versuchsreihen ist, wie in dem Pankower Experiment, nur in der rechten Graphik ein deutlicher Temperaturanstieg gegenüber den zwei linken Graphiken zu erkennen. Ebenso ist auch der Temperaturunterschied zwischen der Innen- und der Außenwand leicht größer. Damit ergaben sich in dieser Simulation sehr ähnliche Ergebnisse.

Temperaturprofile nach 5 Minuten Heizzeit

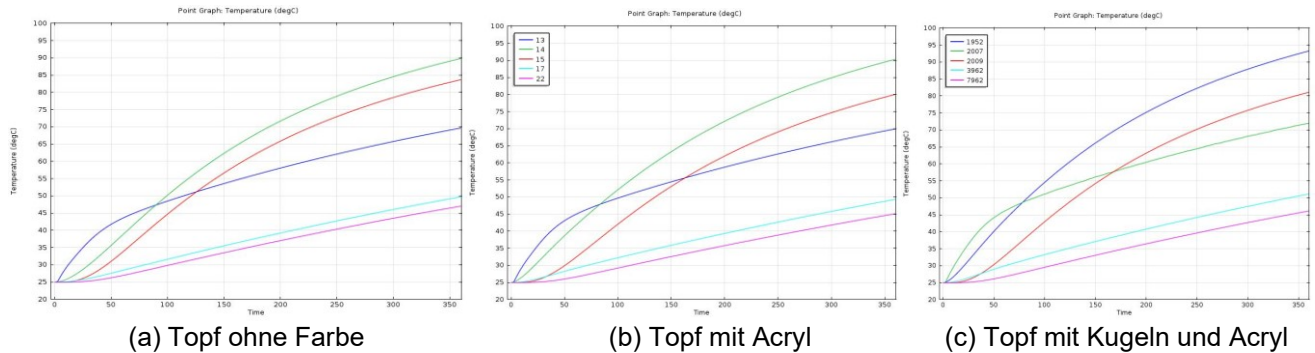


Abb.11 Ergebnisse der Berechnung der Temperaturen an den vorgegebenen Messpunkten in den drei oben beschriebenen Fällen bei einer Erwärmung durch eine Heizquelle mit 15 W. Die Graphiken zeigen einen deutlichen Anstieg der Innentemperaturen in den 6 Minuten von links nach rechts und ebenfalls eine geringere Erwärmung der Außenmesspunkte von links nach rechts.

Zusätzlich zu den dynamischen Berechnungen über die Zeit von 6 Minuten wurde für die drei Fälle auch eine statische Berechnung durchgeführt, die einen Endzustand ermittelte.

Statische Berechnung der Erwärmung des „Blumentopfes“

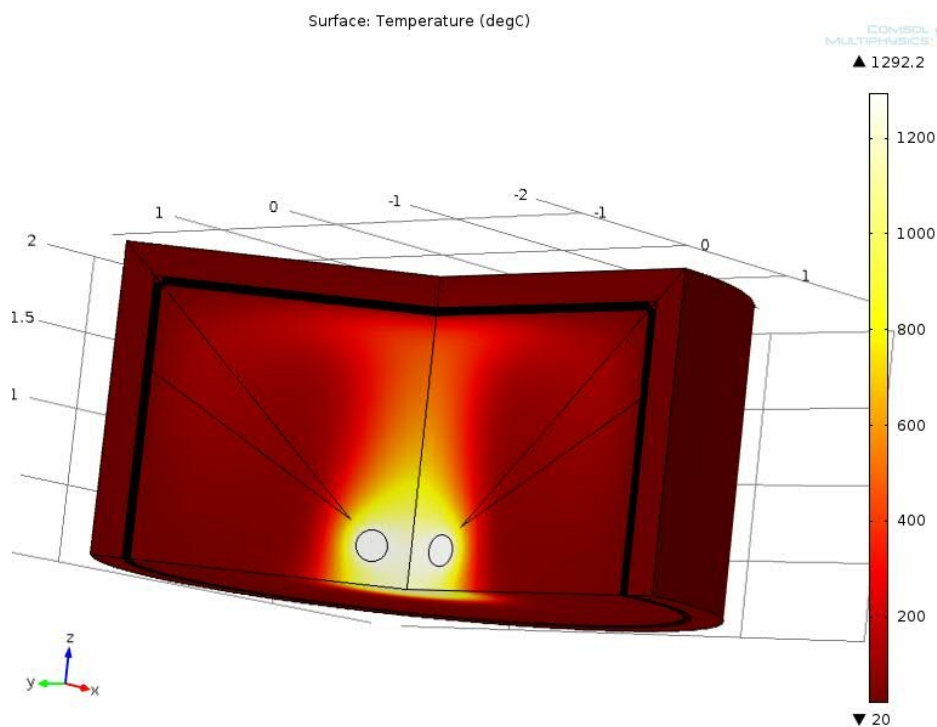


Abb.12 Repräsentatives Ergebnis der statischen Berechnung der Temperaturen mit Anzeigen der diagonalen Linien, entlang derer die Endtemperatur für die drei Fälle ermittelt wurde.

Im Ergebnis dieser Berechnungen wurden ebenfalls die im Experiment ermittelten Temperaturunterschiede für die drei Fälle ermittelt:

Statische Berechnung der Erwärmung des „Blumentopfes“

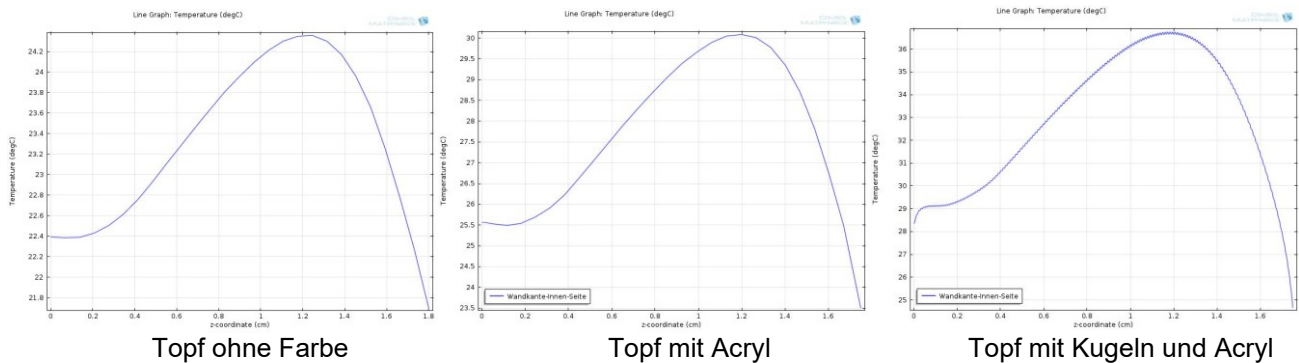


Abb.13 Endtemperaturen entlang der in Abb. 12 gezeichneten Diagonalen für die drei Fälle des Farbbelegs in einer statischen Berechnung. Sie zeigt ebenfalls einen stetigen, Temperaturanstieg von links nach rechts entsprechend den Ergebnissen des Pankower Experiments. Es ist zu beachten, dass die Skaleneinteilung für die Fälle (a), (b) und (c) unterschiedlich sind. Im Fall (c) erhält die Kurve durch die Mikrokugeln eine leichte Überstruktur

