

ClimateCoating als Innenanstrich an Wänden und Decken - Eine Studie zu Reflexion, Backscattering, Behaglichkeit

Inhalt

1. Scattering, Stand der Wissenschaft Anfang der 2000er	2
2. Stand der Wissenschaft 10-15 Jahre später, Parallelen	4
3. Stand der Praxis, Empirische Belege	5
4. ClimateCoating und thermische Behaglichkeit	6
5. Raumklimaanalysen als wissenschaftlicher Nachweis	8
6. Messungen mit IR-Kameras (Referenzstreifenmethode)	9
7. Die Definition von IR-Reflexion und Backscattering für ClimateCoating	12
8. Anhang	13
8.1. Erläuterungen zur Raumklimaanalyse nach Prof. Dr.-Ing. Peter Marx	13
8.2. Reflexionsgradmessungen im Labor	16
8.3. Überlegungen zu Grundlagen für ein Berechnungsmodell zum Raumklima	17
8.4. Anhang: optische Streuung des IR in der Membran	24
8.5. Überlegungen zur rechnerischen Einbettung in der U-Wert-Formel	27

Version 220929

Dipl.-Ing. Matthias G. Bumann, DIMaGB, Berlin; +49-30-67489727, info@dimagb.de

Im Auftrag und für: SICC Coatings GmbH; Berlin, +49-30-500196-0, info@sicc.de

Abstract

Die Heizenergie sparende Wirkung der ClimateCoating Innenbeschichtung ist empirisch und messtechnisch belegt. Raumklimaanalysen belegen den positiven Einfluss auf das Raumklima, die Verbesserung der thermischen Behaglichkeit. Mit ClimateCoating beschichtete Räume werden schneller warm und sie kühlen langsamer aus. Unabhängig vom Heizsystem wird im Vergleich zu herkömmlichen Farben bei gleichem Energieeinsatz eine höhere Oberflächentemperatur erzielt, wodurch die Empfindungstemperatur (operative Temperatur) angehoben wird.

Die bislang diskutierte IR-Reflexion ist nicht mit der an nichttransparenten Oberflächen wie z.B. Aluminiumfolie zu vergleichen. Dies erklärt, warum nicht der Emissionswert die relevante Größe ist, sondern der Wärmestau in der ClimateCoating Membran, hervorgerufen durch die Backscattering Effekte innerhalb der Membran (Rückstreuung der IR-Strahlung zwischen den Millionen von Hohlkugeln).

Das Papier enthält eine Zusammenstellung der Grundlagen, um eine Implementierung in (herkömmliche) Berechnungsmethoden herbeizuführen.

1. Scattering, Stand der Wissenschaft Anfang der 2000er

ClimateCoating ist die Handelsmarke der SICC Coatings GmbH, Berlin, für oberflächenaktive Farben. Was wie eine gewöhnliche Dispersionsfarbe scheint, ist die thermo-keramische Membrantechnologie mit endothermischen Effekten.¹

Eine Besonderheit ist die Keramik in der Beschichtung, die Keramikhohlkugeln für die Membran mit einem Durchmesser von 10 bis 120 μm . Die Membranstärke beträgt 0,3 mm (300 μm = 0,0003 m) und die Kugeln sind mit 48...50 Vol.-% enthalten. Aktivoren sorgen für die Strukturausbildung der Membran. Mitte 2000 waren zudem die geometrischen Eigenschaften im Mikrobereich bekannt.²

Reflexion bedeutet: zurückwerfen, besser gesagt: zurückstrahlen, denn es geht um Vorgänge aus der optischen Physik bzw. Strahlungsphysik. Hierbei bewegen wir uns im Bereich der Solar- und der Wärmestrahlung. Scattering³ ist eine Sonderform, wobei es aufgrund der Beschaffenheit von Partikeln zu Streueffekten infolge Mehrfachreflexionen kommt. Backscattering bedeutet Rückstreuung, Wärmestrahlen werden dabei zurückgeworfen.

Eine wissenschaftliche Abhandlung von Dr. Y. Shnir aus 2003 zeigt auf, „dass die Wärmeverluste durch die Unterdrückung des Strahlungsfaktors mittels des Verbundüberzugs bis zu 50% verringert werden können. Untersucht wird die Optimierung der Wärmedämmwirkung, um die Bedingungen für eine maximale Verringerung des Strahlungsfaktors bei der Wärmeübertragung festzulegen“.⁴

Vom 4. bis zum 5. November 2004 fand in der Lounge im Turm in Berlin der 1st Scientific International Coating Congress statt.⁵ Mit den opto-physikalischen Vorgängen befasste sich der Vortrag von Dr. Shnir. Vermutlich erstmals wurden dabei die Scattering Vorgänge in einer thermokeramischen Membran im mathematisch-physikalischen Modell vorgestellt.⁶

¹ Gebrauchsmusterschrift des DPMA: Oberflächenbeschichtung mit endothermischen Effekten - Federal Republic of Germany, German Patent and Trademark Office, Declaration for Utility Patent Application, DE 203 14 145 U1 2004.01.29. Was bedeutet der Begriff thermokeramische Membrantechnologie mit endothermischen Effekten®? Thermo = es hat mit Wärme zu tun, keramische = die Farbe enthält keramische Bestandteile, Membran = die Farbe bildet nach dem Aufbringen eine Membran aus, Technologie = es handelt sich um mehr als nur Farbe, endothermisch = endotherme Reaktion = Energieaufnahme bzw. -gewinn (Wärme)

² Im August 2000 wurden durch die Werkstoffzentrum Rheinbach GmbH REM Bilder in unterschiedlichen Auflösungen erstellt und durch Lasergranulometrie wurde die Durchmesser-Verteilung von 10 bis 100 μm bei einem Verteilungsmaximum bei 33,31 μm (Median: 31,96 μm) und einem Schnitt von 41,7 μm gemessen.

³ Scattering (en) = Streuung (de); Surftipp: über den Suchbegriff „Scattering of Light“ gelangt man zu vielen Artikeln in englischer Sprache. Es geht über das einfache Reflexionsmodell am Spiegel hinaus.

⁴ J. Shnir, Institut für Physik, Universität Oldenburg, D-25111 Oldenburg: Mathematische Modellierung der Wärmeschutzeigenschaften des aus hohlen Keramik-Mikrokugeln bestehenden Verbundüberzugs: "Das Modell basiert auf der numerischen Lösung der Gleichung für die Strahlungsübertragung und auf der direkten Berechnung der Amplitude von auf eine hohle Mikrokugel gestreutem Licht. Dadurch wird der Prozess der Wärmeübertragung in einem derartigen Medium korrekt verdeutlicht und kann zur Berechnung der Wärmeschutzeigenschaften des Überzugs benutzt werden."

⁵ 1st Scientific International Coating Congress, die Referate liegen dem Autor als PDF vor.

⁶ Ya. Shnir, Institute of Physics, University of Oldenburg, A. Kokhanovsky, Institute of Environmental Physics, University of Bremen: Mathematical modelling of the heat-protection properties of the composite coating consisted of hollow ceramic microspheres. <http://www.ClimateCoating-kongress.de/referate/shnir.pdf>

Vom Fourier'schen Gesetz und den 3 Transportmechanismen für Wärmeenergie ging es zur Strahlungstransportgleichung. Von Raleigh und Mie Scattering werden nur wenige gehört haben, von der geometrischen Optik ist zumindest das Modell der Lichtbrechung an durchlässigen Medien präsent. Die Kernaussage verweist auf das Verhältnis der Partikelgröße zur Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung.⁷

Für die Berechnung der optischen Eigenschaften wurde ein ClimateCoating Modell aufgestellt und für die numerischen Algorithmen spektrale Charakteristiken verwendet, die von anderen Wissenschaftlern evaluiert wurden. In der Zusammenfassung wurde hervorgehoben, dass die oberflächenaktive Beschichtung nur im Zusammenhang mit Untergrund und Umgebung zu betrachten ist.⁸ Die disruptive Erkenntnis der wissenschaftlichen Untersuchungen resultiert im Zusammenhang des physikalischen Mechanismus' des Wärmeschutzes der ClimateCoating Beschichtung mit der Unterdrückung der Flusssdichte der Strahlungskomponente der Wärmeübertragung aufgrund der Auswirkungen der Lichtstreuung auf die Mikrokugeln.

Hierbei handelt es sich nicht um einen reinen Oberflächeneffekt, sondern um Rückstreuungseffekte innerhalb der Membran, in deren Modell die durchschnittliche Durchmessergröße ca. 7-mal geschichtet ist.

Auf dieser wissenschaftlichen Grundlage sowie empirischen Ergebnissen aus 2005, wie z.B. Energieverbrauchsanalysen⁹ wurden im Januar 2006 folgende theoretischen Ansätze für die thermokeramische Membrantechnologie mit endothermischen Effekten® abgeleitet¹⁰:

1. Die optischen Eigenschaften unterscheiden sich wesentlich von den herkömmlichen Betrachtungen zu transparenten und teilweise transparenten Medien
2. Anstelle der Begriffe Absorption und Vielfachreflexion ist der des Scattering aus dem Shnir-Modell zu verwenden, um die Vorgänge richtig beschreiben zu können. Dies gilt ebenso für die Standard-Gleichung für die Wärmeübertragung.
3. Es ist eine Isolierwirkung möglich, die nicht auf dem Prinzip der Wärmeleitung beruht und daher auch nicht danach beschrieben werden kann. Daher können relevante Unterschiede zwischen den Oberflächentemperaturen auf der Membran und auf der beschichteten Fläche bestehen: $TO1 > TO2$.
4. Die Membran wirkt hinsichtlich des Temperaturniveaus trennend bzw. isolierend, woraus sich die in der Praxis beobachtete thermische Entspannung der Oberfläche erklären lässt.
5. Thermografieaufnahmen können als Momentaufnahmen die Grundlage für Falschinterpretationen liefern. Bei quantitativen Aussagen (Punkttemperatur) sollte man weit vorsichtiger herangehen als bei qualitativen (Unterschiede in der Fläche).

⁷ „Efficiency of scattering depends on the thickness of the layer and the size of the particles: Optimization is possible.“

⁸ „The heat protection effect of the composite ClimateCoating substantially depends on the optical properties of the substrate (wall), the environment and on the temperature regime of operation.“ (Der Wärmeschutzeffekt der Verbundbeschichtung ClimateCoating hängt wesentlich von den optischen Eigenschaften des Substrats (Wand), der Umgebung und den Temperaturbedingungen ab.)

⁹ Z.B.: Heizkostenabrechnungen (HKA) im Vergleich, eine Energieverbrauchsanalyse (EVA), Auswertung der Daten von 2 Mehrfamilienwohnhäusern in Spremberg, Beschichtung mit ClimateCoating® vs. WDVS mit 8,0 cm Styropor?, SICC GmbH, dib, Zwischenbericht vom 16.12.2005

¹⁰ Dipl.-Ing. Matthias G. Bumann für SICC GmbH, Berlin: Die Alpha-Epsilon-Tau-Vorgänge bei der thermokeramischen Membrantechnologie mit endothermischen Effekten®, 11.01.2006

6. Praxisrelevant sind die Wellenlängen um die 10 μm , wenn man vom „Wärmeverlust“ über die Wandoberfläche spricht. Das entspricht dem Temperaturbereich -10°C bis $+10^{\circ}\text{C}$ für die Wandoberflächentemperatur in der Heizperiode.

7. Da aber auch in Wintermonaten Wandoberflächentemperaturen in der Größenordnung von über 40°C bei -10°C Außenluft messbar sind, sind die Mechanismen des solaren Ertrages einer näheren Betrachtung zu unterziehen.

8. Das validierte Shnir-Modell ist weiterzuentwickeln, Untersuchungen nach Dämmstoffnormen führen ins Leere. Es sind Optimierungen möglich, die aus dem Größenverhältnis Wellenlänge der Wärmestrahlung zu Kugeldurchmesser resultieren.

9. Es ist zu überprüfen, inwieweit einem mit der Ulbricht-Kugel bestimmter Laborwert für die Emissivität praktische Relevanz (Vor-Ort-Messung) zukommt bzw. wie eine gewisse Variabilität messtechnisch bestimmbar ist.

10. Legt man zugrunde, dass das effektive Emissionsvermögen des Verbundstoffes eine komplexe Funktion mehrerer Faktoren ist, die bislang labortechnisch nicht dargestellt wurden, muss man Überlegungen zu geeigneten Messmethoden anstellen.

2. Stand der Wissenschaft 10-15 Jahre später, Parallelen

Jahre später zeigte sich, dass die Vorreiterrolle der durch die SICC Coatings GmbH initiierten Forschung durch andere Forschungsergebnisse bestätigt wurde.

