

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
14. November 2013 (14.11.2013)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2013/167278 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01J 5/10 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2013/001385

(22) Internationales Anmeldedatum:
10. Mai 2013 (10.05.2013)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2012 009 080.3 9. Mai 2012 (09.05.2012) DE

(72) Erfinder; und

(71) Anmelder : MISCHKE, Gerald [DE/DE]; Stettener Str.
31, 71384 Weinstadt-Endersbach (DE).

(74) Anwalt: DEISSLER, Michael; Hössle, Postfach 10 23 38,
70019 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK,
DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN,
KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,
RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ,
TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA,
ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ,
RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY,
CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE,
SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA,
GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

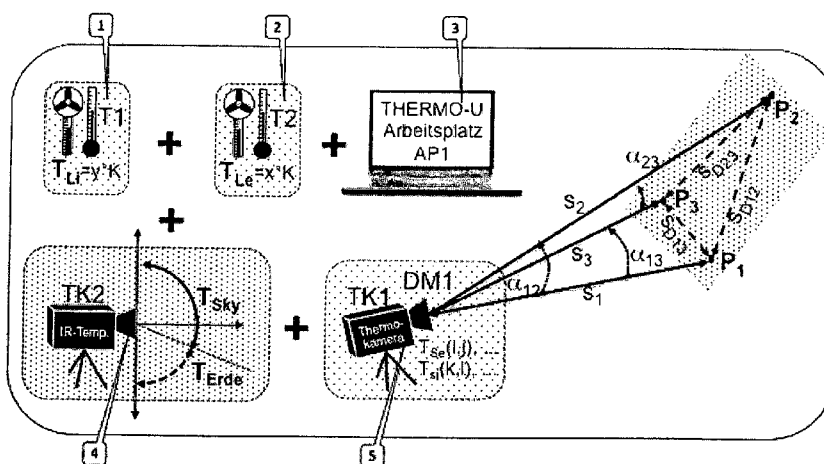
[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: HEAT TRANSFER MEASUREMENT AND CALCULATION METHOD

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUM MESSEN UND BERECHNEN EINES WÄRMETRANSPORTS

Figur 10:

AA THERMO-U - Gesamtsystem zur Messung von Energieverlusten



AA THERMO-U - Complete system for measuring energy losses

3 THERMO-U workstation AP1

5 Thermographic camera

$T_{Erde} = T_{earth}$

(57) Abstract: A method for calculating heat transfer through a covering surface is disclosed. In said method, both convection and heat radiation are taken into account.

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur Berechnung eines Wärmetransports durch eine Hüllfläche vorgestellt. Dabei werden sowohl die Konvektion als auch die Wärmestrahlung berücksichtigt.



Veröffentlicht:

- *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Verfahren zum Messen und Berechnen eines Wärmetransports

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Messen und Berechnen eines Wärme- bzw. Energietransports durch eine Hüllfläche.

Es wird insbesondere ein integriertes HW- und SW-System zur Messung und Berechnung von Wärmeenergieverlusten, von Wärmewiderständen, effektiven Wärmekapazitäten C_w sowie der zugehörigen thermischen Trägheitskonstanten τ_w von Oberflächen (von Bauteilen) von Geräten, Anlagen, Gebäude usw. vorgestellt.

Die Erfindung bezieht sich auf eine Vielzahl von Mess- und Berechnungsverfahren sowie EDV-Systeme zur Messung, Analyse, Darstellung und Ermittlung von Energieverlusten sowie von Energie-Kennwerten in der Gebäude-, Anlagen- und Elektrotechnik. Hierbei werden insbesondere die Technologiegebiete Thermografie bzw. berührungslose (IR-) Temperaturmesstechnik, Thermo- und Strömungsdynamik, Fotogrammetrie und optische Entfernungsmesstechnik benutzt.

Stand der Technik

Eines der Hauptanwendungsgebiete der Erfindung ist die Gebäudetechnik, dort insbesondere die Gebäudeenergie-technik. An Hand dieses Anwendungsgebietes wird im Folgenden der Stand der Technik und der durch die Erfindung erzielbare Fortschritt erläutert.

Zur Messung von (Wärme-)Energieverlusten „im Feld“ gibt es derzeit nur aufwändige Analyse- und Messverfahren. Die zugehörigen Energiekennwerte (R_w , C_w , τ_w , ...) der Bauteile werden aber für alle Berechnungen bei Bau- bzw. Sanierungsprojekten benötigt und müssen ggf. zeit- und arbeitsaufwändig einzeln beschafft/ermittelt werden.

Verschiedenen BRD- und EU-Initiativen haben zur drastischen und nachhaltigen Verminderung der (Primär-) Energieverbräuche im Gebäudebereiche (Z.B. ENEC 2009/2012, EEG, ...) geführt. Sie haben EU-weit den Stand der Berechnungs- und Simulationsmodelle für Gebäudeenergie-technik auf einen inzwischen sehr hohen Stand gebracht. Die Bauphysik hat dafür tragfähige Grundlagen gelegt und die Entwicklung von dynamischen und statischen Simulationsmodellen für den Wärmetransport durch nahezu beliebige Material- und Schichtanordnungen sowie für nahezu beliebige Geometrien von Bauteilen ermöglicht. Der "Energiebereiter Plus 18599" der deutschen Firma Hottgenroth bzw. das (Physik-) Simulationspaket COMSOL der gleichnamigen schwedischen Firma COMSOL sind nur zwei Beispiele dafür. Alle diese Modelle benötigen als Eingabeinformation eine sehr detaillierte, genaue und vollständige Angabe der Gebäude- bzw. aller (Bauteil-) Geometrien sowie eine genaue Kenntnis des jeweiligen Wandaufbaus mit allen Schichten, deren jeweiliger Lage, Dimension und physikalischen Eigenschaften. Diese physikalischen Materialeigenschaften sind in großen Parametersammlungen, zumeist von staatlichen bzw. halbstaatlichen Stellen (z.B. CSTB in F) erstellt, für den Einsatz in Nachschlagewerken bzw. in Simulationsmodellen frei verfügbar. Außer der dort eingesetzten und nur im Labormaßstab nutzbaren kalorimetrischen Messtechnik, zur Bestimmung von Wärmewiderständen, Wärmekapazitäten etc. gibt es derzeit keine im Gebäudebestand verlässlich einsetzbare Messtechnik für diese zentralen Energiekennwerte von Materialien und Bauteilen. Der

Einfluss der (Gebäude-) Umgebung wird hingegen i.d.R. gar nicht - was aus Aufwandsgründen für die meisten dynamischen Modelle zutrifft - bzw. nur sehr stark schematisiert (z.B. lediglich via mittlerer Monats- bzw.- Jahrestemperaturen der Umgebungsluft) berücksichtigt. Der Einfluss der Luftströmung, der Luftfeuchte, des Regens bzw. Schnees sowie der sehr erhebliche Einfluss der jeweiligen Strahlung von Himmel/Sonne bzw. der Umgebung wird dabei i.d.R. überhaupt nicht berücksichtigt.