Die Berechnungen erfolgten zur Verifizierung der FEM-Methode an Hand der experimentellen Daten. Bereits bei diesem Experiment, welches auch bei uns noch einmal nachvollzogen wurde, ergaben sich vergleichbare Ergebnisse, so dass die Herangehensweise bestätigt wurde. Ähnlich wurde auch mit dem Münchener Experimentverfahren. Dieses Modell wurde vollständig 3dimensional nachgebildet und berechnet. Eine solche Berechnung ist wegen der sehr hohen Zahl der finiten Elemente extrem aufwändig und wurde daher nur für den Fall der Wände aus Porenbeton durchgeführt (Münchener Experiment). Der gleiche Versuchsaufbau mit Holzwänden (Pergula Experiment) ändert nur die physikalischen Werte für das Wandmaterial. Er war daher für eine Verifizierung der Programmierung nicht mehr hilfreich und wurde daher nicht durchgeführt.

Berechnung der Erwärmung eines Isolierten Kubus Münchener Experiment

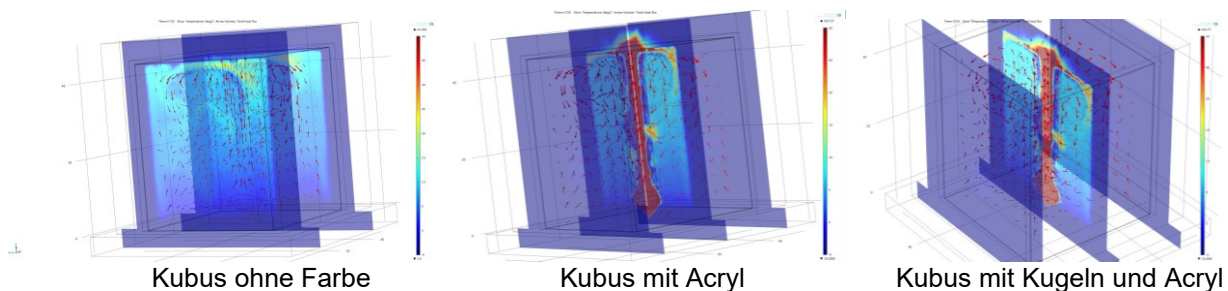


Abb.14 Berechnung eines Erwärmungsexperiments innerhalb einem Kubus mit einer 15 W Heizquelle und Wänden aus Porenbeton (a), zusätzlich mit einer Acrylbeschichtung (b) und mit einer ClimateCoating-Beschichtung (c). Wie im Fall des Blumentopfes ergab sich eine Temperaturerhöhung im Innenraum vor allem im Fall (c).

Temperaturkurven im nachgestellten Münchener Experiment

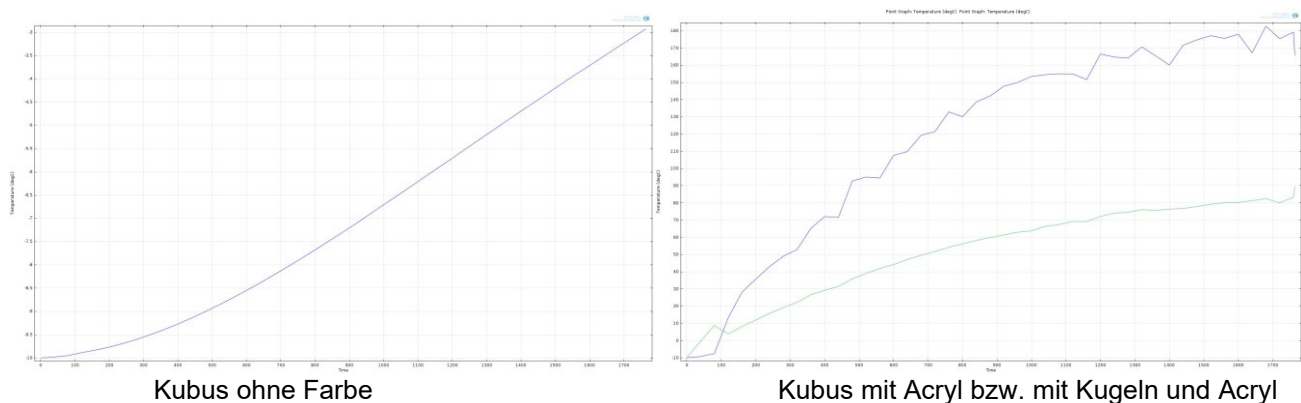


Abb.15 Berechnung eines Erwärmungsexperiments innerhalb einem Kubus mit einer 15 W Heizquelle und Wänden aus Porenbeton (a), zusätzlich mit einer Acrylbeschichtung (b) und mit einer ClimateCoating-Beschichtung (c). Wie im Fall des Blumentopfes ergab sich eine Temperaturerhöhung im Innenraum vor allem im Fall (c).

Fazit: Beide Experimente konnten nachgebildet werden und ergaben übereinstimmende Ergebnisse für den Temperaturanstieg. Damit war der Nachweis erbracht, dass die verwendete FEM-Methode mit dem Comsol-Multiphysics-Programm eine gültige Methode für die Simulation realer thermischer Vorgänge ist.

4. Berechnungs-Modul zur Optimierung der Durchmesser- und Verteilung der keramischen Hohlkugeln (AP 4)

Abrechenbarer Schritt: Berechnungen zur Verbesserung der Rückstreuungseigenschaften aufgrund von beigemischten Keramik- und Hohlkugeln in den Farben und computergestützte Rechnungen zur Anpassung der Farben an Infrarot-Heizungsstrahler (Diskussion und Präsentation der Ergebnisse) (Abrechenbarer Schritt für die 10. Projektwoche)

Nachdem die Eigenschaften einer Mischung von Hohlkugeln zunächst in ihren infrarot-optischen Eigenschaften bestimmt werden konnten, nämlich mit dem Prozess der Absorption des Hauptteils der eintreffenden Strahlung wurde nun ein weiterer Teil der Farbeigenschaft untersucht. In einem Simulationsansatz in einem Querraum wurde die Farbschicht in zwei Teile geteilt und entsprechend der Beimischung von 50% Vakuumkugeln eine Hälfte der Farbschicht (0,025 mm) als Vakuum programmiert und die andere Hälfte (ebenfalls 0,025 mm) als Acrylfarbe. Diese wurde auf die linke Seite des Modells angebracht, auf der rechten Seite wurde eine 0,3 mm starke reine Acrylschicht angebracht. Mit einer Decken-Strahlungsheizung von 30°C wurde der Querraum von einem 10°C Ausgangszustand für alle Bauteile eine Stunde lang erhitzt. An dem in den Raum gestellten Personendummy mit 37 °C und einer Wärmeabgabe von 80 W wurde der Erwärmungsverlauf während einer Aufheizphase von einer Stunde errechnet. An der „Person“ wurden an den eingezeichneten Stellen Messpunkte angebracht, deren Temperaturverläufe dann in einer Graphik ausgewertet werden konnten.