Dies betrifft zum einen den Einsatz der so genannten Microspheres:

„Eine Cenosphäre (Mikrohohlkugel, Mikrokugel, Microsphere) ist eine leichtgewichtige, inerte, hohle Kugel mikroskopischer Dimension, die vorwiegend aus Siliciumdioxid und Aluminiumoxid besteht. Sie ist mit Luft oder inertem Gas gefüllt.“¹¹

„Cenospheres PCS-U sind kugelförmige und staubarme Alumosilikat-Hohlkugeln, mit einer sehr guten Druckstabilität und einer ausgewogenen Dichte. Sie lassen sich leicht dispergieren und bewirken einen Kugellagereffekt. Kornbereich 50-300 μm .“¹²

Dies betrifft aber auch die Entdeckung der Bedeutung des IR Scattering: „Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass das Fell von Eisbären Wärme durch Streuung von IR-Licht speichert. Wissenschaftler haben entdeckt, dass Haare, die infrarotes Licht reflektieren, im Winterfell von Tieren wie Eisbären eine erhebliche Isolierwirkung haben können. Die Forschungsergebnisse, die in der Januarausgabe der Zeitschrift Optics Express der Optischen Gesellschaft (OSA) veröffentlicht wurden, könnten erhebliche Auswirkungen auf die Verbesserung der Isolierung von Gebäuden haben.“¹³

Bemerkenswert. Es geht um die Reduzierung der Wärmeverluste an der Oberfläche durch „IR Light Scattering“. Dieser Scattering Effekt bewirke signifikante Dämmwirkungen. Dabei geht es um Vorgänge aus der Optischen Physik, mithin um Strahlungsphysik.

¹¹ Jean-Marie Ruckebusch, Senior Technical Service Specialist: Solar heat reflective paint & coatings using 3M™ Glass Bubbles, 3M Energy and Advanced Materials Division - Specialty Additives Laboratory, 3M France, Tilloy lez Cambrai, 23.02.2012

¹² sh-minerals.de

¹³ Reflected IR light plays unexpected role in keeping animals warm, TECHNOLOGY NEWS, 24 January 2014, electrooptics.com

3. Stand der Praxis, Empirische Belege

Eine Verbesserung des thermischen Verhaltens der innen beschichteten Wand durch die ClimateCoating Innenbeschichtung zieht eine Verringerung des Energieverbrauchs nach sich. Das entspricht den praktischen Erfahrungen, Referenzen und Belegen. Demnach beträgt das Einsparpotenzial ca. 10 bis 15 %, in Ausnahmefällen bis zu 40 %.

Inzwischen liegt eine Übersicht zu den Einsparpotenzialen durch eine Innenbeschichtung mit ClimateCoating vor. Raumklimaanalysen, neben anderen Versuchen, belegen, dass durch ClimateCoating das u.a. Aufheizen eines Raumes verkürzt wird, das Auskühlen eines Raumes verzögert wird sowie die Raumluftheuchte in Richtung Optimum reguliert wird.

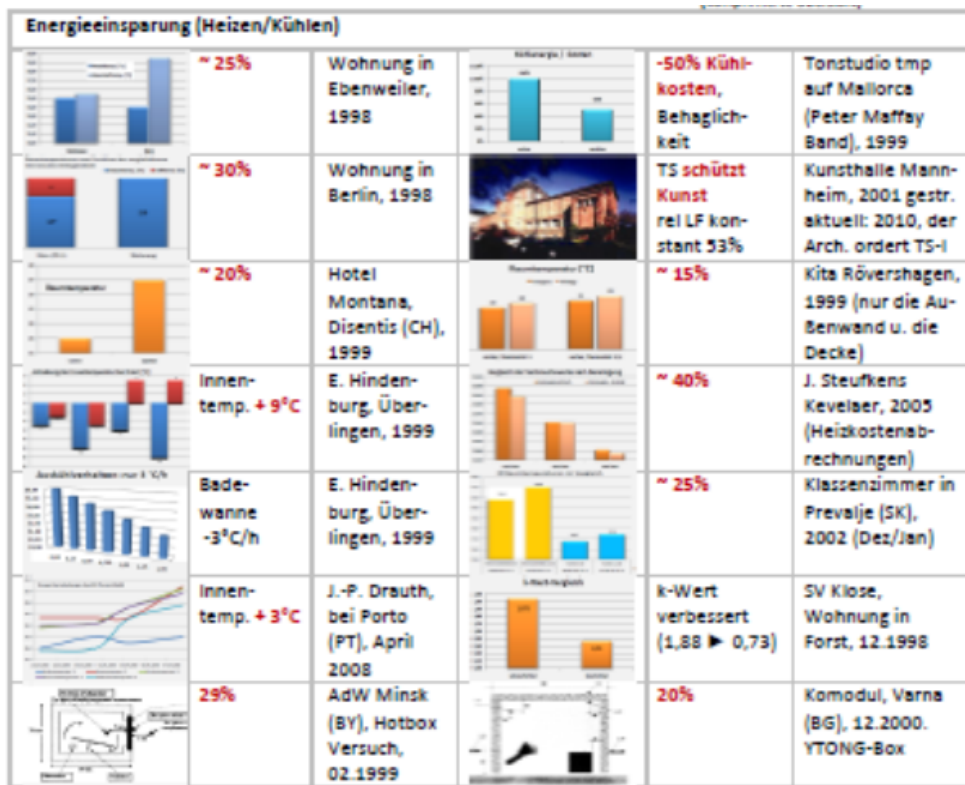


Abbildung 1: Faksimile aus der Übersicht vom Juni 2010 ¹⁴

Eine privat initiierte Messreihe aus Portugal zeigt ebenfalls auf: ClimateCoating hebt die Oberflächentemperaturen an, gleichzeitig erfolgt eine Vergleichmäßigung – die Empfindungstemperatur steigt. Zudem wird die Raumluftheuchte einreguliert und die Wand entfeuchtet.

Zitat: „Beim Streichen der halben Decke bemerkte ich schon den Effekt, es war auf jeden Fall kein Kaltstrahler mehr.“

Das eigentlich Bemerkenswerte an dieser Messung war die Fast-Gleiche von Wandoberflächentemperatur und Raumluftheuchte. Nach U-Wert-Theorie würde dies bedeuten, dass der innere Wärmeübergangswiderstand fast völlig aufgehoben wäre.

¹⁴ ClimateCoating : Energieeinsparung + Behaglichkeit (komprimierte Übersicht), SICG GmbH, Berlin, 06.2010

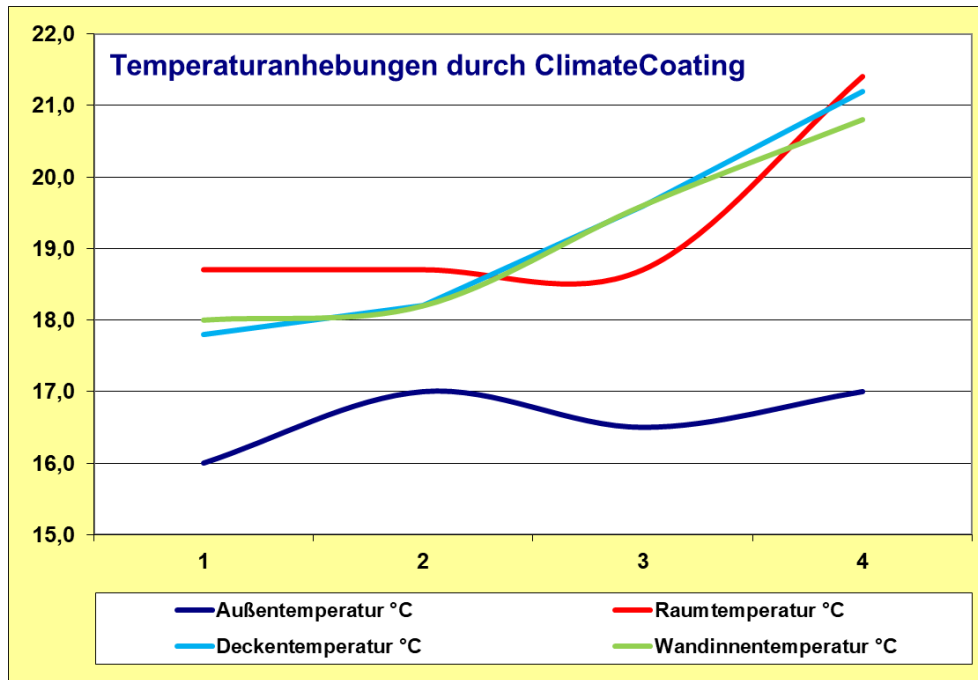


Abbildung 2: Messdiagramm zu der Messreihe von April 2008 in Portugal ¹⁵

Erkennbar ist eine starke Annäherung der Temperaturen nach der Beschichtung. Ein Wärmewiderstand mit dem Betrag 0 würde aber bedeuten, dass die Wärme an dieser Stelle ungebremst durchfließt – Raumtemperatur und Oberflächentemperatur wären identisch. Anderenfalls würde jeder Wert des inneren Wärmeübergangswiderstandes größer 0 eine Temperaturveränderung an der Oberfläche bewirken, d.h. die Oberflächentemperatur wäre etwas niedriger als die Raumtemperatur.

Dieser Widerspruch stellt sich aber nur in der U-Wert-Theorie dar, die im Wesentlichen keine Strahlungsvorgänge kennt. In der U-Wert-Theorie wurden zudem die Rohdichte des Baustoffes sowie seine spezifische Wärme aus der Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung gestrichen, um allein das Dämmvermögen als Umkehr des Wärmeleitwertes dominieren zu lassen.

4. ClimateCoating und thermische Behaglichkeit

Der Einsatz von ClimateCoating führt zu Energieeinsparungen, weil die thermische Behaglichkeit im Raum verbessert wird, so dass mit weniger Heizenergieeinsatz dasselbe Behaglichkeitsergebnis erzielt wird.

Im Zusammenhang mit Fassadendämmung (Wärmeschutz nach DIN 4108) geht die U-Wert-Theorie von einer Anhebung der Oberflächentemperatur der Außenwand innen aus, was sich auf Behaglichkeit und Schimmelprävention auswirkt.

Dieser Effekt lässt sich mit ClimateCoating erreichen, wie zahlreiche Referenzen und wissenschaftliche Auswertungen zeigen. Hierbei führt die Verbesserung der thermischen Behaglichkeit zu den Energieeinsparungen, weil die Raumnutzer die Thermostate der Heizkörper etwas zudrehen können, ohne auf thermischen Komfort verzichten zu müssen.

¹⁵ ClimateCoating im Wohnhaus in Portugal, Temperaturanhebung und Feuchteregulierung, SICC GmbH, dib, 21.05.2008

Primär sind die Oberflächenvorgänge durch die ClimateCoating Beschichtung, die fast unabhängig von der Wandqualität ablaufen (sofern ein Mindestniveau gegeben ist). Bei Eingang in die U-Wert-Formel bedeutet der Wärmewiderstand von ClimateCoating eine Anhebung des inneren Wärmeübergangswiderstandes R_{si} .

Die ISO-Norm 7730 befasst sich mit der Ergonomie der thermischen Behaglichkeit. Thermische Behaglichkeit (Bewertung "0" oder "neutral" in einer Skala zwischen +3 = zu warm und -3 = kalt) ist "der Umstand, unter dem Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung ausgedrückt wird."

Es liegt ein Gleichgewicht zwischen der aktivitätsbedingten Wärmeproduktion des menschlichen Körpers und der gerade vorliegenden Wärmeabgabe an die Umgebung vor, ohne dass der Körper eigens dafür besondere Anpassungsleistungen ("Thermo-Stress") erbringen müsste.

Die Variablen des thermischen Feldes in der Wichtigkeit ihrer Bedeutung sind

- die Strahlungstemperatur θ_{rmt} ,
- die Lufttemperatur θ_a ,
- die relative Luftgeschwindigkeit v_{rel} und
- die Luftfeuchtigkeit p_a (Wasserdampfpartialdruck).

Entscheidend ist der Temperatureinfluss. Solange sich Luft- und Strahlungstemperatur nicht wesentlich unterscheiden (was sie im Interesse der Behaglichkeitsnebenbedingungen nicht tun sollten), kann man beide Temperaturen zu einer "empfundene" oder "operativen Temperatur" kombinieren:

$$\theta_{op} = (\theta_a + \theta_{rmt})/2$$

Für Räume, die für den dauernden Aufenthalt von verschiedenen Personen bestimmt sind, lassen sich die Anforderungen für einen gehobenen Komfort (entspr. PPD < 6 %) formulieren:

- Schwankungen der operativen Temperatur in Raum und Zeit: $\Delta\theta_{op} = \pm 0.8 \text{ K (max.)}$
- Begrenzung des Zugluftrisikos auf $DR < 8 \%$: $v_{rel} < 0.08 \text{ m/s}$
- Strahlungstemperatur-Asymmetrie (Decke/Boden): $\Delta\theta_{r_ass} < 5 \text{ K}$
- Vertikaler Lufttemperaturunterschied zwischen Kopf und Fußknöchel bei einer sitzenden Person $\Delta\theta_{1.1_0.1m} < 2 \text{ K}$
- Auch das Gesamtmaß noch erlaubter Änderungen der operativen Temperatur mit der Zeit wird begrenzt.

Eine weitere Anforderung der ISO-Norm 7730 bezieht sich auf die sommerliche Behaglichkeit in klimatisierten Räumen, die sicherstellen soll, dass die Schwülegrenze nicht überschritten wird. Systeme, die bestimmungsgemäß die Feuchtigkeit regulieren sollen, sollen in der Lage sein, einen Wasserdampfpartialdruck unter 1910 Pa (= $19,1 \text{ hPa}$) entsprechend einer Taupunkttemperatur von 16.8 °C zu halten.