Am Beispiel der Gebäudeenergietechnik wird deutlich, dass viele dieser notwendigen Informationen häufig nicht vorliegen bzw. nur mit sehr großen Aufwand, z.B. via Analysen von Kernbohrungen der zu messenden/untersuchenden Wände, zu beschaffen sind. Sie liegen eigentlich nur für Neubauvorhaben mit detaillierten Plänen, Material- und Stücklisten vor. Gebäude haben i.d.R. mittlere Lebensdauern (bis zu einer vollständigen "Kernsanierung", was vom Aufwand her in etwa einem Neubau entspricht) von 30-60 Jahren. Damit liegt die benötigte genaue Kenntnis von Geometrie und Struktur eines Gebäudes insbesondere im Falle von Renovationen/Sanierungen i.A. nicht vor. So ist man meist zu einem langwierigen und fehleranfälligen "händischen" vor Ort Messen der Geometrie eines solchen Gebäudes gezwungen. Die Struktur der jeweiligen Decken/Wände lässt sich nur durch eine sehr kosten- und zeitaufwändige sowie teure Kernbohrungsanalyse ermitteln. Der Einsatz der geschilderten Gebäudesimulationsmodelle erfordert eigentlich alle diese sehr teuren Untersuchungen, da andere ausreichend genaue und kostengünstige Messverfahren für die benötigten Parameter derzeit nicht existieren. Dieser derzeit ungenügende Stand der (Mess-) Technik macht die Datenaufnahme zur energetischen Sanierung eines Bestandsgebäudes zu einem aufwändigen, langwierigen und i.A. auch sehr fehleranfälligen Prozess, der auch bei einem EFH sehr viel Zeit in Anspruch nimmt.

Die fehlende und explizite Berücksichtigung der physikalisch korrekten Energieübertragungsmechanismen in das Bauteil bzw. in die Bauteilumgebung ist ein weiterer, derzeit erheblicher Mangel in den Normen und Modellen der Gebäude-energietechnik. Diese Übertragungsmechanismen sind

- die Wärmeleitung in den Boden, leider mit meist relativ ungenau bekannter Struktur, Temperatur sowie Physik,
- die Konvektion mit dem umgebenden Luftraum sowie
- der (IR-) Strahlungsenergieaustausch mit der Umgebung, insbesondere aber mit dem Himmel/Weltraum und der Umgebung.

Die letzten beiden Mechanismen weisen beide i.d.R. ganz sicher nicht die in den Modellen angenommene mittleren Tages- (Luft-) Temperaturen sondern davon erheblich verschiedene Werte auf. Die zur Berücksichtigung dieser Übertragungsmechanismen nach ENEC bzw. DIN-EN-ISO definierten R_{si} - bzw. R_{se} -Werte haben keine physikalische Realität. Sie sind "Hilfskonstruktionen" um mit den (Norm-) Fehlern der Modelle zumindest im Monats- bzw. Jahresmittel leben zu können. Für Messzwecke sind sie bestenfalls irreführend.

Abschließend muss noch festgehalten werden, dass es leider derzeit keine optische Mess- und Abbildungstechnik gibt, die es erlaubt die Dimensionen einer Bauteil- bzw. Gebäudeoberfläche schnell - sozusagen mit einer Kamera-Aufnahme - und mit hinreichender Genauigkeit zu ermitteln. Die derzeit bekannten und auch industrialisierten Verfahren können dies nicht. Hier ist eine bezahlbare und sinnvolle Kombination und Integration von Verfahren und Instrumenten noch zu leisten.

Vor diesem Hintergrund werden ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und eine Anordnung gemäß Anspruch 13 vorgestellt. Ausführungen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen und der Beschreibung.

Es wird somit Verfahren zur Berechnen eines Wärmetransports durch eine Hüllfläche vorgestellt, bei dem eine Wärmestrahlung und eine Konvektion berücksichtigt werden, wobei zur Ermittlung der Wärmestrahlung eine Oberflächentemperatur der Hüllfläche und eine Rückstrahltemperatur der die Hüllfläche umgebenden Hemisphäre berücksichtigt werden.

Es kann vorgesehen sein, dass zur Ermittlung der Oberflächentemperatur eine Wärmebildkamera verwendet wird. Weiterhin kann zur Ermittlung der Rückstrahltemperatur eine Wärmebildkamera verwendet werden. Typischerweise wird für beides genau eine Kamera verwendet, mit der eine direkte Messung ermöglicht ist.

Weiterhin können bei der Berechnung der Konvektion Geometriebedingungen der Hüllfläche berücksichtigt werden. Diese können wiederum mit einer Kamera oder auch genau mit der einen Kamera, mit der die Oberflächentemperatur bzw. eine Oberflächentemperaturverteilung gemessen wird, ermittelt werden.

In Ausgestaltung wird ein konduktiver Wärmeübergang zu einer Bodenfläche berücksichtigt. Ein typisches Anwendungsgebiet ist bei einer Hüllfläche, die durch ein Gebäude definiert ist.

Im Falle einer teilweisen Integration bzw. Bedeckung des Messobjektes in bzw. durch ein unbekanntes Wärmeleitungsmedium - hier Boden genannt - können auch die Wärmeleitungs-

verluste in den Boden durch Differenzbildung einer integralen Innen- und Außen-Messung bestimmt werden.

In Ausgestaltung werden die jeweiligen Oberflächentemperaturen aller Flächenelemente mittels Kamera bzw. Sensor berührungslos erfasst und ihre jeweilige tatsächliche Lage und Geometrie im Raum durch ein integriertes Geometriemesssystem gleichzeitig mit erfasst und berechnet.

Zudem kann der Strahlungsenergieeintrag der Messobjektumgebung in jedes vermessene Flächenelement durch einen integrierten 2π -Halbraum-Strahlungssensor nach mindestens zwei einstellbaren Raumwinkeln (φ_{Sky} , φ_{Earth}) getrennt und mit der Messung der Oberflächentemperaturen der jeweiligen Flächenelemente gleichzeitig mit erfasst werden.

Der 2π -Halbraum-Strahlungssensor kann den zu messenden Halbraum in $M \times K$ gleiche/ungleiche Raumwinkel aufteilen, getrennt vermessen und die jeweiligen Strahlungstemperaturen der einzelnen Raumwinkel raumwinkelanteilskorrekt an das integrierte Messsystem weitergeben.

Außerdem kann das kameraintegrierte Geometriemesssystem gleichzeitig mit der Temperaturmessung mittels mindestens 3er Messstrahlen (S_1 , S_2 , S_3 , ...) mit bekannten Winkeln (α_{12} , α_{13} , α_{12} , ...) zueinander jeweils mindestens 3 Punkte (P_1 , P_2 , P_3 , ...) auf der jeweiligen Messfläche in Lage und Abstand zur Bildebene der Kamera vermessen und so durch einfache trigonometrische Berechnung jedem Bildpixel des Messobjektes reale physikalische Dimensionen (z.B. in m) zuordnen und damit dem Gesamtbild der Wärme- bzw. Messkamera ebenfalls reale x/y/z-Koordinaten zuordnen.

Es wird weiterhin eine Anordnung zur Berechnen eines Wärmetransports durch eine Hüllfläche, insbesondere zur Durch-

führung eines vorstehend erörterten Verfahrens vorgestellt, mit einer Recheneinheit, die dazu ausgelegt ist, eine Wärmestrahlung und eine Konvektion zu berücksichtigen, wobei zur Ermittlung der Wärmestrahlung eine Oberflächentemperatur der Hüllfläche und eine Rückstrahltemperatur der die Hüllfläche umgebenden Hemisphäre berücksichtigt werden.

Diese Anordnung kann eine Mess- bzw. Wärmekamera umfassen, in Ausgestaltung genau eine Kamera.

Die Anordnung wird nachfolgend auch als Messsystem bezeichnet, das auch ein Analysesystem umfassen kann.