Um auch die Wirkung der Reflexionseigenschaften der Farbe zu bestimmen, wurden drei Testläufe mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften für beide Farbseiten vorgegeben.

Da die Farbe in den bisherigen Anwendungen auch positive Eigenschaften bei baulichen Kältebrücken zeigt, wurde auch über dem Fußboden eine künstliche Kältebrücke angebracht, die mit einer Außentemperatur von – 10°C belegt wurde. Zugleich wurden in den Berechnungen die Verläufe der Luftströmungen ermittelt und somit zusätzliche Erkennt-

nisse gewonnen. Sie lieferten sowohl Aussagen über Stärke, Richtung und Turbulenzen an den verschiedenen Raumteilen.

Geometrie für die Testläufe

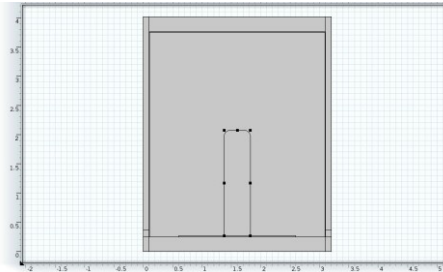


Abb.16 Darstellung der in den drei Testläufen verwendeten Geometrie und die Maßpunkte an der Testperson.

Temperaturprofile der Erwärmung eines Querraums nach einer Stunde Heizzeit

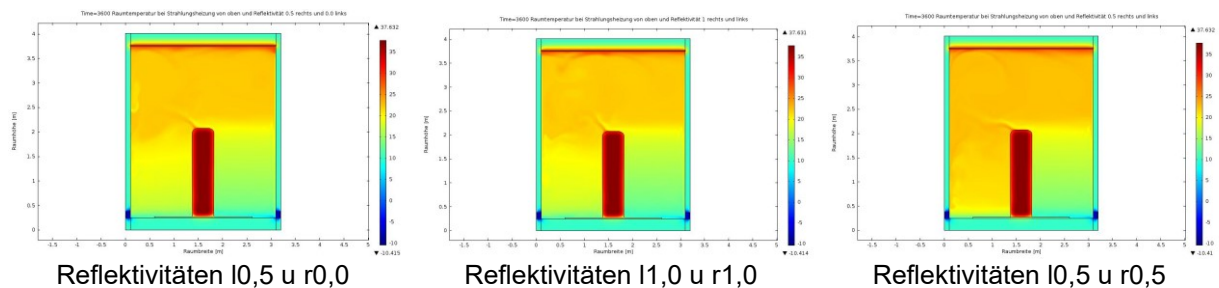


Abb.17 Darstellung der End-Temperaturprofile nach einer Aufwärmzeit von einer Stunde für drei Fälle der Reflexion der Farbschichten. Dabei wurde links die ClimateCoating-Farbe und rechts eine üblichen Acrylfarbe simuliert. Die linke Farbschicht bestand dabei zu einer Hälfte aus einer Vakuumschicht mit einem Druck von 1/100 des Normaldrucks und zu einer Hälfte aus einer Acrylschicht. In allen drei Fällen zeigte sich eine deutlich bessere Erwärmung der linken Seite.

Strömungsprofile der Erwärmung eines Querraums nach einer Stunde Heizzeit

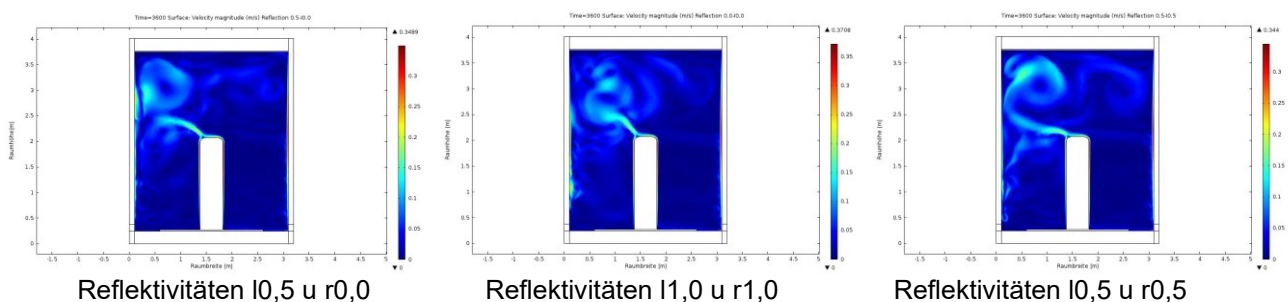


Abb.18 Darstellung der End-Strömungsprofile nach einer Aufwärmzeit von einer Stunde für drei Fälle der Reflexion der Farbschichten. Dabei wurde links die ClimateCoating-Farbe und rechts eine üblichen Acrylfarbe simuliert. Die linke Farbschicht bestand dabei zu einer Hälfte aus einer Vakuumschicht mit einem Druck von 1/100 des Normaldrucks und zu einer Hälfte aus einer Acrylschicht. In allen drei Fällen zeigte sich eine deutlich höhere Luftverwirbelung auf der linken Seite infolge der schnelleren Erwärmung.