Belastbare Belege für die Energie einsparende Wirkung von ClimateCoating sind neben den Referenzen aus der Praxis die wissenschaftlichen Nachweise in Form der Raumklimaanalysen, die sich mit den Parametern der vorn beschriebenen Behaglichkeitsnorm ISO 7730 befassen.

5. Raumklimaanalysen als wissenschaftlicher Nachweis

Über einen Zeitraum von 15 Jahren wurden folgende Raumklimaanalysen durchgeführt: ¹⁶

- 2005, Deutschland, im Bürogebäude der DW in Bonn
- 2009, Schweden, im Bibliotheksgebäude in Stockholm
- 2010, Deutschland, im Bürogebäude der IVG in Bonn
- 2014, Niederlande, im Seniorenheim Driebergen
- 2015, Niederlande, im Seniorenheim Amersfoort
- 2019, Niederlande, im Rathausgebäude von Breda

Die durchgeführten Messungen belegen die energetische und den Raum klimatisierende Wirkung von ClimateCoating zum einen und die Aussagen zum Produkt zum anderen.

Durchgeführt wurden die Messreihen von Prof. Dr.-Ing. Peter Marx von der TFH Berlin, Labor für elektronische Messtechnik (Fachbereich VII: Elektrotechnik und Feinwerktechnik) bzw. Fa. MX Elektronik.

Eingesetzt wurde der Raumklima-Analysator MS 01A, über den bereits in der Fachzeitschrift „Heizung - Lüftung - Haustechnik“ 26 (1975) Nr. 9, S. 317-321 berichtet wurde. Der Anhang enthält Erläuterungen hierzu. Jahre später findet sich in der Fachliteratur ein Bericht über ähnliche Messgeräte (Katathermometer, Frigorimeter, Klimasummenmessgeräte mit bipolarem Transistorsensor) und -methoden. ¹⁷

Die durchgeführten Messungen beweisen folgende Wirkungen:

- Der mit Climate Coating beschichtete Raum heizt sich schneller auf.
- Der mit Climate Coating beschichtete Raum kühlt langsamer aus.
- Die ClimateCoating Beschichtung verbessert die thermische Behaglichkeit durch
 - eine erhöhte Oberflächentemperatur der Hüllflächen
 - eine gleichmäßigere Verteilung der Hüllflächentemperatur
 - die dadurch verbesserte gefühlte (operative) Temperatur
 - die Verringerung der Raumluftbewegung (Luftzug)
- Die ClimateCoating Beschichtung reguliert die Luftfeuchte (Pufferwirkung).
- Die ClimateCoating Beschichtung bewirkt einen sommerlichen Kühleffekt.

¹⁶ Die Protokolle und Auswertungen liegen dem Autor als PDF vor.

¹⁷ E. Loose: Zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit, in: Gesundheits-Ingenieur 112 81981) Heft 1, Seite 27-30, eine PDF Kopie befindet sich beim Autor

6. Messungen mit IR-Kameras (Referenzstreifenmethode)

Ein Versuch mit hochauflösender Infrarotkamera ging 2018 der Frage nach: Ist das Aufheiz- und Abkühlverhalten ohne Raumklimaanalysen messbar? ¹⁸



Abbildung 3 (links): Das Monitorbild der hochauflösenden IR-Kamera, die Messung erzeugt eine Datenwolke.



Abbildung 4: Die präparierte Kellerwand, herkömmliche Farbe und ClimateCoating, dazu ein Referenzstreifen.

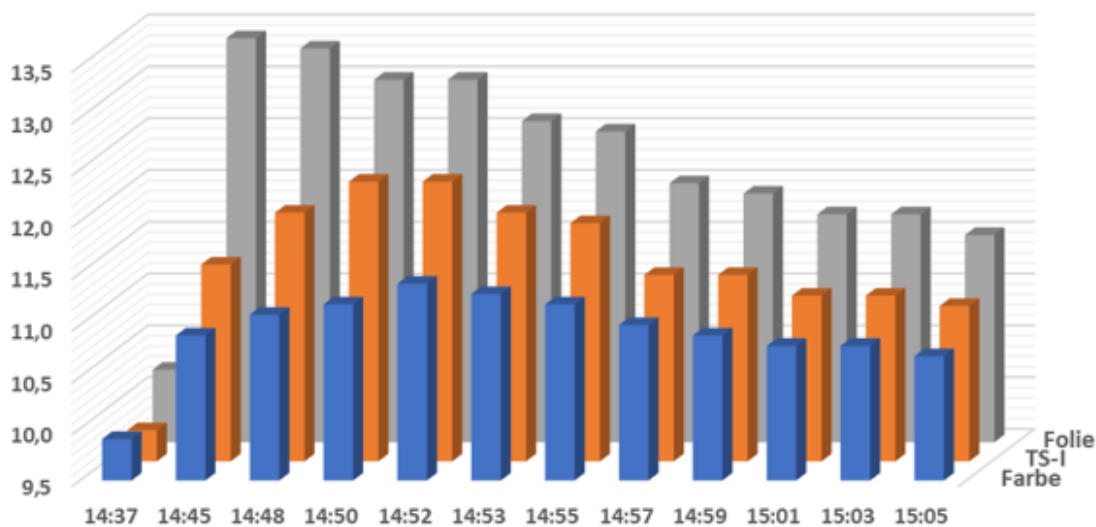


Abbildung 5: Grafische Darstellung der Messwerte zum Aufheiz- und Abkühlverhalten

Die mit ClimateCoating beschichtete Wand wird schneller erwärmt und sie kühlt langsamer aus als die mit herkömmlicher Dispersionsfarbe beschichtete Wand. Die Wärmebildkamera ist hochauflösend und die Höhe der Messlinie ist aufgrund des Statives konstant. Die sprunghaft stärkere Erwärmung der Folie ist darauf zurückzuführen, dass diese auf der an der Wand angebrachten Längenmaßfolie aufgeklebt wurde.

Messtechnisch wurde zunächst die vielfach wiederholte empirische Beobachtung bestätigt, dass mit ClimateCoating beschichtete Oberflächen schneller warm und langsamer kalt werden im Vergleich zu herkömmlichen Farben. Dies bewirkt eine Einsparung an Heizenergie sowie eine bessere thermische Behaglichkeit, wie bereits durch Raumklimaanalysen in der Vergangenheit

¹⁸ Dipl.-Ing. Bend Bonso, Dipl.-Ing. Matthias G. Bumann: Protokoll über die messtechnische Bewertung des Aufheiz- und Abkühlverhaltens von mit Dispersionsfarbe und CC beschichteten Testflächen (Wand), Berlin, 15.03.2018

bestätigt. Dies ist eine qualitative Bewertung, eine Quantifizierung – z.B. für Rechenwerte – ist hiermit nicht möglich.

Bemerkenswert ist das lange Verharren der Wärmebilder der „Handabdrücke“ im Infrarot. Diese waren über 4 Minuten im Kameramonitor zu sehen. Nach gängiger Theorie müsste aber die von der Hand eingebrachte Wärme durch Wärmeleitung und -strahlung rasch abgeführt werden.

Offensichtlich weisen selbst Baustoffe wie Beton ein Wärmeverharrungsvermögen auf, wobei dieser Zeitfaktor in der U-Wert-Theorie keine Berücksichtigung findet – wie auch das Speichervermögen nicht (Nullsetzung in der Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung und dadurch Alleinstellung der Wärmeleitung).

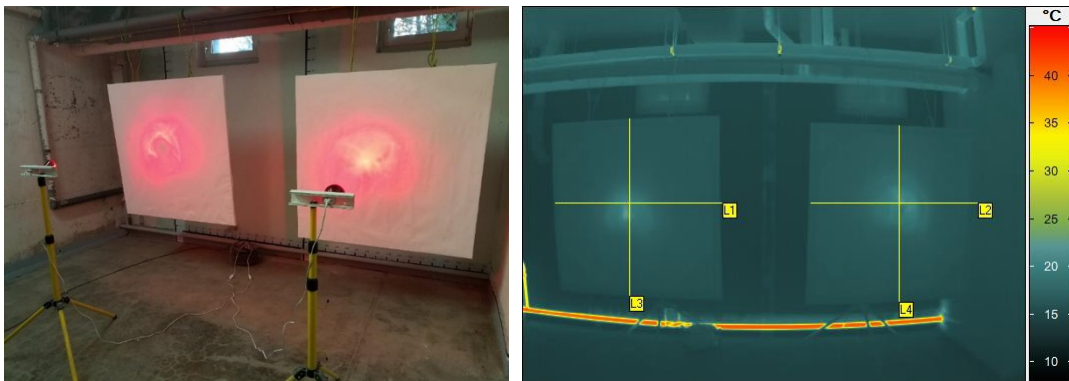


Abbildung 6 (links): Messanordnung mit auf Holzrahmen aufgespannten, beschichteten Textilien.

Abbildung 7: Zur Auswertung auf der Datenwolke aufgelegte Messpunktlinien L1 u. L2, waage- und senkrecht.

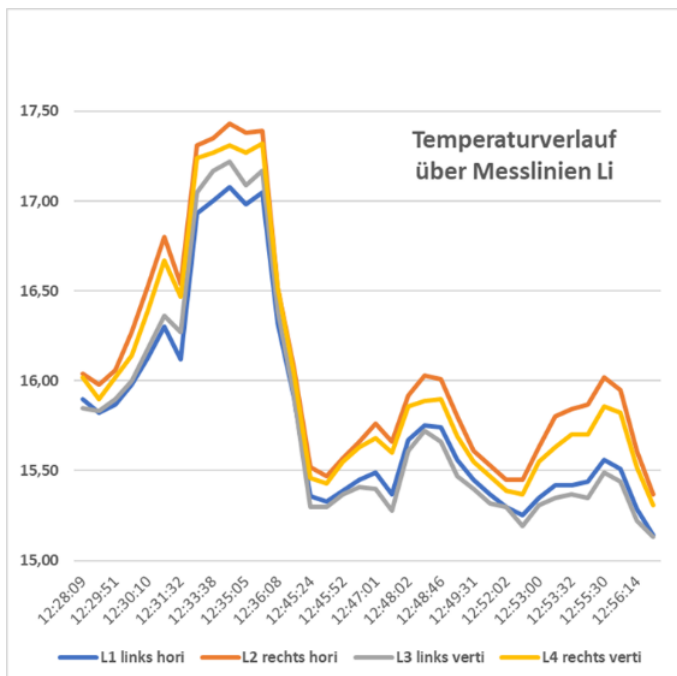


Abbildung 8: Unterschiede im Aufheiz- und Auskühlverhalten, ClimateCoating mit höheren Temperaturen.

Die aus den Raumklimaanalysen und Erfahrungsberichten bekannten Erscheinungen des schnelleren Aufheizens und verlangsamten Auskühlens der mit ClimateCoating beschichteten Probeflächen konnte im Versuch mit IR-Kamera als Messgerät reproduziert und somit nachgewiesen werden. Erkennbar ist zudem der Einfluss der Masse der Probefläche hinter der Beschichtung.

Eine Wiederholung dieser Messreihen erfolgte 2022 an gleicher Stelle, diesmal mit einer Fluke IR Handkamera.¹⁹

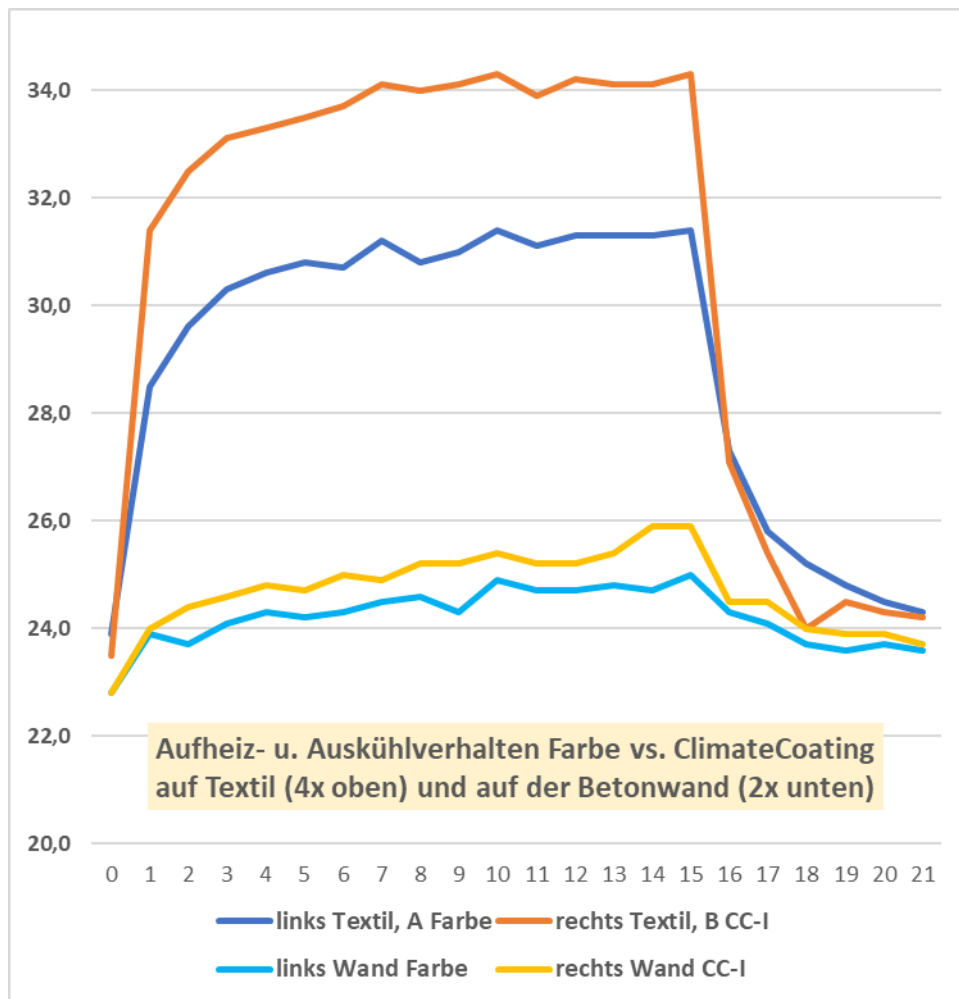


Abbildung 9: Verlaufskurven der Oberflächentemperaturen Farbe vs. ClimateCoating auf Textil / Wand.