Ein integriertes Analysesystem bestimmt alle konvektiven und Strahlungsenergieströme durch die Oberfläche eines Bauteiles nach Art, Richtung und Umfang. Es ermittelt daraus die zugehörigen Energiekennwerte der Bauteile. Es besteht aus mindestens zwei Umweltparameter-Messgeräten, einem Umgebungsstrahlungsmesser, einer Thermokamera und einem Auswertesystem zur Ergebnis- und Berichterstellung.

Es wird die Messung von Energiekennwerten sowie von Geometrien in der Gebäudeenergietechnik ermöglicht. Die Messung analoger Fragestellungen der Elektro-, Geräte- und/oder der Anlagentechnik ist ebenso möglich.

Mit dem Verfahren ist es möglich, die für eine Bestimmung der (Wärme-) Energieverluste benötigten Parameter physikalisch korrekt, vollständig, schnell und ohne übermäßigen Zeit- und Geräteaufwand zuverlässig zu erfassen, um dann daraus die entsprechenden Energieverlustkennwerte möglichst automatisch berechnen zu können. Zu diesen Mess- und Analyse-Parametern gehören insbesondere

- die 3D-Geometrie und Struktur des Messobjektes und aller seiner relevanten Oberflächen in realen 3D-Koordinaten,
- die (energieübertragungs-) relevanten Parameter der das Messobjekt umgebenden Medien/Fluide wie T_{Luft} , v_{Luft} , Feuchte, ...,
- die (energieübertragungs-) relevanten Parameter aller am Energieaustausch beteiligten Oberflächen des Messobjektes wie $T_{\text{Si}}/T_{\text{Se}}(i,k)$, Neigungswinkel, Rauigkeit, ...,
- die (energieübertragungs-) relevanten Parameter des das Messobjekt umgebenden Raumes sowie aller am (Strahlungs-) Energieaustausch teilnehmenden Objekte darin.

Aus den Messwerten dieser Parameter kann dann physikalisch korrekt und mit möglichst hoher Genauigkeit, d.h. bei physikalisch geeigneter Modell- bzw. Fall-Wahl, der tatsächliche (Wärme-) Energiestrom in/aus der jeweiligen Bauteiloberfläche in Betrag und Richtung zu ermitteln.

Der Erfindung liegen somit folgende 7 Aufgaben für die Entwicklung eines integrierten Systems zur Messung und Berechnung von Wärmeenergieverlusten durch Oberflächen bzw. von Wärmewiderständen (R_W bzw. $U_W=1/R_W$), effektiven Wärmekapazitäten C_W sowie den zugehörigen thermischen Trägheitskonstanten τ_W dieser Oberflächen von Geräten, Anlagen, Gebäuden, etc. zu Grunde:

1. Einfache, kostengünstige und schnelle Messung/Bestimmung der i.A. 3D-Dimensionen des Messgegen-

standes (Wand, Oberfläche, etc.) in allen 3 Raumrichtungen mit zumindest hinreichender Genauigkeit für eine weitere Verwertung in der anschließenden (Gebäude-) Modellierung und Simulation.

2. Einfache, kostengünstige und schnelle Bestimmung von Strukturen/Objekten (z.B. Simse, Fenster, Tür, Dach, Balkon, etc.) auf und innerhalb des i.A. 3D-Messgegenstandes (Wand, Oberfläche, etc.) mit zumindest hinreichender Genauigkeit für eine weitere Verwertung in der anschließenden (Gebäude-) Modellierung und Simulation.
3. Einfache, kostengünstige und schnelle Messung/Bestimmung aller nötigen (Fluid-) Umgebungsparameter wie Lufttemperatur, -feuchte, der Luftbewegungen (Wert und Richtung) sowie der Strahlungsintensität der ganzen 3D-Umgebung des Messgegenstandes (Wand, Oberfläche, etc.) mit zumindest hinreichender Genauigkeit für ein verwertbares Gesamtergebnis und der anschließenden Nutzung in der (Gebäude-) Modellierung und Simulation.
4. Schnelle, genaue und physikalisch korrekte Berechnung aller für das (anschließende) Simulationsmodell benötigten Parameter, wie den Dimensionen von Bauteilen (Wand, Oberfläche, etc.) sowie den Dimensionen der darin enthaltenen Komponenten (z.B. Fenster, Türen, Dachgauben, Balkone, etc.) und deren jeweilige Energiekennwerte (P_v , R_w , C_w , ...).
5. Einfache, kostengünstige und schnelle Messung/Bestimmung aller nötigen Parameter des Messgegenstandes (Wand, Oberfläche, etc.) zur Berechnung des (Wärme-) Energiestromes durch seine Oberfläche in Wert und Richtung mit zumindest hinreichender Genauigkeit

für ein verwertbares Gesamtergebnis und der anschließenden Nutzung in der (Gebäude-) Modellierung und Simulation.

6. Schnelle, genaue und physikalisch korrekte Berechnung aller für das (anschließende) Simulationsmodell benötigten Geometrie-Parameter, wie den Dimensionen von Bauteilen (Wand, Oberfläche, etc.) sowie den Dimensionen der darin enthaltenen Komponenten (z.B. Fenster, Türen, Dachgauben, Balkone, etc.) und deren jeweilige Energiekennwerte (P_v , R_w , C_w , ...).

7. Angabe einer Ablaufsteuerung und der entsprechenden Systemarchitektur für das zugehörige EDV-System

Zu 1) Einfache Bestimmung der realen Geometrie des Messobjektes in allen 3 Raumrichtungen:

Die direkte Lasermessung von Distanzen ist derzeit die genaueste und preiswerteste Methode die Dimensionen eines Objektes sehr genau zu erfassen. Allein sie ist zeitaufwändig. Fotogrammetrische Methoden sind i.A. weniger genau, aber sehr zeit- und kosteneffizient. Ein Ersetzen der zeitaufwändigen (Laser-) Messung von mindestens 2 sonst i.A. willkürlich gewählten Referenzlinien in der Bildebene des Messobjektes durch mindestens 3 genau vermessene Punkte in eben jener Bildebene löst dieses Problem nachhaltig. Dies kann sehr einfach durch 3 fest mit der bildaufnehmenden Optik korrelierte (Laser-) Distanzmesser (z.B. DM1 in Figur 8) geschehen. Sind ihre Messstrahlen in-Fokus, wie in Figur 8 dargestellt, so gibt es eine trigonometrisch einfach zu bestimmende feste Zuordnung der jeweiligen im Raum relativ zum Messbild bestehenden Position des Messpunktes und seinen "Bildkoordinaten" in x-/y-Pixeln. Sind sie nicht in-Fokus, so muss abstands- und neigungsabhängig der sich nun

notwendig einstellende Parallaxenfehler berechnet werde. Nach diesen Berechnungen kann man jedem Bildpunkt reale x-/y/z-Koordinaten (z.B. in m) zuordnen und die relative Lage der Messebene zur Bildebene der Kamera und damit im Raum bestimmen.

Zu 2) Einfache Bestimmung von Strukturen/Objekten auf und innerhalb des 3D-Messgegenstandes:

Hat man die Messfläche gemäß 1) mit realen (Bild-) Pixelkoordinaten versehen, so liefert jeder Bildverarbeitungsalgorithmus der nach Mustern/Strukturen im Bild sucht deren Dimensionen zunächst in Pixel- und dann in realen Dimensionen. Somit kann man das Identifizieren und das Vermessen von Objekten/Strukturen auf/in der Messobjektebene ohne Verlust an Genauigkeit zumindest teilautomatisieren. Dies ist ein nicht unbeträchtlicher Zeit- und Kostenvorteil bei der Datenaufnahme von Messobjekten wie Gebäuden etc.