Der aus diesen dynamischen Berechnungen ermittelte Temperaturverlauf zeigt in der Grafik die erwarteten Temperaturunterschiede in der Mitte und an den Füßen der Testperson. Am Kopf sind die Temperaturen nahezu gleich, da sie durch die Luftströmung ausgeglichen werden (siehe Abb. 16)

Körpertemperatur der Testperson

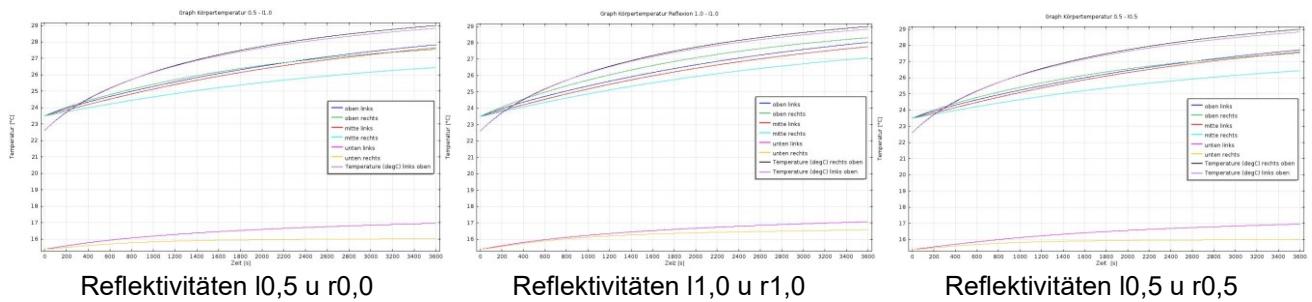


Abb.19 Darstellung der Temperaturverläufe an der Testperson in den drei untersuchten Fällen unterschiedlicher Reflexion der Farbe. Sie zeigen während der Aufwärmphase eindeutig eine stärkere Erwärmung auf der linken Seite

Fazit: Bereits in dieser Untersuchung konnte ein Teil der Gründe der Verbesserung des Raumklimas nachgewiesen werden. Er besteht in der schnelleren Erwärmung der dünnen Acrylschicht infolge der thermischen Abschirmung durch die Vakuumschicht. Die deutliche Erwärmung der linken Seite ist der in diesen Untersuchungen verwendeten durchgängigen Vakuumschicht. Er liefert aber damit das erwünschte Ergebnis einer möglichen Optimierung: Da die Vakuumisolierung einen so deutliche Verbesserung bringt, kann man bei einer Vergrößerung der Vakuumkügelchen auf einen Streubereich von 50 – 250 μm mit Sicherheit eine deutliche Optimierung der ClimateCoating-Farbe erreichen. Diese Vergrößerung bringt eine deutliche Vergrößerung des Vakuumvolumens, ähnlich der hier simulierten durchgängigen Schicht. Die Erhöhung der Reflexion der ClimateCoating-Farbe von einem Reflexionsfaktor 0.5 auf 1,0 brachte ebenfalls einen leichten Temperaturanstieg, so dass auch hier in Zukunft experimentiert werden sollte. Somit konnten auch hier die Berechnungen eine wichtige Optimierungsaussage bringen!

5. Berechnungen zur Verbesserung der Rückstreuereigenschaften (Mie Streuung und Rückstreuung im IR) aufgrund von beigemischten Keramikugeln in den Farben und computergestützte Rechnungen zur Anpassung der Farben an Infrarot-Heizungsstrahler. (AP 5)

Abrechenbarer Schritt: Simulationen zur Heizenergie-Ersparnis durch den Einsatz der thermokeramischen Membrantechnologie für den Innen- und/oder Außenanstrich an Gebäuden (Diskussion, Präsentation und Animation zu den ersten Ergebnissen). 12. Woche

Infrarotstrahlung und –Streuung lässt sich mit folgenden physikalischen Phänomenen beschreiben:

1. Makroskopisch-deterministische Phänomene:

- Auf dem Übertragungsweg der IR-Strahlung kann sich die Strahlungsenergie in die drei Bestandteile „Reflexion“, „Absorption“ und „Transmission“ aufteilen. Dabei sind „Reflexion“, „Transmission“ aber auch „Brechung“ und „Beugung“ Interferenzeffekte, die wie die Mie-Streuung (s. 2.) mit der Maxwelltheorie beschrieben werden können. Die Absorption ist jedoch unter 3. einzuordnen.

2. Mikroskopisch-deterministische Phänomene

- Die Mie-Streuung lässt sich durch Interferenz von Sekundärwellen beschreiben, welche durch eine Primärwelle an Grenzflächen zwischen Materialien unterschiedlicher elektromagnetischer Eigenschaften angeregt werden (Huygenssches Prinzip).
- Die Grenzflächenphänomene lassen sich auf die Unterschiede der Feldkonstanten der eingesetzten Materialien zurückführen. Im vorliegenden Fall sind alle Materialien elektrisch nicht leitend und nicht magnetisch. Daher ist die Permittivität (Dielektrizität) der einzige Materialparameter, der die Mie-Streuung hervorruft.

3. Makroskopisch-statistische Phänomene

- Emission durch einen Strahler (im vorliegenden Fall sind nur „Plancksche Temperaturstrahler relevant). Im Einsatzbereich der ClimateCoating–Anstriche wurde ein Temperaturbereich von -40°C bis 120°C angenommen. Die spektrale Leistungs- bzw. Energiedichte oberhalb 50% der maximalen liegt hier im Wellenlängenbereich von ca. 4 bis $24\text{ }\mu\text{m}$. Diese Wellenlängen fallen in den Bereich der Abmessungen der Glaskeramikkugeln. Daher ist die Annahme, dass die Mie–Streuung ein relevantes Phänomen ist, zunächst berechtigt.
- Absorption erhöht die Temperatur des absorbierenden Materials durch Anregung innerer Bewegung (atomare/molekulare räumliche Schwingungen). Als Materialeigenschaft kann die Absorption durch den Imaginärteil einer komplexen Permittivität ausgedrückt werden.

4. Mikroskopisch-statistische Phänomene

- Die Permittivität ist im zu betrachtenden Bereich jedoch stark wellenlängen- bzw. frequenzabhängig. Diese Abhängigkeit beruht hauptsächlich auf atomaren und ionischen Resonanzen sowie Orientierungspolarisation. Die Effekte sind stark abhängig von der molekularen Zusammensetzung und Struktur der Materialien. Im IR-Bereich lassen sich die elementaren Wechselwirkungen auf quantenmechanische Wechselwirkung zwischen Photonen und optischen Phononen erklären. Diese können aufgrund der unzureichenden Datenlage nicht berechnet werden.

Die stärksten elektromagnetischen Grenzflächeneffekte treten im ClimateCoating–Anstrich zwischen Hohlraum und der Glaskeramik der eingelagerten Kugeln auf. Zwischen Glaskeramik und der Acryl-Matrix gibt es abgesehen von der Frequenzabhängigkeit nur geringe Unterschiede der Permittivität. Die Wirkung dieser Grenzflächen konnte daher vernachlässigt werden.

Um die Mie–Streuung unabhängig von strukturellen Einflüssen der Umgebung zu simulieren, wurde die Simulation für einen einzelnen kugelförmigen Hohlraum (Vakuum) in unendlich ausgedehntem Siliziumdioxid simuliert.