Im Ergebnis wurde bestätigend festgestellt:

Die mit ClimateCoating beschichteten Flächen

- werden schneller erwärmt im Vergleich zu „Farbe“.
- erreichen eine höhere Oberflächentemperatur.

Der Temperaturabfall nach dem Ausschalten der IR-Lampen erfolgt

- bei „Farbe“ und bei „ClimateCoating“ gleichermaßen abrupt.
- bei beiden Oberflächen auf fast identische Werte.

Der Einfluss von Masse äußert sich bei der beschichteten Betonwand

- im geringeren Temperaturanstieg beim Aufheizen.
- im verlangsamten Auskühlverhalten.

¹⁹ Dipl.-Ing. Matthias G. Bumann: Messprotokoll, Bestimmung des Aufheiz- und Auskühlverhaltens der Oberflächen von zwei Innenfarben auf Probekörpern aus Textil und auf Beton, Berlin, 11.08.2022

Im Zuge dieser Messreihe sollte ermittelt werden, ob ein signifikanter Wert für die IR-Reflexion der ClimateCoating Beschichtung feststellbar ist.²⁰

Die Teststreifen sind ein spezielles Klebeband mit $\varepsilon = 0.95$ (epsilon, Emissionswert). Der voreingestellte Wert bei IR-Kameras ist $\varepsilon = 0.95$, der bei Baustoffen am häufigsten vorkommende emissionswert ist $\varepsilon = 0.95$. Man misst die Oberflächentemperatur des Referenzstreifens, dann der Testfläche daneben. Wird derselbe Wert angezeigt, hat die Oberfläche eine Emissivität von 0,95. Wird ein anderer Wert angezeigt, stellt man in der IR-Kamera so lange einen anderen Emissionswert ein, bis die Oberflächentemperaturen von Referenzstreifen und Testfläche übereinstimmen.

10:29	Rechte Wandfläche (ClimateCoating)
Referenzstreifen mit ε 0.95	24,1 – 24,3 °C
um den Streifen herum (ε 0.95)	23,5 – 23,8 °C
um den Streifen herum (ε 0.93)	23,8 – 24,1 °C
um den Streifen herum (ε 0.92)	24,1 – 24,4 °C

Abbildung 10: Messwerttabelle mit dem Abgleich zum Referenzstreifen

Diese Messungen wiederholt man, um rein statistisch den Messfehler durch die Datenmenge zu verringern. Letztendlich wurde das Ergebnis aus der Initialmessung bestätigt: $\varepsilon = 0.92$ für den ClimateCoating Innenanstrich.

Aufgrund der Beziehung $E = A$ und $A + R = 1$, also $E + R = 1$ drängt sich die Frage auf: Wie kann eine Innenfarbe ohne nennenswerte messbare IR-Reflexion (low-e) die thermische Behaglichkeit verbessern?

7. Die Definition von IR-Reflexion und Backscattering für ClimateCoating

Ein Emissionswert von 0,92 ist nahe bei 0,95 angesiedelt und weit entfernt von so genannten Low-e-Schichten. Ein Emissionswert von 0,92 bedeutet zudem, dass der Absorptionswert ebenfalls 0,92 beträgt und nur 8 % reflektiert werden. So lässt sich die Anhebung der Oberflächentemperatur nicht erklären. Denklogisch wäre zudem die Annahme, dass ein hoher Reflexionswert zum Strahlungsverlust der Hüllfläche führen müsste – und somit die Oberflächentemperatur eher abnehmen würde.

Der wesentliche Unterschied von ClimateCoating zu herkömmlicher Farbe besteht darin, dass die Membran transparent ist, genauer gesagt: semi-transparent. Die auftreffende Wärmestrahlung wird nur zu ca. 8% reflektiert, 92 % werden von der Membran aufgenommen. Bei der nichttransparenten Farbe wird die Wärme direkt, d.h. auf kurzem Wege über den Innenputz an den Wandbaustoff weitergegeben.

In der ClimateCoating Membran hingegen erfolgt durch das Backscattering ein Wärmestau und infolgedessen eine erhöhte Oberflächentemperatur. Das Emissionsverhalten mag weiterhin dasselbe sein, aber die Intensität nimmt zu – die im Raum zurückgehaltene Wärmemenge.

²⁰ Dipl.-Ing. Matthias G. Bumann: Messprotokoll, Bestimmung der Emissivität von zwei Innenfarben nach der Referenzstreifenmethode, Berlin, 11.08.2022

8. Anhang

8.1. Erläuterungen zur Raumklimaanalyse nach Prof. Dr.-Ing. Peter Marx

Der Raumklimaanalysator, 1975 von Prof. Dr.-Ing. Marx, TFH Berlin, und Ing. Schlüter, Bundesgesundheitsamt, erfunden, erfasst mehrere Behaglichkeitskriterien im Innenraum. Somit lassen sich Zustände und Effekte objektivieren. Das Gerät arbeitet zuverlässig und es liefert brauchbare Ergebnisse. Leider ist es bis dato nicht gelungen, das Messgerät handlich klein und modern zu akzeptablen Kosten in Serie zu produzieren. Ein wesentlicher Hemmschuh ist das Desinteresse der Kreise, die professionell mit dem Innenraumklima zu tun haben. Diese Einstellung ist Interessen geleitet, was auch für den Zustand der Normen zutrifft.

Das vorliegende Dokument soll anhand einer durchgeführten Messung erläutern, dass das Verfahren relativ einfach und praktikabel ist. Im Ergebnis liegt eine umfassende objektive Beurteilung des Raumklimas vor. Der Nutzen erschließt sich durch die hier gegebene Schritt-für-Schritt Anleitung.

Ein weiteres Ziel besteht darin, einen Partner zu finden, der das Messgerät in zeitgemäßer Ausführung produziert und einer breiten Masse von Fachleuten zu einem akzeptablen Preis anbieten kann. Die vermehrte Anwendung trägt zu einer realitätsnahen Fortschreibung der Normen bei. Kerninhalt ist die Erfassung der Raumwinkel getreuen Raumumschließungstemperaturen (Strahlungstemperaturen) und deren Einführung in die Normen und Berechnungsverfahren.



Abbildung 11: das Messgerät mit der Ableleskala (Foto: DIMaGB)

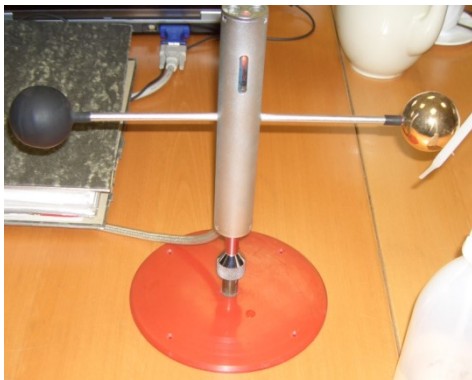


Abbildung 12: die Messköpfe schwarz und gold (Foto: DIMaGB)

Bild 4
Blockschaltbild des rechnergeführten Raumklima-Analysators

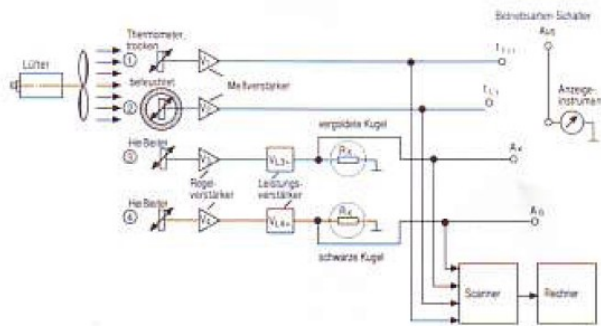


Abbildung 13: Blockschaltbild des Raumklimaanalysators (Grafik: Prof. Marx)

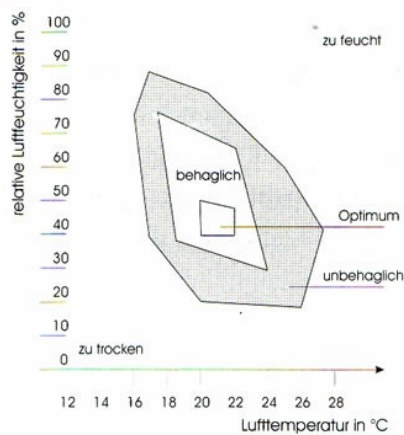


Abbildung 14: Behaglichkeitsdiagramm (Grafik: Umweltschutz BW)

Gemeinhin bekannt sind die stark vereinfachten Grafiken, welche lediglich Raumtemperatur und Raumluftfeuchte beinhalten (siehe Abbildung oben). Bekannt ist, dass die Beschreibung des Raumklimas komplexer zu erfolgen hat. Diesem Anspruch wird die Methode nach Prof. Marx gerecht. Folgende Klimakennwerte werden messtechnisch erfasst:

- Lufttemperatur trocken
- Lufttemperatur feucht
- Mittlere Umschließungsflächentemperatur
- Empfindungstemperatur
- Luftbewegung
- Relative Raumluftfeuchte

Das Prinzip ist genial einfach: die schwarze Kugel reagiert auf Konvektion und Strahlungstemperatur, die goldene Kugel nur auf Konvektion ($\alpha = \varepsilon = 0$). Ein weiterer Sensor befindet sich im Stativ, er ist von Strahlungseinflüssen abgeschirmt.

Das für die messtechnische Erfassung und Auswertung erforderliche Nomogramm bildet alle oben genannten Messgrößen ab. Dabei stellen alle Skalen, egal ob Gerade oder Kurve, eine Abbildung einer Funktion im karthesischen Koordinatensystem dar. Es sind also durch Formeln darstellbare naturwissenschaftliche Beziehungen. Z.B. ist die Empfindungstemperatur das Mittel aus der Hüllflächentemperatur und der Raumlufthtemperatur.

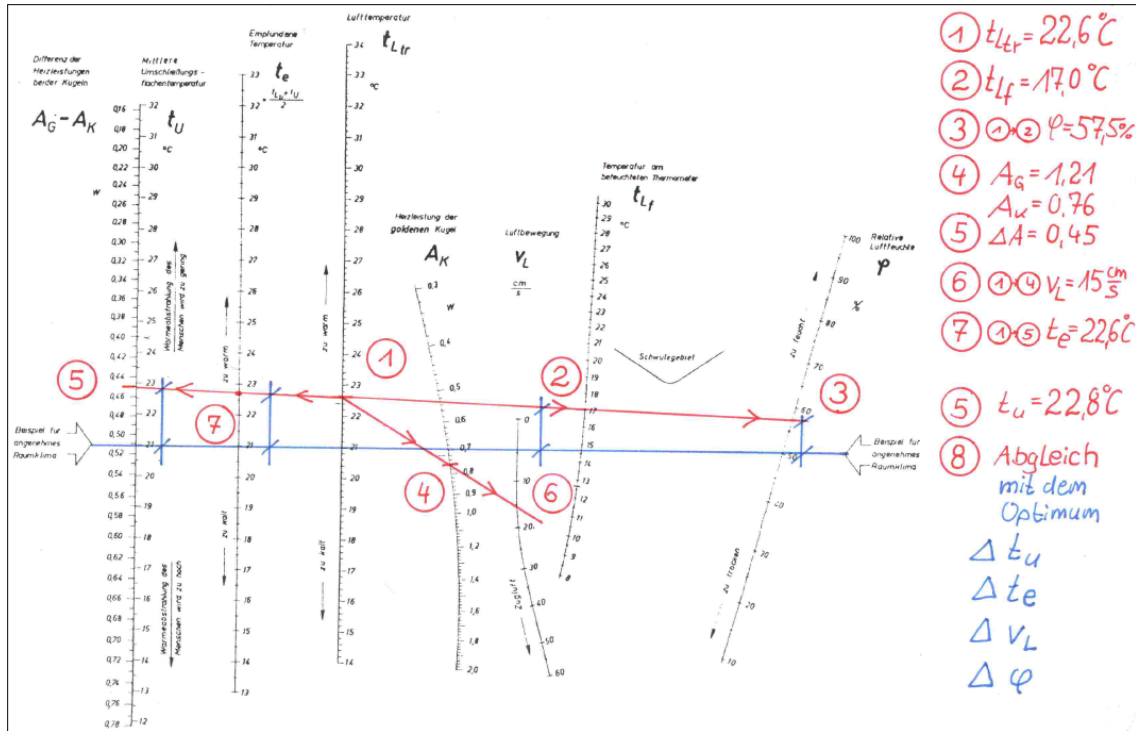


Abbildung 15: Das Auswertungsnomogramm nach Prof. Marx







Raumluftqualität	Turbulenzgrad	Feuchte und Temperatur
 <p>Mehr zur Raumluftqualität</p> <p>Die Kohlendioxidkonzentration und die Raumluftqualität in Innenräumen gelten als wichtigste Indikatoren für eine ausreichende Qualität der Raumluft.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Raumluftqualität bewerten durch CO₂- und weitere Messungen ✓ CO₂-Konzentration sollte 1000 ppm nicht überschreiten 	 <p>Mehr zum Turbulenzgrad</p> <p>Die Luftgeschwindigkeit in Räumen hat direkten Einfluss auf die thermische Behaglichkeit.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Der Turbulenzgrad drückt die Luftgeschwindigkeitsschwankung und die Intensität der Luftströmung aus ✓ Lufttemperatur und Turbulenzgrad genau erfassen 	 <p>Mehr zu Feuchte/Temperatur</p> <p>Die Parameter Lufttemperatur und relative Feuchte sind wichtig bei der Planung, Auswahl und Einstellung der Heizungs- und Lüftungsanlage.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Empfehlungen für die relative Luftfeuchte: 30% bis 65%
 <p>Mehr zur Strahlungswärme</p>	 <p>Mehr zur Behaglichkeit</p>	 <p>Mehr zur Lichtmessung</p>