Zu 3) Einfache Bestimmung der Parameter des Umgebungsfluides:

Nachdem ein beliebiges Messobjekt sich meist nicht im luftleeren Raum befindet sondern sich eher innerhalb unserer (Luft-) Atmosphäre aufhält, ist auch der Energieaustausch aller seiner Oberflächen mit diesem es umgebenden Fluid unbedingt zu berücksichtigen. Es müssen daher, zusammen mit den anderen (energieaustausch-) relevanten Parametern, unbedingt diese Parameter möglichst gleichzeitig mit erfasst werden. Dies gelingt i.d.R. relativ einfach mit dafür geeigneten speziellen Messgeräten T1, T2 (z.B. für T_{Luft} , v_{Luft} , Feuchte, ...), die z.B. via Funk ihre Messergebnisse direkt an das Gesamtsystem zur weiteren Verarbeitung liefern. So kann die Integration auch dieser Messun-

gen/Ergebnisse in das Gesamtsystem einfach und kostengünstig gewährleistet werden.

Zu 4) Einfache Bestimmung der Parameter des das Messobjekt umgebenden Raumes:

Ist der umgebende Raum leer bzw. mit (IR-) transparenten Medien/Fluiden gefüllt, so muss sein Anteil am nun Strahlungsenergieaustausch mit der jeweiligen Messoberfläche ebenfalls und gesondert berücksichtigt werden. Aufgrund des hier herrschenden Planck'schen Strahlungsgesetzes mit seiner T^4 -Proportionalität spielen hier selbst kleine Temperaturdifferenzen eine mehr als 4-fach größere Rolle als bei allen anderen Wärmetransportmechanismen. Darum ist es essentiell die wesentlichen Teilnehmer am Energieaustausch physikalisch korrekt zu erfassen. Wie man in Figur 2 bzw. Figur 9 klar erkennen kann, sind dies zum Glück im Wesentlichen nur drei wirklich bedeutsame Teilnehmer. Diese sind

- das jeweilige Oberflächenelement $\Delta A(i,k)$ selbst,
- der das Oberflächenelement $\Delta A(i,k)$ umgebende (mehr oder weniger leere) Weltraum/Himmel mit T_{sky} und
- die vom Oberflächenelement $\Delta A(i,k)$ jeweils sichtbare Landschaft/Umgebung, mithin die Erde mit T_{Erde} .

Wie man leicht erkennen kann werden die Strahlungseigenschaften von Himmel bzw. Erde von dem Messobjekt bzw. von $\Delta A(i,k)$ nicht beeinflusst und sie können somit als (rein) schwarze Strahler physikalisch korrekt modelliert werden. Genau dies ermöglicht nun die (genaue) Messung der "Rückstrahlung" der (Strahl-) Umgebung auf das/jedes Flächenelement $\Delta A(i,k)$ mit einem speziellen IR-Sensor TK2 bzw. einer Thermokamera TK2, wie das z.B. wie in Figur 9 dargestellt wird. Damit kann die ansonsten nahezu immer unmögliche Auf-

stellung und Auflösung der Planck'schen Strahlungsaustauschintegrale vermieden werden und der (Strahlungs-) Energieaustausch eines jeden $\Delta A(i,k)$ und damit auch der des Messobjektes mit dem umgebenden Raum berechnet werden! Diese Methode ist mitnichten auf diese - zwar für Gebäude i.d.R. hinreichend genaue - einfache Aufteilung der (Strahlungs-) Umgebung eines Messobjektes beschränkt. Setzt man z.B. zur Messung dieser "Rückstrahltemperatur" eine 2π -Thermokamera (z.B. TK2 in Figur 9) mit $M \times K$ -Pixeln ein, so kann die entsprechende Umgebung leicht in eben jener Auflösung abgebildet und in der Energiebilanz auch korrekt berücksichtigt werden. Dies sollte selbst für "komplexe thermische Umgebungen" ausreichend genau sein! An diesem Beispiel sieht man aber auch, dass die sehr einfache "Gebäude-Lösung" mit nur 2 "Rückstrahltemperaturen" (T_{sky} , T_{Erde}) eigentlich meistens hinreichend genau ist, solange man die T^4 -Mittelung für die $M \times K$ -Raumwinkelanteile einer analog eingesetzten 2π -Thermokamera berücksichtigt.

Zu 5) Einfache Messung der energiestromrelevanten Oberflächenparameter des Messobjektes:

Diese Parameter sind (gemäß VDI-Wärmeatlas) sowohl geometrischer als auch physikalischer Natur. Die/alle relevanten geometrischen Parameter (z.B. L_{char} , α_{Dach} , ...) liefert gemäß 1) und 2) das integrierte Geometriemesssystem (DM1 in Fig8 mit Auswertesystem). Die physikalisch relevanten Parameter, hier vor allem die jeweiligen Oberflächentemperaturen (ggf. auch Rauigkeiten, Texturen, etc.) liefert die ebenfalls integrierte (Thermo-) Kamera TK1 physikalisch korrekt als Bildinformation mit allen $T_{\text{se}}/T_{\text{si}}(i,k)$. Weitere Messwerte werden zur physikalisch korrekten Ermittlung des Konvektions- und des Strahlungsanteils am die jeweilige Oberfläche durchströmenden (Wärme-) Energiestrom außer den

bereits unter 1) bis 4) gesammelten Messwerten nicht benötigt.

Zu 6) Physikalisch korrekte Berechnung der Geometrie-Parameter sowie der Energiekennwerte (P_v , R_w , C_w , ...):

Der gesamte (Wärme-) Energiestrom durch eine (Mess-) Oberfläche $I_{se}/I_{si}(i,k)$ hat, wie in den Figuren 4, 5 und 9 detailliert dargestellt und erläutert wird, genau zwei Anteile,

- den i.A. bedeutenderen und wg. des Planck'schen Strahlungsgesetzes sehr stark ($>4x$) temperaturdifferenzabhängigen Strahlungsanteil $I_{re}/I_{ri}(i,k)$ und den
- Konvektionsanteil $I_{le}/I_{li}(i,k)$ mit dem Umgebungsfluid (meist Luft), welcher nur linear von der jeweiligen Temperaturdifferenz abhängig ist.

Diese beiden Parameter müssen daher stets getrennt betrachtet und berechnet werden.

Der Strahlungsanteil $I_{re}/I_{ri}(i,k)$ kann hierbei gemäß den Annahmen und Vereinfachungen unter 4) als reine Summe der "Schwarzkörperstrahlungen" von $\Delta A(i,k)$ und der jeweiligen Strahlungsumgebung (z.B. T_{sky} , T_{erde}) berechnet werden.

Zur Berechnung des Konvektionsanteils $I_{le}/I_{li}(i,k)$ des Energiestromes mit dem Umgebungsfluid (Luft) muss jedoch zusätzlich zwischen einer Vielzahl von Fällen unterscheiden werden. Er muss daher getrennt berechnen, je nach den jeweiligen Messwerten für T_{luft} , V_{luft} (in Wert und Richtung), Neigung (z.B. α_{dach}) der Fläche zur Horizontalen/Vertikalen sowie der Geometrie der Fläche ($\Leftrightarrow L_{char}$). Zusammen mit weiteren Bedingungen für laminare und/oder turbulente Strömung

am Messort (i,k) muss das Auswertesystem diese Werte möglichst automatisch berücksichtigen (siehe FIG9). Die zur Berechnung nötigen Fallunterscheidungen und die davon abhängige richtige Auswahl der anzuwendenden Berechnungsformeln (siehe Figur 9) für die benötigten Nusselt-, Raleigh-, Grashof-, Prandtl- und Reynold-Zahlen sind ebenfalls vom Auswertesystem möglichst automatisch und in jedem Falle physikalisch korrekt zu treffen. Dies ist in Anbetracht der Komplexität der im VDI-Wärmeatlas ausgeführten Vielzahl unterschiedlichster Fälle keine einfache Aufgabe. Sie muss bei der Auswertesystementwicklung mit großer Sorgfalt und hohem physikalischem Sachverstand geleistet werden.