Dieses Modell ermöglicht

- eine genaue quantitative Darstellung der Richtwirkungen der Mie–Streuung in Abhängigkeit vom Verhältnis Wellenlänge zu Objektgröße
- die maximale Ausprägung von richtungsabhängigen Maxima und Minima der Streuung
- eine gute Extremwert-Abschätzung der Streuwirkung

Für die Primärstrahlung wurde eine monofrequente ebene Welle mit unendlicher Kohärenzlänge angesetzt, die beim Auftreffen auf eine Materialgrenzfläche interferierende Sekundärwellen anregt.

Zur Darstellung der Streuwirkung wurde nur die angeregte Sekundärstrahlung berücksichtigt, da diese in der Realität auch mit der Primärstrahlung interferiert und die Streucharakteristik sich so nur andeutungsweise herausbilden oder sogar überhaupt nicht aufgelöst werden kann.

Da die Streucharakteristiken nicht von der absoluten Wellenlänge und Objektgröße sondern von deren Verhältnis abhängen, wurde bei der Simulation ein Referenz-Kugeldurchmesser von $20\text{ }\mu\text{m}$ gewählt. Damit lassen sich die Ergebnisse für andere Durchmesser durch einfache Wellenlängenskaliierungen übertragen.

Um nur die Abhängigkeiten von geometrischen Relationen zu analysieren wurde eine Simulation mit frequenzunabhängiger Permittivität durchgeführt.

Dabei zeigten sich eine starke Wellenlängenabhängigkeit, und sehr ausgeprägte richtungsabhängige Minima und Maxima in den Streudiagrammen. Dabei zeigt sich auch eine Abnahme der Richtwirkungen zu den Bandgrenzen des relevanten Infrarotbereichs.

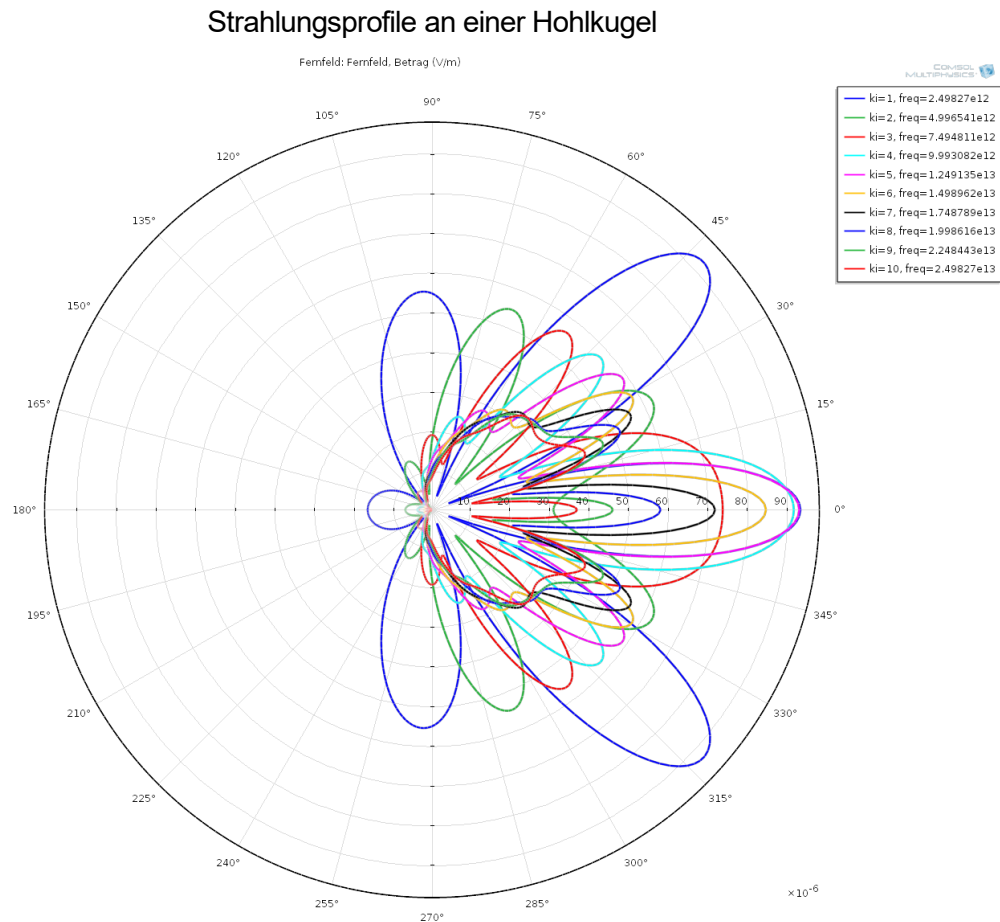


Abb.20 2-D Streustrahlungsprofile für das elektrische Fernfeld beim Auftreffen einer ebenen Welle auf eine Hohlkugel bei unterschiedlichen Wellenlängen.

Die größten Streuungsmaxima bilden sich in Einstrahlungsrichtung (von links nach rechts) heraus, einige auch in 40° hierzu. Eine Rückstrahlung entgegen der Einstrahlungsrichtung fällt dagegen sehr gering aus.

Die wichtigste Erkenntnis ist jedoch, dass auch in den zahlreichen 3D-Auwertungen keine Streumaxima größer 10^{-4} der eingestrahlten Feldstärke existierten. Für Strahlungsleistungen bzw. Energien muss dieses Verhältnis noch quadriert werden, d.h. die gestreute Leistungsdichte maximal nur 10^{-8} der primär eingestrahlten beträgt. Praktisch wirkt die Mie-Streuung nur wie eine sehr geringfügige Störung der Homogenität der Primärstrahlung. Energetisch wirkt sie sich maximal in der 8. Stelle nach dem Komma aus und dürfte daher auch messtechnisch nur schwer nachweisbar sein.

Die praktische Irrelevanz der Mie-Streuung wird folgende Fakten und Zusammenhänge noch erhärtet:

- Das Streufeld wurde im Abstand der halben Wellenlänge von der streuenden Grenzfläche berechnet. Für größere Abstände verringert sich die Streufeldstärke entsprechend
- Entsprechend ist die indirekte Streuung über mehrere Kugeln. Hier Multiplizieren sich die verketteten Streuwirkungen sehr schnell zu extrem kleinen Größenordnungen.
- In einer weiteren Simulation wurde eine relativ einfache komplexwertige Permittivität mit einer ionischen Resonanz bei $10\ \mu\text{m}$ Wellenlänge modelliert, wie sie annähernd auch für SiO_2 zutrifft. Dabei zeigte sich, dass sich die ausgeprägten Minima und Maxima in Richtung Durchschnittswerte nivellierten.

- Eine weitere Zunahme der diffusen Streuwirkung entsteht durch die unregelmäßige Anordnung und Größe der Kugeln in der Farbschicht, wodurch die Maximale Streuwirkung sich weiter dem Mittelwert annähert.