Abbildung 16: 47 Jahre nach Erfindung des Raumklimaanalysators von Prof. Marx bietet Fa. Testo eine Messausrüstung zur Bestimmung der Behaglichkeitsparameter an. (Screenshot vom 15.08.2022)

8.2. Reflexionsgradmessungen im Labor

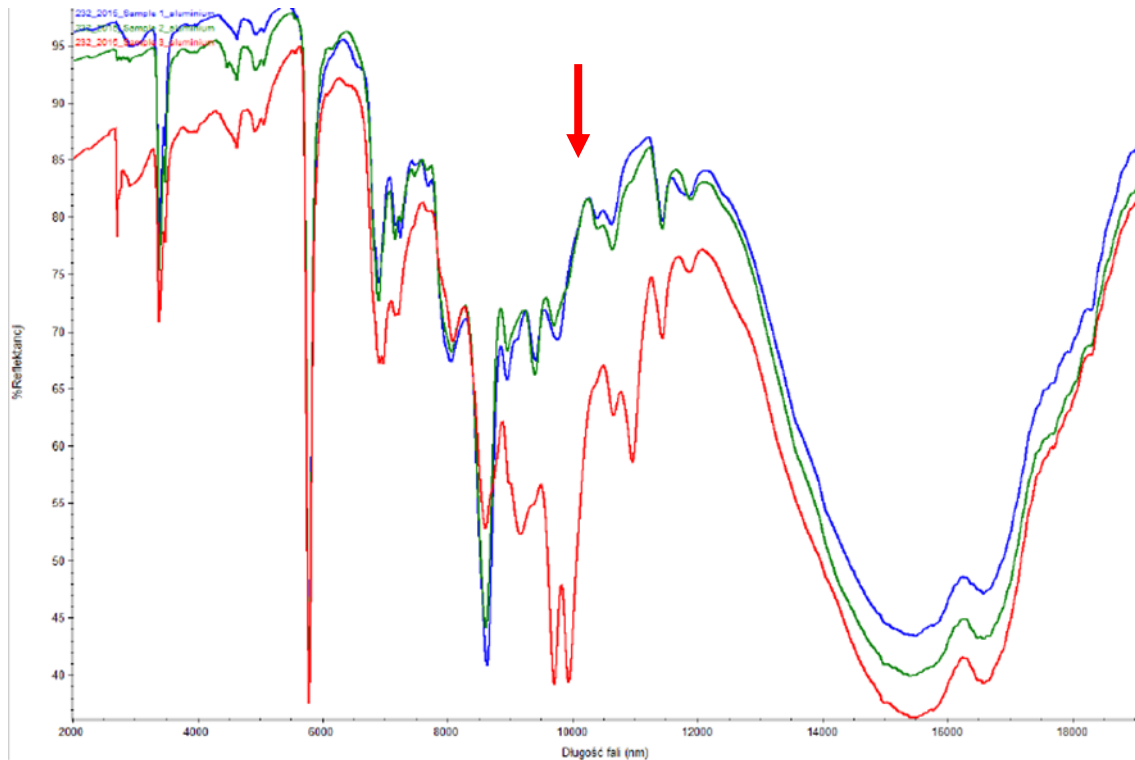


Abbildung 17: Die IMPiB Messung aus 2015 (3 Produkte). Die Reflexion ist skaliert ab 30%.

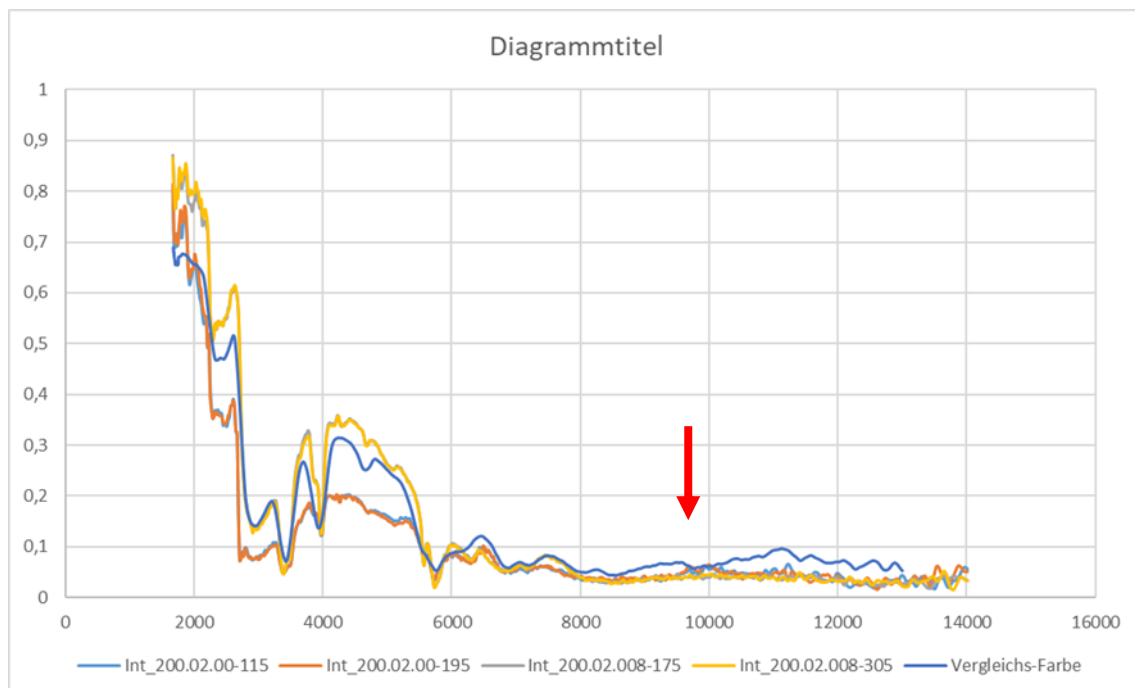


Abbildung 18: Die Messung vom MPA Weimar, Juni 2020

Der rote Pfeil bezieht sich auf die Relationen nach Wienschem Verschiebungsgesetz (Raumtemperatur): $15^{\circ}\text{C} = 10,0 \mu$, $20^{\circ}\text{C} = 9,9 \mu$, $25^{\circ}\text{C} = 9,7 \mu$. Mit Bezug auf die Raumklimaanalysen stellt sich die Frage: Wie kann eine Innenfarbe ohne nennenswerte messbare IR-Reflexion die thermische Behaglichkeit verbessern?

8.3. Überlegungen zu Grundlagen für ein Berechnungsmodell zum Raumklima

Vorwort

Es geht um Infrarotstrahlung / Wärmestrahlung / Strahlungswärme und Behaglichkeit. Dieses Dokument ist (noch) nicht abgeschlossen, da es als Arbeitspapier fortgeschrieben wird, sofern neue Erkenntnisse und Ergebnisse einfließen. Es soll einen breiten Empfängerkreis erreichen, deshalb ist es etwas schlichter formuliert.

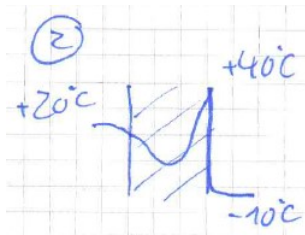
Grundlagen



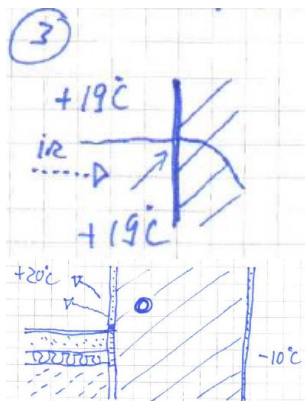
Das U-Wert Schema ist eine stark vereinfachte Modellbildung. Sie ist so stark vereinfacht, dass sie nur bedingt zur Realität, zu den Vorgängen an einem Gebäude passt. Es gibt zwei Steuergrößen (Wert 1 = die Innenlufttemperatur, Wert 2 = die Außenlufttemperatur) und einen Wärmewiderstand des Bauteils.

Hieraus resultiert ein konstanter Wärmestrom von innen nach außen. Die veränderlichen „Wärmeübergangswiderstände“ innen und außen (Bauforschung der 20er Jahre, J.S. Cammerer) sind in der rechnerischen und analytischen Handhabe zu kompliziert, so dass sie auf konstante Werte normiert wurden. Das Zustandekommen ist nicht bekannt.

Einige einfache Beispiele zeigen, warum diese Theorie nicht praxistauglich ist.



Eine Situation im Winter, innen +20°C, außen -10°C. Die Sonne erwärmt die Hauswand auf +40°C, die oberflächennahe Schicht auf über +20°C. Solange die Temperatur dort über +20°C beträgt, findet kein Wärmestrom von innen nach außen statt. Dieses Aussetzen des Wärmestroms ist bilanzwirksam. Der Wärmestrom ist durch diese Barriere zeitlich blockiert, somit werden die Wärmeverluste verringert.



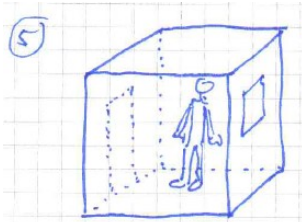
Ausgehend von gemessenen Werten der Innenraumlufttemperatur und der Wandoberflächentemperatur, die nach erfolgter ClimateCoating Beschichtung gleich hoch sind. Der Wärmeübergangswiderstand innen ist demnach = 0? Der Wärmestrom q müsste nun gegen Unendlich gehen, stünde nicht der Widerstand der Wand davor.

Eine typische Situation für eine Temperierung, d.h. das Gebäude wird nicht „beheizt“, sondern in eine warme Umgebung gebracht. So hat man es bereits zuhauf in Bayern in Museen und anderswo praktiziert, weiterhin in die Neuzeit übernommen und als neu verkauft.

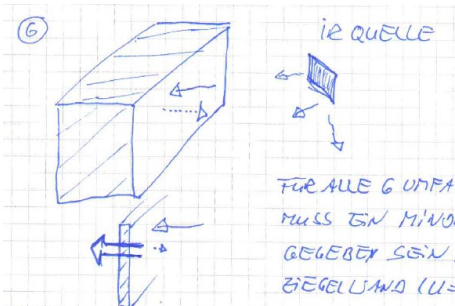
Diese Situation lässt sich mit dem U-Wert-Schema nicht darstellen oder erklären. Die Lufttemperatur ist nicht die bestimmende Größe, sondern sie läuft nach. Nach U-Wert-Theorie müsste aufgrund des „schlechten“ U-Wertes der Wand ein immenser Wärmeverlust erfolgen, sozusagen würde die Umgebung geheizt und nicht der Innenraum. In der Praxis funktioniert das System mit niedrigen Verbrauchswerten und gleichzeitig erfolgt ein Schutz vor aufsteigender Feuchte.