Zu 7) Ablaufsteuerung und Systemarchitektur:

Die Messwerte der jeweiligen Oberflächen des Messobjektes und die jeweiligen Messwerte für die Umgebungsstrahlung sollten möglichst gleichzeitig ermittelt werden. Die Messwerte für die Umgebungsluft bzw. das Fluid hingegen werden i.A. durch eine zeitliche Mittelung genauer. Hier ist ggf. eine die eigentliche Thermografische Vermessung des Messobjektes übersteigende Messperiode sogar empfehlenswert. Sie liefert i.A. physikalisch sinnvollere Mittelwerte.

Die Geometrie-Messwerte fallen hier erfindungsgemäß stets zusammen mit den Temperatur- und Umgebungsmesswerten der thermografischen Untersuchung an. Sie tun dies also genau dann, wenn sie auch für die Berechnung benötigt werden. Dies vereinfacht Systemarchitektur und Ablaufsteuerung erheblich. Sie muss also ggf. nur noch dafür sorgen, dass die "trägeren", weil i.d.R. gemittelten Messwerte für das Umgebungsfluid (ggf. automatisch) auch noch später "nachgepflegt" werden können.

Ein Rechnerarbeitsplatz mit einer vollständigen Auswerte-, Analyse- und Berichts-SW komplettiert diese Systemarchitektur zur komfortablen, schnellen und kostengünstigen (vollständigen) thermischen Analyse von nahezu beliebigen 3D-Messobjekten (siehe Figur 10).

Weitere Vorteile und Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der beiliegenden Zeichnung.

Es versteht sich, dass die vorstehend genannten und die nachstehend noch zu erläuternden Merkmale nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung verwendbar sind, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

Die Erfindung ist anhand von Ausführungsbeispielen in der Zeichnung dargestellt und wird im folgenden unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert.

Figur 1 zeigt typische Verluste eines Wohnhauses.

Figur 2 zeigt physikalische Ursachen der Energieverluste von Gebäuden.

Figur 3 zeigt Energieverluste von Gebäuden und ein Wärmestrommodell.

Figur 4 zeigt die Messphysik anhand eines Wärmestrom- und Finite-Elemente-Modells.

Figur 5 zeigt die Messphysik anhand eines Äquivalenz-Wärmestrom- und Wärmebild-Modells.

Figur 6 zeigt die Messphysik anhand der Differenzen der Physik im Vergleich zur ENEC 2009.

Figur 7 zeigt die Messphysik anhand der Berechnung der Energiekennwerte.

Figur 8 zeigt die Messphysik anhand der Berechnung der Bauteil-Dimensionen/Geometrie.

Figur 9 zeigt die Messphysik anhand der Berechnung der Energieströme.

Figur 9 zeigt die Anordnung zur Messung von Energieverlusten.

Figur 10 zeigt die Anordnung zur Messung von Energieverlusten

Die Erfindung wird somit anhand mehrerer Ausführungsbeispiele in den Figuren 1 bis 10 näher erläutert. Hierbei zeigen die Figuren 1 bis 10 Beispiele und Details sowohl für die (erstmalige) physikalische Korrektheit des Messverfahrens (Figur 1 bis 3, Figur 9) als auch für die physikalische Korrektheit der Modellierung (Figuren 4 bis 6). Die Figuren 7 bis 9 zeigen die erfindungsgemäßen Auswerteverfahren. Figur 2 bzw. Figuren 8 bis 10 zeigen die erfindungsgemäße Durchführung von Messung und Berechnung sowie die daraus resultierende Gesamtsystemarchitektur (Figur 10) des integrierten Messsystem, der Anordnung zur Durchführung des Verfahrens.

In den Figuren 1 bis 3 wird der (Wärme-) Energietransportmechanismus eines Messobjektes (hier Wohnhaus) in seine Umgebung veranschaulicht, die dafür wesentlichen Einflussfaktoren/Parameter (Figur 2) gezeigt und eine physikalisch korrekte Modellierung (Figur 3) dafür angegeben. Figur 9 zeigt abschließend, wie auf dieser Basis physikalisch kor-

rekte Messungen und Berechnungen erfindungsgemäß an realen Messobjekten gemacht werden können.

In den Figuren 4 bis 6 wird dann Schritt für Schritt dargelegt, dass und warum diese Modellierung des (Wärme-) Energietransportes physikalisch korrekt ist (Figuren 4 bis 5) und warum es die Wärmebildmessung und die daraus abgeleiteten Energieströme korrekt modelliert. In Figur 6 wird dann abschließend gezeigt, warum die derzeitigen Werte und Definitionen der ENEC bzw. der DIN-EN-ISO 6946 physikalisch nicht korrekt und deshalb für ein Messverfahren nicht geeignet sind.

Die erfindungsgemäße Auswertung der Messungen zur Berechnung der Energiekennwerte (R_w , C_w , ...) wird in den Figuren 7 bis 9 gezeigt. Hierbei zeigt Figur 7 die physikalisch korrekte Ermittlung der Energiekennwerte (R_w , C_w , ...) auf der Basis von ggf. mehreren (Energie-) Strommessungen. Figur 8 und Figur 9 zeigen wie aus den verschiedenen Messwerten sowohl die nötigen Geometrie-Informationen (Figur 8) als auch abschließend die (Energie-) Ströme selbst (Figur 9) ermittelt werden können.

Figuren 1 bis 10:

Figur 1 zeigt an einem schematisierten Beispiel die typischen Quellen und Größenordnungen der (Wärme-) Energieverluste eines durchschnittlichen (Einfamilien-) Wohnhauses EFH (Werte sind typisch für Frankreich).

Figur 2 zeigt als Prinzipskizze alle 3 für die Energieverluste durch die jeweiligen Oberflächen nach Figur 1 verantwortlichen Wärmetransportmechanismen. Dies sind:

1. Die Wärmeleitung in den Boden mit $T_{\text{Boden}} = x_1^\circ \text{K}$,

2. Die konvektive Erwärmung/Kühlung des an die jeweilige Fläche angrenzenden Fluides, hier Luft mit $T_{\text{Luft}}=x_2^{\circ}\text{K}$,
3. Der Strahlungsaustausch mit dem jeweiligen die Fläche umgebenden 2π -Halbraum. Hier sind für Gebäude insbesondere die (Strahlungs-) Temperaturen des Himmels mit $T_{\text{sky}}=x_3^{\circ}\text{K}$ bzw. der umgebenden Landschaft mit $T_{\text{Erde}}=x_4^{\circ}\text{K}$ besonders wichtig.

Bz1: Wärmeleitung/-verluste in den Boden können aufgrund fehlender Temperaturen und Materialkenntnis (T_{Boden} , λ_i , d_i , ...) in der Regel nur indirekt bestimmt werden.