In der Simulation der Gesamtfeldstärke war gut erkennbar, dass sich bereits innerhalb oder außerhalb nahe der Kugeloberfläche „Brennpunkte“ bilden. Insgesamt kann auch ausgesagt werden, dass die Einstrahlung aus einem großen Raumwinkelbereich in einen engeren Raumwinkelbereich in Ausbreitungsrichtung fokussiert.

Eine Simulation der Absorptionseigenschaften erfordert detailliertere Materialdaten, die mit akzeptablen Aufwand nur messtechnisch zu ermitteln sind. Letzteres macht dann aber auch eine Simulation obsolet.

Fazit: Durch die Problemanalyse zur Modellierung der Mie-Streuung konnten die relevanten Parameter der Mie-Streuung aufgedeckt werden. Die Mie-Streuung konnte für den Anwendungsbe-
reich prinzipiell gut modelliert werden und ermöglicht klare Grenzwertabschätzungen zur Wirksamkeit der Mie-Streuung. Aus diesen geht hervor, dass der Mie-Streueffekt zur Erklärung der Wirksamkeit des ClimateCoating-Anstrichs keine praktische Bedeutung besitzt.

Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass die Strahlungseigenschaften hauptsächlich durch Transmission, Absorption und Reflexion an der Oberfläche des Anstrichs bestimmt werden. Durch die dünne Farbschicht wird ein relativ hoher Strahlungsanteil die Farbschicht durchdringen. Der restliche Anteil könnte durch Absorption und starke Temperaturgradienten an der Farboberfläche diese aufheizen und als Temperaturstrahler wirken lassen. Dafür sprechen sowohl der hohe Wärmewiderstand durch die eingelagerten Hohlräume, der dadurch verringerte Querschnitt und die längere Weglänge in der Acryl-Matrix als auch die geringe Wärmekapazität.

6. Simulationen zur Heizenergie-Ersparnis durch den Einsatz der thermokeramischen Membrantechnologie für den Innen- und/oder Außenanstrich an Gebäuden. (AP 6)

Abrechenbarer Schritt: Validierung der Berechnungen und Animationen, Vorlage der Ergebnisse
14. Woche

Es wurden nun auf der Basis der Ergebnisse der obigen Voruntersuchungen mit kompletten Raumklimasimulationen durchgeführt, die die Funktionsweise der Farbe deutlich machen und der Wirkungsweise normaler Acrylfarbe gegenüberstellen.

Hierzu wurde, wie in Abb. 15 in zwei Simulationen mit konventioneller Konvektionsheizung und moderner Decken-Strahlungsheizung die linke Seite mit komplett beschriebenen physikalischen Wirkungsweisen der normalen Acrylfarbe auf der rechten Seite gegenüber gestellt. Zur Vermeidung eines Staus in Fußbodenhöhe wurde die Testperson höher gestellt und somit ein Austausch in Bodennähe zugelassen.

Die Temperaturunterschiede rechts und links sind deutlich erkennbar. Zudem zeigt sich die ruhige Luftströmung bei der Strahlungsheizung links, die lediglich an der Kältebrücke rechts eine Turbulenz besitzt. Dagegen hat die Konvektionsheizung eine relativ hohe Turbulenz im gesamten Raum.

Temperaturprofile bei zwei Heizungsarten im Vergleich

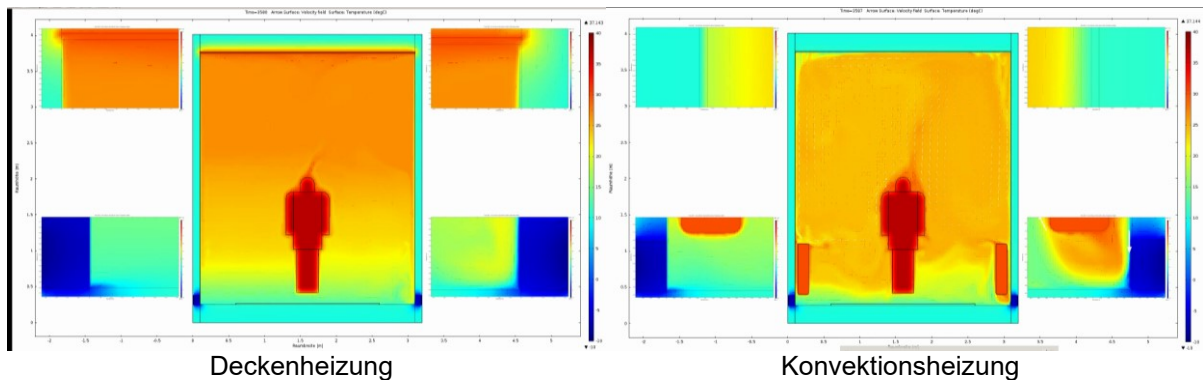


Abb.21 Darstellung der Temperaturprofile in je einem Testraum mit zwei Heizarten und mit einer Farbbeschichtung: links - ClimateCoating-Farbe, rechts – Acrylfarbe, wobei beiden Farben der Reflexionsfaktor 0,5 zugeordnet wurde. Die Detailansichten auf beiden Seiten offenbaren die Temperatur der Farbe und der Lufttemperatur in der Grenzschicht. Während die ClimateCoating-Farbe sich bereits erwärmt hat und sowohl die Wandtemperatur als auch die Temperatur der Kältebrücke abschirmt hat die Acrylfarbe nach einer Stunde eine deutlich niedrigere Temperatur ebenso wie die benachbarte Grenzschicht.

Die berechneten Temperaturen werden in Abb. 21 dargestellt und zeigen unten und in der Mitte die erwarteten Unterschiede zwischen rechts und links auf. In Kopfhöhe ist der Unterschied gering. Die starken Schwankungen der Messwerte im Fall der Konvektionsheizung entstehen durch die Turbulenzen in der Luft.