Literatur zu Temperierung:

- DIE TEMPERIERUNG - VERFAHREN ZUR THERMISCHEN BAUSANIERUNG, RAUMTEMPERIERUNG UND KLIMATISIERUNG IN MUSEEN UND ANDEREN GEBÄUDEN LANDESSTELLE FÜR DIE NICHTSTAATLICHEN MUSEEN IN BAYERN, Herausgeber: Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen beim Bayrischen Landesamt für Denkmalpflege, Prinzregentenstr. 3, 8000 München 22, Bearbeiter: Henning Großschmidt, Redaktion: Dr. Wolfgang Stäbler, München, Juni 1992
- Bauteiltemperierung in Theorie und Praxis, EURA-Ingenieure, Neumarkterstr. 75, 81673 München, 15.03.2006
- Schloß Schönbrunn, Wien, und das Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg: „Klima in Museen und historischen Gebäuden. Die Temperierung“, 2004, als Band 9 der wissenschaftlichen Reihe Schönbrunn – Literaturkonvolut ebenda

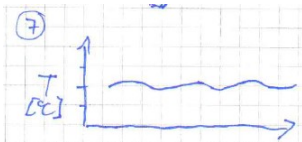


Da nun geklärt ist, dass sich das Berechnungsmodell schwerlich vom U-Wert-Schema ableiten lässt, muss ggf. ein anderes Modell entwickelt werden. Dies sollte zunächst ohne Zonierung erfolgen, d.h. alle Räume sollen dieselbe Innenraumlufttemperatur haben, so dass die Innenwände auflösbar sind. Man stellt den Menschen ins Zentrum dieses Raummodells, da für den Menschen Häuser gebaut werden und weil zur Schaffung dessen behaglicher Zustände geheizt wird. Das Primat liegt nicht auf der Steuergröße Raumlufttemperatur.

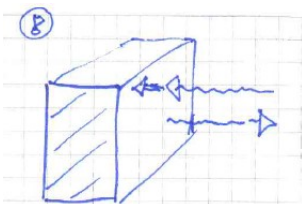


Im ersten Schritt soll ein 2-D-Modell geschaffen werden. Bei einer IR Heizungsquelle geht es um Strahlungsaustausch, der an der Innenoberfläche der Außenwand stattfindet. Dennoch kann man den Zustand der Außenwand nicht gänzlich vernachlässigen. Versucht man sich vorzustellen, wie es in einem Haus mit 10 cm dicken Wänden zugeht, erschließt sich das Erfordernis eines Mindestwärmeschutzes. Dieser ist bei typischen Wandstärken von 36,5 bzw. 38 cm zzgl. Putz gegeben. Nach unten erreicht man dann irgendwann

den Zustand der Grenzwertigkeit, der spätestens bei 24 cm dicken Ziegelwänden erreicht ist.

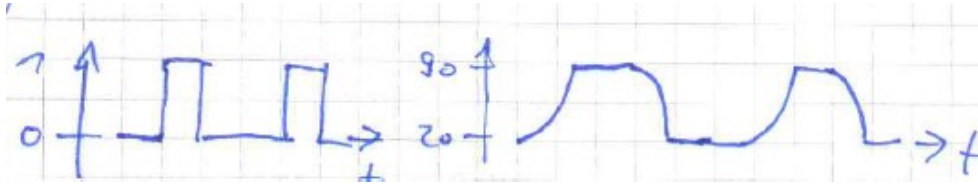


Entscheidend für die Modellbildung ist das Behaglichkeitskriterium. Neben einer gut ausgeprägten Symmetrie gehören hierzu kleine Unterschiede der Oberflächentemperaturen, auch wenn die Strahlungsheizung nur temporär angeschaltet ist.



Ein weiterer Aspekt ist die Definition des inneren Wärmeübergangswiderstandes. Bei einer Strahlungsheizung gibt es keinen Wärmeübergangswiderstand. Entscheidend ist die Absorption der Wärmestrahlung und das Rückstrahlverhalten in den Raum (Emission, Sekundärstrahlung). Hier gibt es klare Relationen: $\alpha + \rho = 1$ und $\alpha = \epsilon$.

Der einzige „Widerstand“ bei Wärmestrahlung ist demnach ein schlechtes Absorptions-respektive Emissionsverhalten. Die Strahlungsintensität ist über das so genannte T-hoch-4-Gesetz (Stefan-Boltzmann-Gesetz) definiert, das Wien'sche Verschiebungsgesetz gibt zu einer Temperatur das Maximum der Wellenlänge an.



Der Betrieb von Strahlungsheizungen ist nicht kontinuierlich, es gibt An-Aus-Zyklen. Diese lassen sich ganz einfach mit 1 und 0 auf dem Zeitstrahl darstellen. Für die Oberflächentemperatur der Strahlungsquelle ergibt sich ein Sägezahnmuster. Das hier ablesbare Aufheiz- und Auskühlverhalten hängt von den verwendeten Materialien und dem Systemaufbau ab. Dennoch ist die Kurve für die Oberflächentemperaturen des Raumes sehr viel flacher.

Eine „bauphysikalische“ (und nicht: physiologische) Größe ist die Empfindungstemperatur:

$$t_e = (t_{L,tr} + t_u) : 2.$$

$t_{L,tr} = t_u$ wäre ideal.

Legende:

t_e Empfindungstemperatur

$t_{L,tr}$ Lufttemperatur, trocken

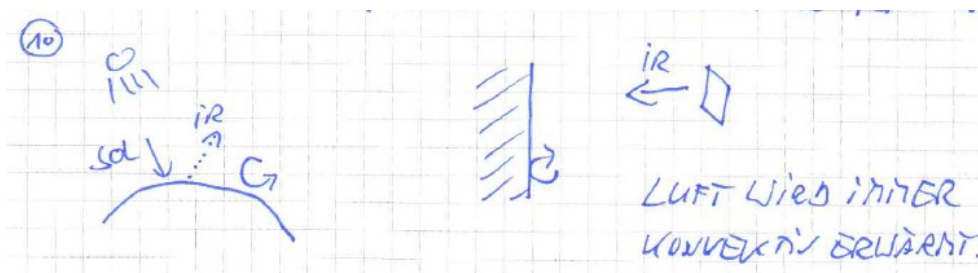
t_u Umgebungstemperatur, mittlere Oberflächentemperatur der Hüllflächen

Ein Zahlenbeispiel soll die Bedeutung dieser objektiven Kenngröße verdeutlichen:

Konvektion: $t_e = (24,0 + 20,0) : 2 = 22^\circ\text{C}$

IR-Heizung $t_e = (22,5 + 21,5) : 2 = 22^\circ\text{C}$

$\Delta t_{L,tr} = 2,5 \text{ K} \rightarrow 2,5 \times 6,0 = 15\% \text{ Heizenergieeinsparung (Faustformel: 6\% je } 1^\circ\text{C)}$



Die Raumluft wird konvektiv erwärmt, das ist vergleichbar mit der Situation an der Erdoberfläche, wo konvektiv erwärmte Luft aufsteigt und das Wetter beeinflusst.

Die Lufterwärmung auf eine Temperatur $t_{L,tr}$ ist also sekundär, wegen t_e aber nicht egal. Dass die Strahlungsheizung auch im Vakuum funktioniert, hat eher akademische Bedeutung, soll aber nicht unerwähnt bleiben. Die Luft ist nun mal vorhanden, also muss auch sie nach Behaglichkeitskriterium konditioniert werden.

Zu berücksichtigen ist auch, dass es immer Konvektion und Strahlung gibt. Wichtig ist die Relation. Die Tabelle gibt hierzu Anhaltswerte.

System	Anteil Strahlung	Anteil Konvektion
Kachelofen	80%	20%
Plattenheizkörper	20%	80%
Plattenheizkörper, mod.	40%	60%
Flächenheizung	60%	40%
IR-Heizung	70%	30%

Tabelle 1: Anteil von Strahlung und Konvektion bei verschiedenen Heizsystemen

Aus den vorangestellten Überlegungen werden folgende

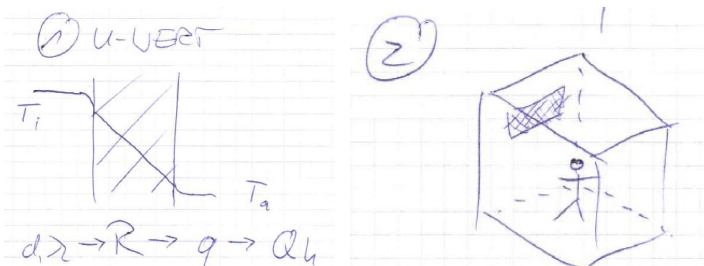
Thesen

abgeleitet:

1. Ein Mindestwärmeschutz der Gebäudehülle muss gegeben sein.
2. Entscheidend für den Wärmetransport der Außenwände ist die Temperaturleitfähigkeit – und nicht die Wärmeleitfähigkeit.
3. Einige Bilanzgrößen bleiben unverändert:
 - a. Innere Gewinne
 - b. Lüftungswärmeverluste
 - c. Solare Gewinne über die Fenster
 - d. Als Zugeständnis:
die solaren Gewinne über die Außenwände sei gem. Norm = 0
4. Das Primat hat das Behaglichkeitskriterium.
Insbesondere betrifft dies te.
 - a. $t_{L,tr}$ und t_u : möglichst $\Delta = 0$
 - b. $t_{L,tr} = 19...20^\circ\text{C}$
 - c. Infolge konvektiver Erwärmung läuft die Lufttemperatur der Wandoberflächentemperatur nach.
5. Es ist eine hohe Symmetrie der Heizung erforderlich:
 - a. To der Hüllflächen rel. Hoch
 - b. Keine Strahlungssenken
 - c. Wenig Konvektion = Symmetrie der Lufttemperatur

Zielwertdefinition

Zum Rekapitulieren: die U-Wert Theorie. Gegeben sind T_i und T_a . Die Materialkennwerte d (Wanddicke) und λ (Wärmeleitfähigkeit) definieren den Wärmewiderstand der Wand durch sein rein konduktives Verhalten (Wärmeleitung). Es resultieren der Wärmestrom q und der Heizwärmebedarf Q_h .



Zur Wärmestrahlung: Die abgegebene Leistung wird über die Strahlungsintensität I_{IR} über die Zeit definiert. Zwischen diesem Wert und der Leistungsaufnahme P liegt der Wirkungsgrad als Faktor, welcher System und Fabrikat abhängig ist. Der Wert der Sekundärstrahlung wird über die Oberflächenbeschaffenheit definiert. Die Strahlungsintensität I_{IR} ist so zu steuern, dass eine angenehme Empfindungstemperatur t_e erzeugt wird. Dabei müssen sich die Luftbewegung v_L und die Luftfeuchte ϕ (rel. LF) im optimalen Bereich befinden.

Die Empfindungstemperatur t_e hängt primär von der mittleren Hüllflächentemperatur t_u ab. Diese wiederum befindet sich in messbarer Abhängigkeit.

$$t_u = \sum f (T_{o,i} ; \varepsilon_{IR,i} ; F_i ; d_i)$$

Legende:

i	der Index der Teilfläche
T_o	Oberflächentemperatur
ε_{IR}	Emissionsverhalten im Bereich 9,75...10,0 μm
d	Distanz der Einzelfläche

Die Einzelfläche ist eben und vertikal (Wand) oder horizontal (Decke) angeordnet. Die Distanz hängt vom Standort der Person (des Raumklimaanalysators) ab und sie beeinflusst die eingehende Strahlungsstärke bzw. auch den Nettostrahlungsverlust zu Strahlungssenken (z.B. ein Fenster, das „kalt abstrahlt“).

Problembeschreibung

Umfangreiche Empirik und wissenschaftliche Untersuchungen (insbesondere die Raumklimaanalysen) haben bewiesen, dass eine Innenbeschichtung mit ClimateCoating die Behaglichkeit verbessert und somit zu Heizenergieeinsparungen führt. Die Ursachen sind, bei Beibehaltung aller anderen Faktoren wie auch des Heizungssystems:

- angehobene Oberflächentemperaturen
- verringerte Unterschiede der Oberflächentemperaturen
- in summa hat die Veränderung von t_u eine Verbesserung von t_e bewirkt

Hier entsteht aber ein scheinbarer Widerspruch: Wenn gilt: $\alpha + \rho = 1$ und $\alpha = \varepsilon$, dann bedeutet eine erhöhte Oberflächentemperatur eine erhöhte Emission und eine verringerte Reflexion. Bei ClimateCoating ist aber die so genannte IR Reflexion (Scattering, Backscattering) ein wichtiger Wirkmechanismus. Die Besonderheit besteht, im Unterschied zu rein opaken Oberflächen, darin, dass die eingehende Strahlung zunächst absorbiert wird, dann aber infolge der Streuprozesse auf stark verlängerte Wege gebracht wird (Verteilung innerhalb der Membran) und „in den Raum zurückgestreut wird“.

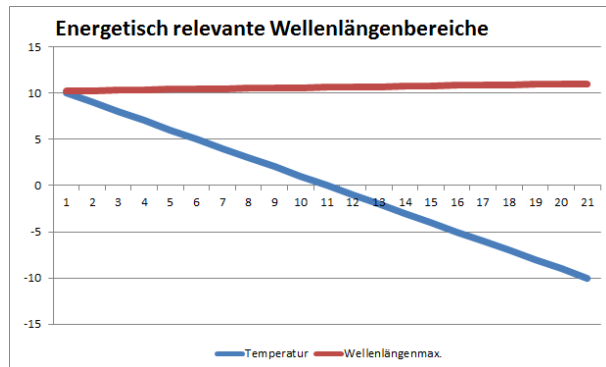
These:

Es muss also ein ausgeprägter Unterschied zu opaken Oberflächen bestehen, da die grundlegenden physikalischen Gesetze nicht außer Kraft gesetzt werden können. Die angehobene Oberflächentemperatur der Hüllflächen ist auf das Vorhandensein einer Wärmestrombarriere zurückzuführen: das Backscattering innerhalb der Membran mit den Mikrohohlkugeln.