Figur 3 zeigt das zu den (typischen) Wärmeverlusten aus FIG1 zugehörige äquivalente Wärmestrom-Modell. In diesem Modell werden alle einen Raum umschließenden Wände/Oberflächen durch äquivalente Wärmewiderstände (genauer Impedanzen wg. der unvermeidbaren Wärmespeicherkapazitäten ihrer einzelnen Wandbestandteile/-schichten) modelliert. Weiter sind alle Wand- bzw. Oberflächen-Temperaturen jeweils den entsprechenden Potentialen/Spannungen im Wärmestrom-Modell äquivalent (z.B. $T_{\text{int}}=U(T_{\text{int}})$). Damit entsprechen nun alle (elektrischen) Ströme im Wärmestrom-Modell genau in Betrag und Richtung den jeweiligen (Wärme-) Energieströmen in bzw. durch die realen Bauteile/Oberflächen. Die Energieerhaltungssätze werden dabei von den Kirchhoff-Knoten- und Maschenregeln für Ströme bzw. Spannungen abgebildet.

Figur 4 zeigt schematisch an Hand einer Finite-Elemente-Elementarzelle wie eine typische reale Wandstruktur in ein äquivalentes Finite-Elemente-Wärmestrom-Modell abgebildet wird. In diesem Modell fließen alle (Wärmeenergie-) Ströme nur durch die i.d.R. materialabhängigen Impedanzen zwischen jeweils zwei von den sechs direkten Nachbarknoten ($i\pm 1, k\pm 1, z$) bzw. ($i, k, z\pm 1$) jedes Knotens (i, k, z) des Mo-

dells. Der gesamte (Wärme-) Strom der somit in die bzw. aus der Wand/Oberfläche eines Bauteiles ein- bzw. austritt wird somit, wie in Figur 4 klar erkennbar, die Summe aller $I_{Si}(i,k,z_1)$ bzw. $I_{Se}(i,k,z_N)$ eines jeden modellierten Oberflächenpunktes mit der zugehörigen Temperatur/Spannung $T_{Si}(i,k,z_1)$ bzw. $T_{Se}(i,k,z_N)$, die von einer IR-Messkamera erfasst werden kann. Dieser (Wärmeenergie-) Strom wird an die jeweilige Strahlungs- ($\Leftrightarrow I_{Re}(i,k)$ bzw. $I_{Ri}(i,k)$) bzw. an die Konvektionsumgebung ($\Leftrightarrow I_{Le}(i,k)$ bzw. $I_{Li}(i,k)$) abgegeben bzw. von dieser aufgenommen. Die notwendige Energieerhaltung macht somit stets die Ströme $I_{Si}(i,k,z_1)$ bzw. $I_{Se}(i,k,z_N)$ gleich der Summe dieser Strahlungs- bzw. Konvektionsströme an der Stelle $(i,k,z_1/z_N)$. Ihre Größe und Richtung wird so aus den Messergebnissen (IR-Bild und Umgebungsparameter) direkt ableitbar.

Bz1: Messung der Verluste $\Leftrightarrow \sum_{ik} I_{Se}(ik)$:

- $TK1 \Leftrightarrow (T_{S11}, T_{S12}, \dots, T_{S1n}, \dots, T_{Smn})$
- Verluste $\Leftrightarrow \sum_{ik} I_{Se}(ik)$ da $I_j(ik)=0!$
- $I_{Se}(ik) = I_{Re}(ik) + I_{Le}(ik)$
- $I_{Re}(ik) = F(T_{Se}(ik), T_{Re}(Umg.), \Delta A)$
- $T_{Re}(Umg.) = F(T_{sky}, T_{Erde})$
- $I_{Le}(ik) = F(T_{Se}(ik), T_{Le}, a_k, L_{char}, \Delta A)$

Figur 5 zeigt in drei Transformationsabschnitten die Umwandlung eines zu einem beliebigen Wand-/Oberflächenaufbau äquivalenten Finite-Elemente-Wärmestrommodells zu einem ebenfalls dazu äquivalenten (Finite-Elemente-) Wärmebildmodell. Hierbei werden die gemessenen Temperatur-/Spannungsunterschiede zwischen zwei beliebigen benachbarten Oberflächenpunkten (i,k,z_k) und (j,l,z_k) durch gesteu-

erte Stromquellen mit den zugehörigen (Impedanz-) Strömen zwischen eben jenen Punkten abgebildet (2. Transformations-schritt in Figur 5). Diese können nun gemäß den Kirchhoff-Gesetzen ($\Leftrightarrow$ Energieerhaltung) durch stromlose Spannungsquellen mit den im Wärmebild gemessenen Temperaturdifferenzen ΔT_{sk} zweier beliebiger Oberflächenpunkte $P(i,k,z_1/z_N)$ bzw. $P(j,l,z_1/z_N)$ ersetzt werden. Da alle anderen Ströme in/aus der Wand/Oberfläche somit verschwinden stellen die einzig von der jeweiligen Oberflächentemperatur $T_{se}(i,k)$ bzw. $T_{si}(i,k)$ abhängigen Ströme $I_{se}(i,k)$ bzw. $I_{si}(i,k)$ den gesamten (Wärme-) Energietransport in/aus der jeweiligen Wand-/Oberflächenstelle $P(i,k,z_1/z_N)$ dar. Dieser kann, besser muss also nur mit einer Thermokamera berührungslos erfasst werden, da jedes andere Messverfahren i.d.R. erhebliche Verfälschungen und Verzerrungen der Ergebnisse zur Folge hat.

Figur 6 zeigt die Unterschiede der erfindungsgemäß physikalisch korrekten Modellierung/Messung der (Wärme-) Energieströme I_{se}/I_{si} durch Wand-/Bauteiloberflächen und den in allen (käuflichen) Gebäudesimulationsmodellen benutzten Standards nach DIN EN ISO 6946 ($\Leftrightarrow$ ENEC 2009/2012). Da in diesen Modellen lediglich die (Außen-/Innen-) Lufttemperatur T_{le}/T_{li} als einziger Umgebungsparameter auftaucht, sind sie für eine Messung des Wärmewiderstandes bzw. der (Wärme-) Impedanz eines Bauteils/Oberfläche völlig ungeeignet. Diesen (Norm-) R_{se}/R_{si} -Werten kommt keinerlei physikalische und somit für eine Messung/Berechnung verwertbare Realität zu. Diese sind lediglich dazu geeignet, bei der (monats-/jahres-) gemittelten Simulation der Stärke von (Wärme-) Energieströmen, die durch die gewählten Modellvereinfachungen (z.B. fehlendes "Strahlungsklima" bzw. "Strahlungsumgebung") notwendig auftretenden Fehler ggf. auszugleichen.

Bz1: Berechnung Wärmewiderstände:

Physik versus ENEV 2009:

$$R_W = R_{W1} + R_{W2} \quad \neq R_{Si} + \sum_i (d_i / \lambda_i) + R_{Se}$$

$$C_W = \sum_i C_i \quad = \sum_i C_i$$

$$I_{RW} = I_{Se} = I_{Re} + I_{Le} \quad \neq (T_{Li} - T_{Le}) / R_W$$

$$T_{int} = F(T_{Ri}, T_{Li}) \quad \neq T_{Li}$$

$$T_{ext} = F(T_{Re}, T_{Le}) \quad \neq T_{Le}$$

Figur 7 zeigt die erfindungsgemäß nun physikalisch korrekte Berechnung einer Impedanz (Wärmewiderstand $R_W = R_{W1} + R_{W2}$ mit der zugehörigen Wärmekapazität C_W bzw. der Trägheit τ_W) eines beliebigen Bauteils bzw. seiner Oberfläche aus den jeweiligen Messwerten T_{Se} bzw. T_{Si} . Das hier dargestellte 4-Pol Ersatzschaltbild ist im Gegensatz zur ENEV-Norm aus FIG6 physikalisch korrekt. Da i.d.R. und in allen Simulationsmodellen die Rauminnentemperatur T_{Se} als (nahezu) konstant angenommen werden kann, "sieht" die variable (Außen-) Temperatur T_{Se} mit den beiden (Regel-) Zyklen Tag ($\omega = 2\pi \cdot 24h$) bzw. Jahr ($\omega = 2\pi \cdot 365 \cdot 24h$) nur die Parallelschaltung von R_{W1} und C_W mit der Zeitkonstanten τ_W als effektive "Trägheit" des jeweiligen Bauteils bzw. seiner Oberfläche. Bleibt die Messperiode Δt klein gegen diese Zeitkonstante, so können gemäß 4-Pol-Theorie auch diese sonst "verborgenen" Werte zumindest näherungsweise ermittelt werden. Ein weiterer Vorteil dieser erfindungsgemäßen Messmethode ist die Tatsache, dass im DC-Fall ($\omega = 0$) der R_W -Wert einer Innen- mit dem einer Außen-Messung unter i.d.R. sehr verschiedenen Messbedingungen natürlich übereinstimmen müssen. Eine Fehlerkontrolle wird so zumindest erleichtert, wenn nicht erstmals möglich.