Körpertemperatur an der Testperson

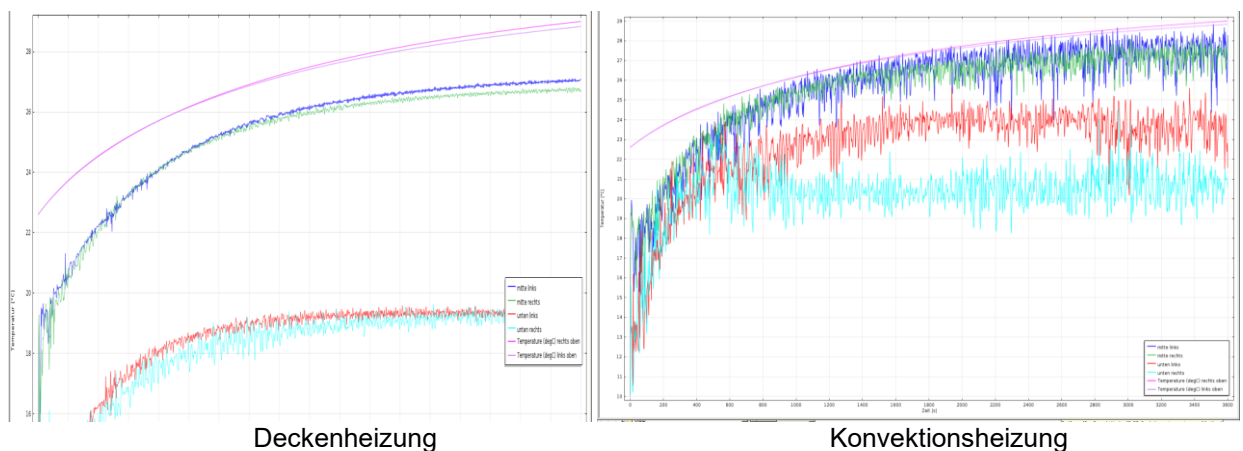


Abb.22 Darstellung der Temperaturverläufe in je einem Testraum mit zwei Heizarten und mit einer Farbbeschichtung: links - ClimateCoating-Farbe, rechts – Acrylfarbe, wobei beiden Farben der Reflexionsfaktor 0,5 zugeordnet wurde. In beiden Fällen ergibt sich ein leichter Unterschied zwischen Rechts und links, wobei die Konvektionsheizung eine höhere Luftströmung bewirkt, die zu einer höheren Schwankung der Messwerte führt. Der sich durch die Aufwärmung der ClimateCoating-Oberfläche ergebende höhere Strahlungsempfang auf der ClimateCoating-Seite ist hier nicht dargestellt.

Die Wirkung des Anstrichs konnte mit diesen Darstellungen ausgezeichnet erläutert werden. Sie zeigt, wie sich die linke ClimateCoating-Seite aufgrund ihrer geringen Wärmekapazität erwärmt, während sie zur darunter liegenden Wand aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit einen starken Gradienten bildet. Die warme Oberfläche wird vom Menschen als angenehm empfunden und trägt deutlich zu einer Wohlfühlatmosphäre bei. Zugleich wurde deutlich, dass auch eine Kältebrücke nicht bis an die Innenoberfläche durchdringen konnte. Der Kältestrom wurde lediglich an den unisolierten Fußboden geleitet. Ein Anstrich ist daher in der Lage, die sich dann an der kalten Oberfläche niederschlagende Feuchtigkeit zu verhindern. Das ist ein weiteres wichtiges Argument für die positive Wirkung des Anstrichs. Die Aufwärmung eines Raums mit zwei Heizungsarten und un-

verschiedene Anstrichen an den Wänden wurden auch als Video erstellt und dem Unternehmen für eine Messe-Demonstration übergeben.

Eine weitere wichtige Aussage über die Wirkung des Anstrichs kann mit der Bestimmung der Heizenergieersparnis gemacht werden. Dazu wurden zwei FEM-Rechnungen mit einem Raummodell durchgeführt, welches links eine „Außenwand besitzt und mit einer Außentemperatur von -10°C belegt wurde. Im Innern wurde eine Konvektionsheizung angeordnet, welches eine unterschiedliche Heizabgabe durch verschiedene Vorlauftemperaturen (90°C bzw. 60°C) herstellte. Die beiden Modelle erhielten Innen und links außen je einen Anstrich aus Acryl bzw. auch ClimateCoating-Farbe. In einer statischen Berechnung wurde das Endtemperaturprofil errechnet. Die in den beiden Fällen erforderliche Leistungsabgabe über die Radiatoroberfläche für einen nahezu gleichen Endzustand diente dann zur Bestimmung der Energieersparnis bei Heizung dieser beiden Raumvarianten.

Raumvariante mit einem Acrylanstrich innen und auf der linken Außenseite

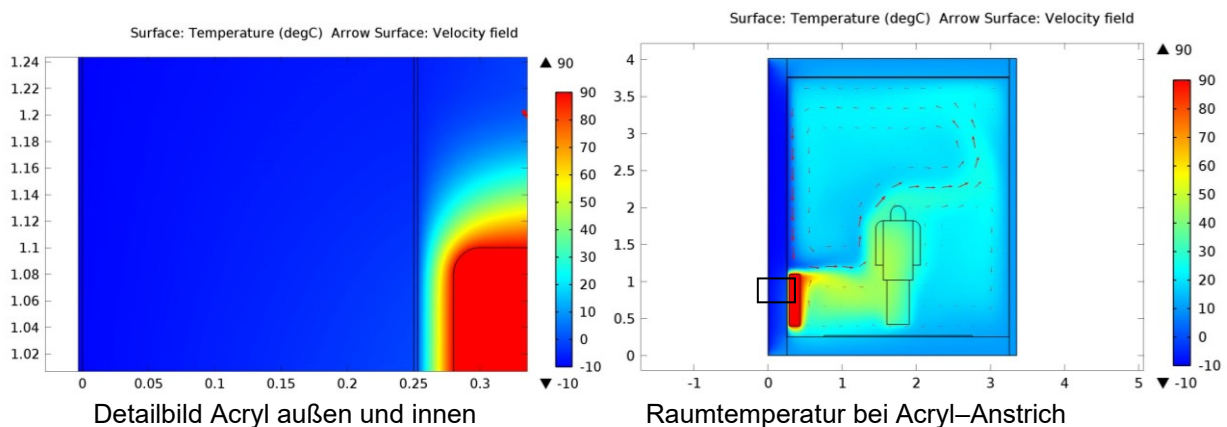


Abb.23 Darstellung der Temperaturverläufe in einem Testraum mit Konvektionsheizung und mit einer Farbbeschichtung bestehend aus Acrylfarbe (Reflexionsfaktor 0,5) auf der linken Außenwand und im Innenraum. Die Außentemperatur beträgt -10°C und die Vorlauftemperatur des Radiators 90°C . In einem Bildausschnitt, der in dem rechten Bild durch einen Rahmen angedeutet wird, erkennt man die vollständige Durchkühlung der Außenwand und den oberflächlich existierenden kalten Luftstrom. Erst die die Testperson umgebende Luft hat eine Temperatur ca. $24/25^{\circ}\text{C}$.