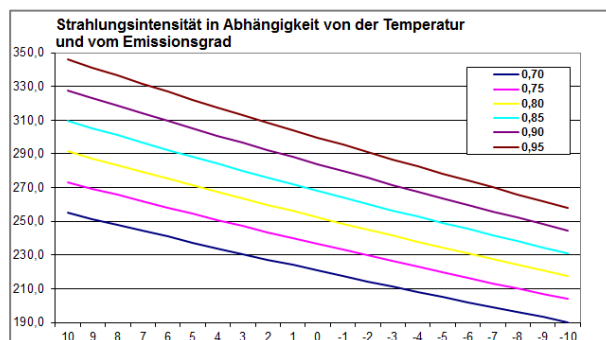
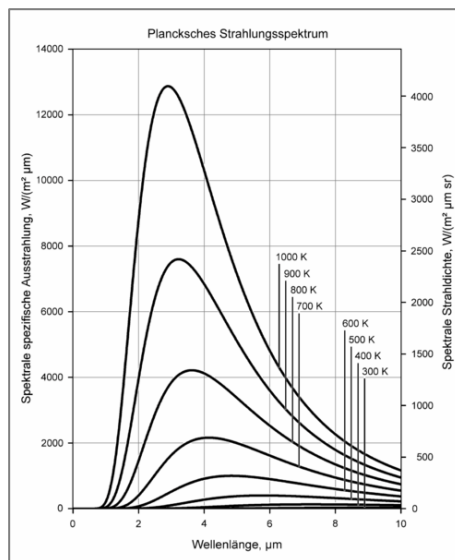
Die im Shnir-Modell zur Mie Streuung beschriebenen Prozesse sind durch Simulationen darstellbar. Kommt noch der Wärmestau aus der Stegtheorie (Isolierwirkung durch verlängerte Wärmeleitungswege) hinzu, muss die aufgestaute Wärme gemäß zurückgestrahlt werden.

Anhang: etwas Strahlungsphysik zum IR (1)

T [K]	T [°C]	$\lambda_{\text{max.}}$ [μm]
308,15	35	9,40
307,15	34	9,44
306,15	33	9,47
305,15	32	9,50
304,15	31	9,53
303,15	30	9,56
302,15	29	9,59
301,15	28	9,62
300,15	27	9,66
299,15	26	9,69
298,15	25	9,72
297,15	24	9,75
296,15	23	9,79
295,15	22	9,82
294,15	21	9,85
293,15	20	9,89
292,15	19	9,92
291,15	18	9,95
290,15	17	9,99
289,15	16	10,02
288,15	15	10,06
287,15	14	10,09
286,15	13	10,13
285,15	12	10,16
284,15	11	10,20
283,15	10	10,23
282,15	9	10,27
281,15	8	10,31
280,15	7	10,34
279,15	6	10,38
278,15	5	10,42
277,15	4	10,46
276,15	3	10,49
275,15	2	10,53
274,15	1	10,57
273,15	0	10,61
272,15	-1	10,65
271,15	-2	10,69
270,15	-3	10,73
269,15	-4	10,77
268,15	-5	10,81
267,15	-6	10,85
266,15	-7	10,89
265,15	-8	10,93
264,15	-9	10,97
263,15	-10	11,01
262,15	-11	11,05
261,15	-12	11,10
260,15	-13	11,14
259,15	-14	11,18
258,15	-15	11,23
257,15	-16	11,27
256,15	-17	11,31
255,15	-18	11,36
254,15	-19	11,40
253,15	-20	11,45

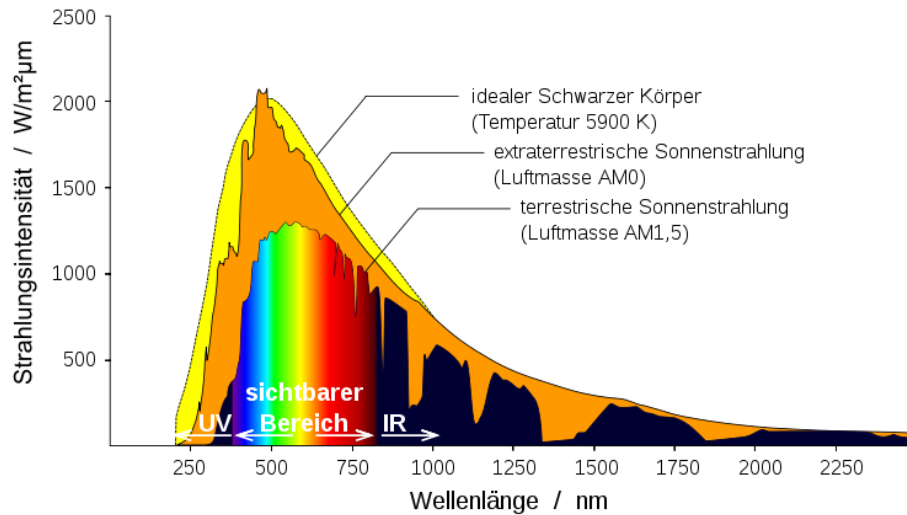


$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2897,8 \mu\text{m K}}{T}$$



Korrelation von Temperatur und Maximum der Wellenlänge
 Korrelation von Temperatur, Emission und Strahlungsintensität

Anhang: etwas Strahlungsphysik zum IR (2)



Diese Darstellung endet mit dem NIR (IR-B) bei ca. 3,0 μm

(Grafik: Matthias M., wikimedia commons)

Benennung	Kurzzeichen		Wellenlänge	Wellenlänge	Temperatur
			in μm	in nm	nach Wien
nahes Infrarot	NIR	IR-A	0,78...1,4	780 ... 1.400	3700 K...
		IR-B	1,4...3,0	1.400 ... 3.000	
mittleres Infrarot	MIR	IR-C	3...50	3.000 ... 50.000	1000...60 K
fernes Infrarot	FIR		50...1000	50.000 ... 1.000.000	...3 K

Einteilung der IR Strahlung, 0 K = - 273,15 °C

Im anglo- amerikanischen Raum:

0,78 - 1,4 μm near infrared

1,4 - 3,0 μm short wavelength

3 - 8 μm mid wavelength

8 - 15 μm long wavelength

15 μm - 1 mm far infrared

8.4. Anhang: optische Streuung des IR in der Membran

2012-2013 erarbeitete das Institut Inbitec e.V., Berlin Buch, ein Simulationsprogramm auf der Basis von Comsol Multiphysics (eine Finite-Elemente-Berechnungssoftware) zur realitätsnahen Berechnung empirisch gestützter Werte der Verbesserung des Raumklimas und der Einsparung von Heizenergie durch den Einsatz der thermokeramischen Membrantechnologie (ClimateCoating) als Innen- und/oder Außenanstrich an Gebäuden.²¹

Dies erfolgte bei gleichzeitiger Entwicklung eines geeigneten Messgerätes (miniaturisierter Raumklimaanalysator nach dem Vorbild dessen von Prof. Marx) zur Validierung der Berechnungen durch Messungen.

Im Rahmen der Programmentwicklung wurde ein Berechnungs-Modul zur Optimierung der Durchmesserverteilung der der Beschichtung beigemischten keramischen Hohlkugeln zur Verbesserung der Rückstreuereigenschaften (Mie Streuung und Rückstreuung im IR) eingebunden.

Das Ergebnis der Untersuchungen:

„Es gelang darzustellen, dass der Effekt der Farbe durch zwei wesentliche Eigenschaften entsteht.“²²

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 (zu) 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.“

²¹ Verbesserung des Raumklimas von Heizenergie durch den Einsatz der thermokeramischen Membrantechnologie ... als Innen- und/oder Außenanstrich an Gebäuden, Transferbonus-Projekt des Landes Berlin, Institut Inbitec e.V., Berlin Buch, Endbericht vom 28.03.2013

²² Hier ist mit „Farbe“ die ClimateCoating Beschichtung gemeint.

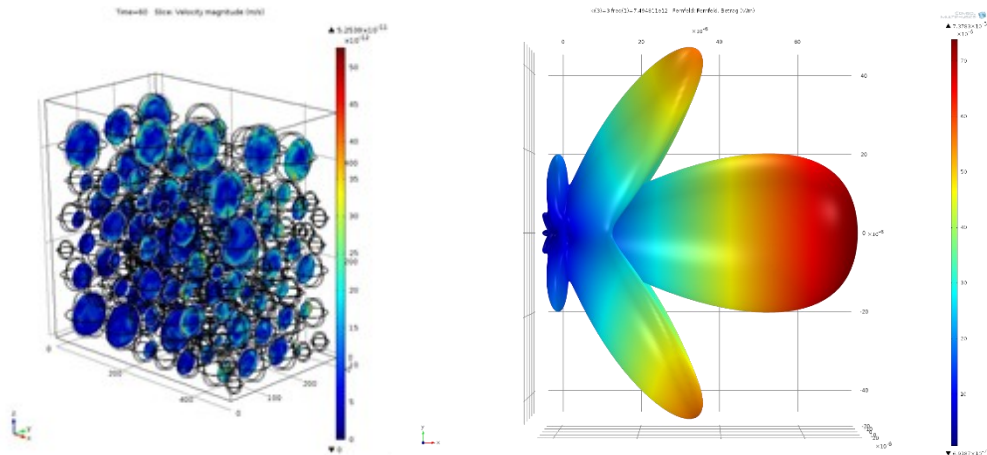


Abbildung 19 (links): Abb.3 aus dem Endbericht, Statistisch verteilte und in der Größe variiertes Kugelanordnung in einem quaderförmigen Volumenstück

Abbildung 20: 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.

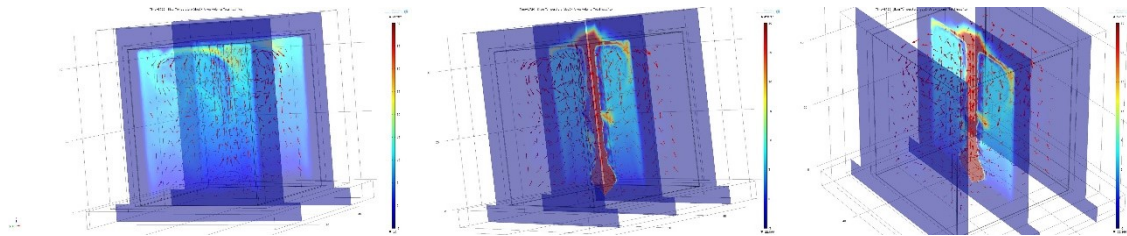


Abbildung 21: Abb.14 aus dem Endbericht, Berechnung eines Erwärmungsexperiments innerhalb eines Kubus mit einer 15 W Heizquelle und Wänden aus Porenbeton (a), zusätzlich mit einer Acrylbeschichtung (b) und mit einer ClimateCoating-Beschichtung (c). Wie im Fall des Blumentopfes ergab sich eine Temperaturerhöhung im Innenraum vor allem im Fall (c).

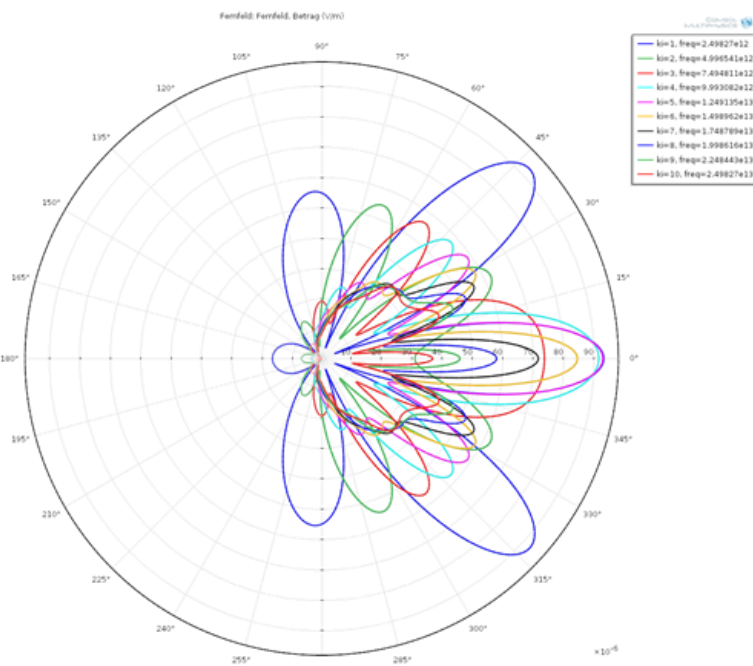
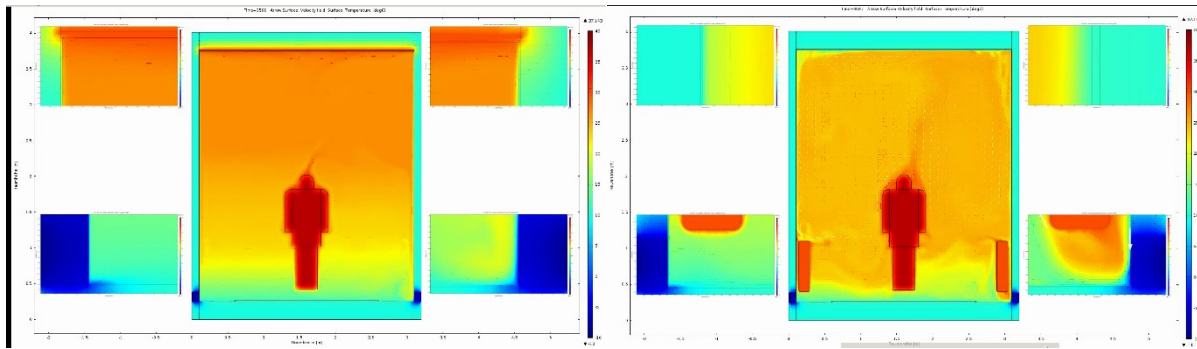


Abbildung 22: Strahlungsprofile an einer Hohlkugel, Abb.20 aus dem Endbericht, 2-D Streustrahlungsprofile für das elektrische Fernfeld beim Auftreffen einer ebenen Welle auf eine Hohlkugel bei unterschiedlichen Wellenlängen.