$$Bz1: \quad AC(\omega \neq 0): R_{W2} + R_{W1} / (1 + 2\pi j \cdot R_{W1} C_W / \tau_W) = R_{W2} + R_{W1} / (1 + 2\pi j \cdot \tau_{Wj} / \tau_W)$$

$$Z_{Wj} = \{$$

$$DC(\omega = 0): R_{W1} + R_{W2} = A_j \cdot \sum_i (d_{1i} / l_{1i}) + A_j \cdot \sum_k (d_{2k} / l_{2k})$$

$$\text{mit } \tau_{Wj} = R_{W1} C_W$$

$$\text{Bz2: } AC(\omega \neq 0): I_{Re} + I_{Le} = I_{Si} - I_C \neq I_{Si} = I_{Ri} + I_{Li}$$

$$I_{Se} = \{$$

$$DC(\omega = 0): I_{Re} + I_{Le} = I_{Si} = I_{Ri} + I_{Li}$$

$$\text{Bz3: } I_C(t_i) = I_{Si}(t_i) - I_{Se}(t_i) \quad \text{für alle } \omega, t_i$$

$$R_{W1} \approx \Delta U_C / \Delta I_{Si} = ((T_{Se}(t_{i+1}) - T_{Se}(t_i)) - (R_{W2} * (I_{Se}(t_{i+1}) - I_{Se}(t_i)))) / (I_{Si}(t_{i+1}) - I_{Si}(t_i))$$

$$R_{W2} = Z_{Wj}(DC) - R_{W1}$$

$$C_W \approx \Delta Q_C / \Delta U_C = \Delta t * (I_C(t_{i+1}) + I_C(t_i)) / (2 * ((T_{Se}(t_{i+1}) - T_{Se}(t_i)) - R_{W2} * (I_{Se}(t_{i+1}) - I_{Se}(t_i))))$$

$$\text{Für alle } \Delta t = t_{i+1} - t_i \text{ und } \Delta t \ll \tau_{Wj}$$

Figur 8 zeigt die erfindungsgemäße und trigonometrisch korrekte Messung/Ermittlung der Bauteilflächengeometrie hier am Beispiel einer geneigten (Dach-) Fläche. Bei der Messung der Oberflächentemperaturen $T_{Se}(i, k)$ mit der Thermokamera TK1 (siehe Figur 9) wird mittels des eingebauten Messgerätes DM1 (siehe Figur 10) gleichzeitig durch mindestens drei (Laser-) Distanzmessungen ($S_1, S_2, S_3, \dots$) mit bekannten und festen Winkeln ($\alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{23}, \dots$) die (Mess-/Dach-) Fläche $BE1(P1, P2, P3, \dots)$ trigonometrisch vollständig bestimmt und mit realen Dimensionen/Koordinaten (z.B. in m) sowie in ihrer Lage im Raum (α_{Dach} zur Horizontalen bzw. ihrer Neigung zur Kamerabildebene α_{Kamera}) definiert. Mit diesen Daten kann nun der "Footprint" ΔA eines jeden Kamerapixels sowohl in Bild-Koordinaten (i, k) als auch in realen Koordinaten (x, y, z) bestimmt werden. Damit ist sowohl ein Flächenelement $\Delta A(i, k)$ als auch die gesamte Messfläche (z.B. in m^2) mit allen Charakteristika darin vollständig erfasst und vermessen. In diesem nun mit realen Dimensionen (x, y, z) versehenen Kamerabild von TK1 können nun während und/oder nach der Messung mittels geeigneter Bildbearbeitungsalgorithmen weitere Strukturen/Objekte für eine (ther-

mische) Messung/Auswertung automatisch identifiziert und ebenfalls vollständig charakterisiert werden!

Figur 9 zeigt die erfindungsgemäße und nun physikalisch korrekte Messung und Berechnung der I_{se}/I_{si} -Werte am allgemeinen Fall einer geneigten Bauteilfläche (z.B. Dach, ...). Dazu müssen erfindungsgemäß mit der (Thermo-) Kamera TK1 die Oberflächentemperaturen $T_{se}(i,k)$ aller Flächenelement $\Delta A(i,k)$, die jeweilige 2π -Halbraumstrahlung (mit TK2) auf dieses Flächenelement $\Delta A(i,k)$, die (Luft-) Umgebungsparameter (T_{Li} , v_{Li} , ...) des jeweils umschlossenen Raumes (hier Wohnhaus) mit den Messgeräten T1 sowie die (Luft-) Umgebungsparameter (T_{Le} , v_{Le} , ...) der (Außen-) Welt mit den Messgeräten T2 möglichst gleichzeitig gemessen werden. Nimmt man erfindungsgemäß in erster Näherung die mit TK2 gemessene Halbraumstrahlung (T_{sky} , T_{Erde}) als vom Ort des Flächenelements $\Delta A(i,k)$ unabhängig an, so lassen sich die Ströme I_{se}/I_{si} erstmals einfach und in geschlossener Form angeben und mit hinreichender Genauigkeit berechnen. Die Berechnung der sonst extrem schwierig zu erstellenden und zu lösenden Planck'schen Strahlungsintegrale kann somit unterbleiben. Der jeweilige Strahlungsanteil I_{re}/I_{ri} kann damit einfach berechnet werden. Für den Konvektionsanteil von I_{le}/I_{li} sind nun ebenfalls alle Informationen (T_{Luft} , v_{Luft} , L_{char} , α_{Dach} , ...) vorhanden, so dass dieser mittels bekannter Strömungsmechanik-Formeln ($\Leftrightarrow$ VDI-Wärmeatlas) ebenfalls mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden kann. Damit sind I_{se}/I_{si} vollständig charakterisiert. Die Energiekennwerte der Oberflächen/Bauteile können nun aus diesen Werten jeweils (siehe z.B. Figur 7) berechnet werden.