Raumvariante mit einem ClimateCoating-Anstrich innen und auf der linken Außenseite

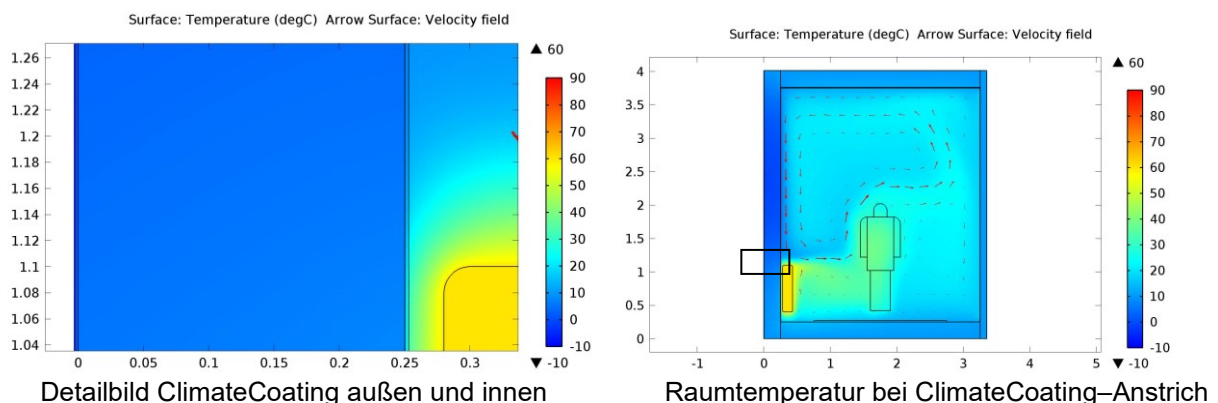


Abb.24 Darstellung der Temperaturverläufe in einem Testraum mit Konvektionsheizung und mit einer Farbbeschichtung bestehend aus ClimateCoating-Farbe (Reflexionsfaktor 0,5) auf der linken Außenwand und im Innenraum. Die Außentemperatur beträgt -10°C und die Vorlauftemperatur des Radiators 60°C . In einem Bildausschnitt, der in dem rechten Bild durch einen Rahmen angedeutet wird, erkennt man den Temperaturgradienten vom Außenanstrich über die Außenwand und dem Innenanstrich. Im Innenraum existiert

auch kein oberflächlicher kalter Luftstrom. Zudem ist der Raum gleichmäßiger gewärmt mit einer Temperatur von ca. 24/25°C.

Die beiden Berechnungen lieferten eine eindeutige Aussage zur Heizleistung. Während der erste Raum zum Erzielen des gleichen Endzustands eine Leistungsabgabe von 108 W/m ergab, war im zweiten Fall mit der ClimateCoating-Farbe nur eine Leistung von 63 W/m erforderlich. Damit ergibt sich ein Ersparnis von Heizenergie um ca. 40% bei Verwendung der ClimateCoating-Farbe.

Fazit: Durch die Modellierung eines Innenanstrichs mit ClimateCoating-Farbe auf der linken Seite und Acryl-Farbe auf der rechten Seite konnte ein wichtiger Nachweis der Funktion der Farbe geführt werden, der die Dämmwirkung, die schnelle Erwärmung an der Oberfläche und die Beeinflussung der Luftströmung in einem Vergleich links gegen rechts zeigte. Zudem wurde die Wirkungsweise bei einer Kältebrücke demonstriert, die im Standardfall zu einer feuchten und somit schimmigen Ecke führt.

In einem zweiten Vergleich wurde die erforderliche Heizleistung bei Anstrichen Innen und an der einen Außenwand errechnet. Es ergab sich eine deutliche Einsparung von über 40% an Heizenergie.

7. Berechnungs-Zusammenfassung und Dokumentation. (AP 7)

Abrechenbarer Schritt: Redesign und Dokumentation der Ergebnisse

Erstellung eines Endberichts mit Übergabe eines Berichts und einer DVD 16. Wo Woche

Der Endbericht wird mit diesem Dokument vorgelegt. Er brachte klare Hinweise zur Funktion und Wirkung der ClimateCoating-Farbe. Sie besteht einerseits in der Isolationswirkung durch die Vakuumkugeln als auch andererseits durch die infolge der hohen „Verdünnung“ des Anstrichs durch die Vakuumkügelchen sich ergebende sehr geringe Wärmekapazität. Dadurch kann sich die Farbe sowohl über die Strahlung als auch über die vorbeiströmende Luft schnell aufwärmen. Dies erzeugt den fühlbaren Wohlfühleffekt, da die warme Oberfläche auch gleichzeitig eine Wärmestrahlung abgibt. Weiterhin demonstrierten die gleichzeitig in der dynamischen Berechnung den Verlauf der Luftströme bei den verschiedenen Heizungsarten und den beiden Farbvarianten.

Ebenso konnten auch Hinweise für eine Optimierung der Farbe, die dem Unternehmen bei seiner Weiterentwicklung eine große Hilfe sein sollte. Dazu gehören die Größenverteilung der Glaskügelchen, die Reflektivität und nach vereinbarten späteren physikalischen Messungen auch Möglichkeiten der Oberflächenstrukturierung.

Da die erstellten dynamischen Berechnungen ausgezeichnete Simulationsabläufe liefern konnten, zusätzlich auch eine Reihe von Animationsvideos erstellt werden, die dem Unternehmen zu Werbezwecken zur Verfügung gestellt wurden.

Zusammenfassendes Fazit

Es gelang darzustellen, dass der Effekt der Farbe durch zwei wesentliche Eigenschaften entsteht. Der hohe Anteil der Farbe an Vakuumkügelchen erzeugt zunächst einen Isolationseffekt, zugleich wird durch die hohe Verdünnung des Acrylanteils eine deutlich geringere Wärmekapazität erzeugt. Die auftreffende Strahlung wird stark gestreut und im Innern absorbiert. Diese Eigenschaften (Streuung und Absorption verbunden mit einer geringen Wärmekapazität) bewirken eine schnelle Erwärmung der Farbe an der Oberfläche und eine geringe Wärmeleitung von der kalten Rückseite. Damit wird für eine im Raum befindliche Person eine wärmere Oberfläche erzeugt, die natürlich der Person auch eine

Wärmestrahlung abgibt. Dies wird vom Menschen schon bei geringen Temperaturerhöhungen als angenehm empfunden und dadurch schnell eine Wohlfühlatmosphäre erzeugt. In Verbindung mit einer Strahlungsheizung wird somit eine deutliche Absenkung der Heizleistung ermöglicht. Zugleich werden geringere Luftströmungen entstehen, da nicht mehr an einer kalten Wand ein hoher Fallstrom entstehen kann. An einer Kältebrücke wird, wie gezeigt, zugleich eine Isolation geschaffen, die die Entstehung einer feuchten Ecke verhindert. Es kann durch den Nachweis dieser für das Raumklima wünschenswerten Effekte und ihrer großen Wirkung mit sehr geringem Aufwand von einer Farbe der Zukunft gesprochen werden. Obwohl die Farbe teurer ist als gegenwärtig angebotene Acrylfarbe liefert sie eine kostengünstige und äußerst wirksame alternative, zu den teuren Dämmungsmaßnahmen in der gegenwärtigen Bauwirtschaft.