Deckenheizung

Konvektionsheizung

Abbildung 23: Temperaturprofile bei zwei Heizungsarten im Vergleich, Abb.21 aus dem Endbericht, 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 so-wohl die Wandtemperatur als auch die Temperatur der Kältebrücke abschirmt hat die Acrylfarbe nach einer Stunde eine deutlich niedrigere Temperatur ebenso wie die benachbarte Grenzschicht.

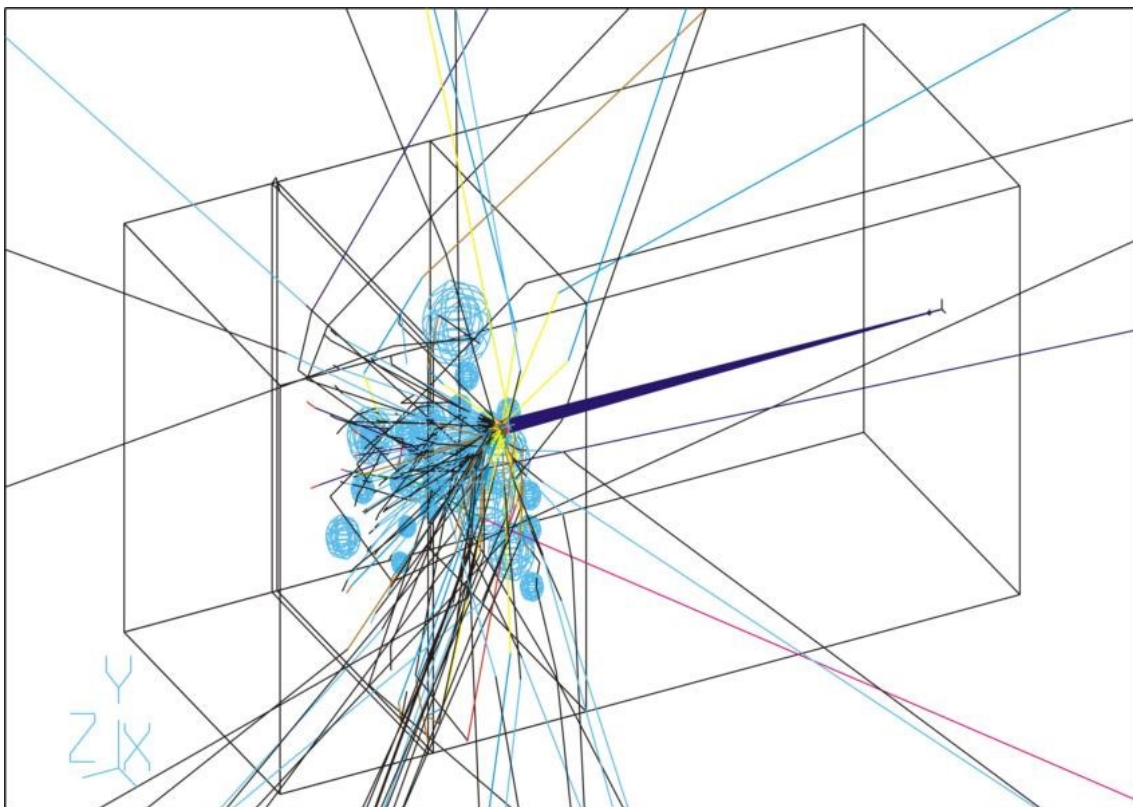


Abbildung 24: Bereits wenige Strahlen und ein paar Kugeln zeigen den von Shnir für ClimateCoating beschriebenen Streueffekt, der auf den beigemischten Glaskeramikhohlkugeln beruht. Simulation: Inbitec.

8.5. Überlegungen zur rechnerischen Einbettung in der U-Wert-Formel

θ_{oi}	=	θ_i	-	U	R_{si}	(	θ_i	-	θ_e)	
	=	23,0	-	1,21	0,13	(	23,0	-	-10,0)	←
	=	23,00	-	5,20							
	=	17,80									
θ_1	=	θ_{oi}	-	U	d_1	(	θ_i	-	θ_e)	
					λ_1						
	=	17,80	-	1,21	0,015	(	23,0	-	-10,0)	←
					0,80						←
	=	17,80	-	0,75							
	=	17,05									
θ_2	=	θ_1	-	U	d_2	(	θ_i	-	θ_e)	
					λ_2						
	=	17,05	-	1,21	0,300	(	23,0	-	-10,0)	←
					0,50						←
	=	17,05	-	24,02							
	=	-6,97									
θ_{oe}	=	θ_2	-	U	d_3	(	θ_i	-	θ_e)	
					λ_3						
	=	-6,97	-	1,21	0,025	(	23,0	-	-10,0)	←
					0,70						←
	=	-6,97	-	1,43							
	=	-8,40									
θ_e	=	θ_{oe}	-	U	R_{se}	(	θ_i	-	θ_e)	
	=	-8,40	-	1,21	0,04	(	23,0	-	-10,0)	
	=	-8,40	-	1,60							
	=	-10,00									
									R_{si}	=	0,13
									R_1	=	0,02
									R_2	=	0,60
									R_3	=	0,04
									R_{se}	=	0,04
									ΣR	=	0,82
									U	=	1,21
				d_{ges}	=				0,34 m		

Abbildung 25: Ein Standard-Berechnungsschema zur Darstellung der Temperaturen am Bauteil Wand anhand der umgestellten U-Wert-Formel, im Beispiel eine ältere Porenbetonwand, innen und außen geputzt

Man kann die Temperaturwerte verändern, was keine wesentlichen Änderungen hervorruft. Man kann die Bauteilschichten austauschen, wodurch der U-Wert verändert wird. Ändert man, da es um Vorgänge an der Oberfläche der Wand geht, den Wärmeübergangswiderstand innen R_{si} , wirkt sich das auf die Oberflächentemperatur aus. Um eine höhere Oberflächentemperatur zu erhalten, muss man einen niedrigeren R_{si} ansetzen als den normierten mit 0,13. Im Beispiel: R_{si} mit 0,03, dann werden es aus 17,8 °C nunmehr 21,63 °C. Es entsteht jedoch aufgrund der Formelstruktur ein höherer U-Wert (1,38 statt 1,21).

$\theta_{TSi} =$	$\theta_i -$	U	d_{TSi}	$(\theta_i - \theta_e)$
			$\lambda_{\text{äquTSi}}$	
=	22,19	-	0,82	0,0003
			0,0006	(23,0 - -10,0)
=	22,19	-	13,48	
=	8,72			

Abbildung 26: die eingefügte Bauteilschicht, ClimateCoating auf der Putzoberfläche

Durch das Einfügen der ClimateCoating Beschichtung als erste Bauteilschicht innen, mit einem äquivalenten Wert der Wärmeleitfähigkeit, erhält man eine erhöhte Oberflächentemperatur. Hier werden es aus 17,8 °C nunmehr 22,19 °C. Nachteilig ist der starke Temperaturabfall hinter der Beschichtung. Dieser resultiert aus der Formelstruktur und sie kommt so in der Praxis nicht vor.

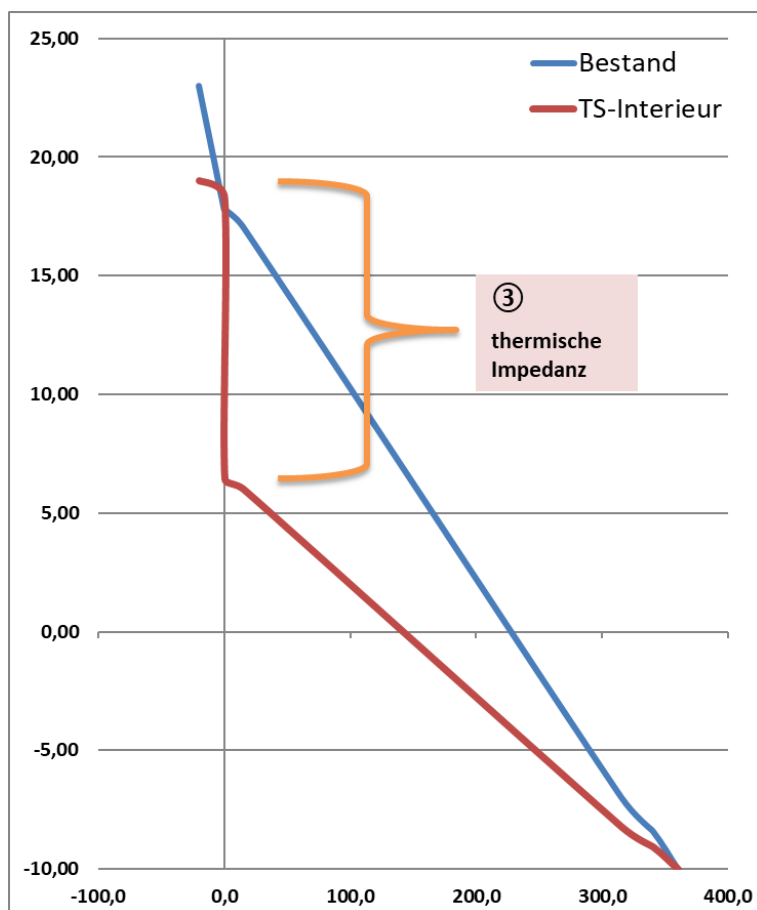


Abbildung 27: Grafische Darstellung der beiden Temperaturverläufe

Die Abbildung ist eine andere grafische Umsetzung der Temperaturverläufe der Varianten „Bestand“ und „TS-I c“ (ClimateCoating) im Vergleich. Diese Form der Darstellung macht den Sachverhalt transparenter.

Man erkennt sowohl die abgesenkte Raumlufthtemperatur als auch die angehobene Oberflächentemperatur. Da Strahlungsvorgänge mit dem U-Wert-Schema nicht abbildbar sind, ist hier als Erläuterung einzufügen: Die Anhebung der Oberflächentemperatur und die Wärmerückstrahlung in den Raum sind das Primärerereignis, welches sich auf die Energiebilanz auswirkt.

Auffällig ist der Temperatursprung nach unten zwischen der ClimateCoating Membran und der Putzoberfläche der Wand. Dies illustriert die thermische Impedanz (lat. impedere: hemmen, hindern) – als Sekundärereignis entsteht in verringerter Wärmestrom q . Im Beispiel gilt: Die Absenkung der Innentemperatur von 23°C auf 19°C sowie die Anhebung der Oberflächentemperatur von 17,8°C auf 18,3°C bewirken eine effektive Verringerung des U-Wertes um 33%.

Aufgrund des dynamischen Charakters der ClimateCoating Membran, deren Wirksamkeit bislang nur unter realen instationären Bedingungen hinreichend belegt ist, wird eine Adaption der Schemata der U-Wert-Theorie belegt.

Im ersten Schritt – der Reduzierung des inneren Wärmeübergangswiderstandes R_{si} bzw. dessen Ersatz durch den $RTSI$ – gelingt dies noch nicht ganz widerspruchsfrei. Durch Einführung des Rechenwertes $\lambda_{äqu}$ lässt sich ein plausibles und realitätsnahes Ergebnis darstellen. Dies betrifft zunächst die Wärmestromdichte q [W/m²] und die Wärmemenge Q [kWh].

Das nach diesem Schema berechnete Temperaturprofil muss noch messtechnisch abgeglichen werden, messtechnisch belegt ist die Wirkung von ClimateCoating mehrfach.

Auf jeden Fall sind Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Temperaturwerten an der Stelle x zu erwarten, die daraus resultieren, dass das hier verwendete Schema streng stationär ausgerichtet ist und dass sich in der Praxis die instationären Verhältnisse auch dahingehend auswirken, dass der Wärmestrom nicht gleichmäßig ist und auch gegenläufige Vorgänge stattfinden können.

Die Zielstellung soll nunmehr darin bestehen, die beiden Rechengrößen $\lambda_{äqu}$ und $RTSI$ analytisch und messtechnisch zu validieren. Das ist nur ein Vorschlag, alternativ kann ein anderer weg gegangen werden, um die Praxis in die Berechnung zu überführen.

* * *