Figur 10 zeigt das erfindungsgemäß zusammengestellte integrierte Gesamtsystem bzw. die Anordnung mit dem minimal notwendigen Satz von Messgeräten zur Messung/Bestimmung

der/aller benötigten Energie- und Geometriekennwerte (U_W/R_W , C_W/τ_W , Bauteildimensionen, ...) eines Gebäudes und/oder eines Bauteils. Dieser besteht aus einer (Thermo-) Kamera TK1 mit eingebautem Entfernungsmesser DM1 und einem Halbraumstrahlungsmessgerät TK2, das zumindest die beiden Halbräume Himmel und Erde mit einstellbarem ϕ_{Erde} vermessen können muss. Weiter werden mindestens 2 (möglichst) mit Funkübertragung ausgestattete Umgebungsparametermessgeräte T1 bzw. T2 für die Liquid- (hier zumeist Luft-) Innen- und Außen-Temperaturen $T_{\text{Li}}/T_{\text{Le}}$, die Strömungsgeschwindigkeiten $v_{\text{Li}}/v_{\text{Le}}$, die Feuchte, etc. benötigt. Komplettiert wird das Gesamtsystem durch einen Rechnerarbeitsplatz AP1 mit der vollständigen THERMO-U Auswerte-SW sowie ggf. weiteren Tools zur komfortablen Bearbeitung und Auswertung der gewonnenen (Thermo-) Bildinformationen sowie zur Erstellung aussagekräftiger Berichte.

Abschließend wird eine Zusammenfassung über mögliche Ausführungen der Erfindung gegeben

Es wird ein Verfahren zur Messung und Berechnung von Wärmeenergieverlusten P_v , von Wärmewiderständen R_W , effektiven Wärmekapazitäten C_W sowie der zugehörigen thermischen Trägheitskonstanten τ_W von Oberflächen von Geräten, Anlagen, Gebäuden, usw. vorgestellt, mit dem gleichzeitig alle Konvektions- und Strahlungs- (Wärme-) Energieverluste eines Messobjektes durch seine jeweiligen Oberflächen berührungslos sowohl von innen als auch von außen gemessen und berechnet werden können.

Im Falle einer teilweisen Integration/Bedeckung des Messobjektes in/durch ein unbekanntes Wärmeleitungsmedium - hier Boden genannt - können auch die Wärmeleitungsverluste in den Boden durch Differenzbildung einer integralen Innen- und Außen-Messung nach Anspruch 1 bestimmt werden.

Die jeweiligen Oberflächentemperaturen aller Flächenelemente können mittels (Thermo-) Kamera/Sensor (TK1) berührungslos erfasst und ihre jeweilige tatsächliche Lage und Geometrie im Raum durch ein integriertes Geometriemesssystem (DM1) gleichzeitig mit erfasst und berechnet werden.

Weiterhin kann der Strahlungsenergieeintrag der Messobjektumgebung in jedes vermessene Flächenelement durch einen integrierten 2π -Halbraum-Strahlungssensor (TK2) nach mindestens 2 einstellbaren Raumwinkeln (φ_{sky} , φ_{Earth}) getrennt und mit der Messung der Oberflächentemperaturen der jeweiligen Flächenelemente gleichzeitig mit erfasst werden.

Außerdem kann der 2π -Halbraum-Strahlungssensor (TK2) den zu messenden Halbraum in $M \times K$ gleiche/ungleiche Raumwinkel aufteilen, getrennt vermessen (Halbraum-Thermokamera) und die jeweiligen Strahlungstemperaturen der einzelnen Raumwinkel raumwinkelanteilskorrekt an das integrierte Messsystem weitergeben.

Zudem kann jeweils mindestens ein gesonderter, mittels Kommunikationseinrichtung in das gesamte Messsystem integrierter Fluidparametersensor die zur Messung der Konvektionsverluste zusätzlich notwendigen Fluidparameter des jeweiligen Innenraumes sowie des jeweiligen Außenraumes) des Messobjektes, wie Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit (Betrag, Richtung), Feuchte etc., gleichzeitig an das integrierte Messsystem als Zeitpunkts- und/oder als Zeitperioden- (Mittel-) Wert an das integrierte Messsystem übermittelt werden.

Das kameraintegrierte Geometriemesssystem kann gleichzeitig mit der Temperaturmessung mittels dreier Messstrahlen (S_1 , S_2 , S_3) mit bekannten Winkeln (α_{12} , α_{13} , α_{12}) zueinander je-

weils drei Punkte (P_1 , P_2 , P_3) auf der jeweiligen Messebene (BE1) in Lage und Abstand zur Bildebene der Kamera vermisst und so durch einfache trigonometrische Berechnung jedem Bildpixel des Messobjektes reale physikalische Dimensionen (z.B. in m) zuordnet und damit dem Gesamtbild der Messkamera ebenfalls reale x/y/z-Koordinaten (z.B. in m) zuordnet.

Das kameraintegrierte Geometriemesssystem kann gleichzeitig mit der Temperaturmessung mehr als drei Messstrahlen (S_1 , S_2 , ...) mit bekannten Winkeln zueinander aussendet und so die Zuordnung realer (x, y, z) Koordinaten bzw. anderer Koordinatensysteme (z.B. Zylinderkoordinaten) durch einfache trigonometrische Berechnung auch an gekrümmte Messflächen mittels wählbarer Oberflächenformschablonen ermöglichen.

Das Verfahren kann sich dadurch auszeichnen, dass alle Teile des integrierten Messsystems via Kommunikationseinrichtungen drahtlos miteinander und mit einem Computerarbeitsplatz (AP1) verbunden sind bzw. damit verbunden werden können und so alle zur Auswertung notwendigen physikalischen und Geometrie-Informationen sowohl in der Messkamera (TK1) als auch am Computerarbeitsplatz zur Auswertung sofort nach der Messung zur Verfügung stehen.

Es werden weiterhin ein Computerprogramm und ein Computerprogrammprodukt vorgestellt, die direkt in den internen Speicher eines Computers geladen werden können und Softwareabschnitte umfassen, mit denen ein Verfahren zur Messung und Berechnung von Wärmeenergieverlusten, von Wärmewiderständen der hierin beschriebenen Art ausgeführt werden kann.

Die vorliegende Erfindung beruht auf der (physikalischen) Tatsache, dass (Wärme-) Energieströme I_E durch ein Bauteil (Medium m_1) bzw. dessen Grenz-/Hüllfläche A_{12} ($m_1 \rightarrow m_2$) zur

Umgebung (Medium m_2) nur abhängig sind von den folgenden, im Einzelnen messbaren Materialeigenschaften bzw. Umweltbedingungen:

Es gilt hierbei stets: $I_E(A_{12}) = I_{Em1} = I_{Em2} = I_{kdt} + I_{knv} + I_{rad}$ mit

$$I_{kdt} = A_{12} * [d_{m2} / \lambda_{m2}] * (T_s(x, y) - T_{m2}(Umgb))$$

mit $T_{m2}(Umgb) = T_{fld}(Umgb)$;

$$I_{knv} = A_{12} * \alpha_k(\gamma_s, \emptyset(T_s), L_{char}(A_{12}), E_{mat}(fld), v_{fld}) * (T_s(x, y) - T_{fld}(Umgb));$$

$$I_{rad} = \int A_{12} [C_{12}(x, y, 2\pi-Hem(x, y)) * (T_s^4(x, y) - T_{R2}^4(2\pi-Hem(x, y)))]$$

mit $T_{R2}(2\pi-Hem(x, y)) \neq T_{fld}(Umgb)$;

Wie zu erkennen ist, wird die Bestimmung/Messung wie die jeweilige (Umgebungs-) Temperaturabhängigkeit der I_E -Anteile zunehmend komplex, so dass in praxi bei einer Messung mit Vereinfachungen gearbeitet werden muss. Bei der Bestimmung der thermischen Eigenschaften der Bauteile/Hüllflächen kommt zusätzlich noch deren Trägheit/Speicherfähigkeit erschwerend hinzu, d.h. ihre thermischen Widerstände sind komplex! Sie können daher nur aus einer Zeitreihenmessung, wie hierin beschrieben, ermittelt werden.

Die Standardumgebung bei Gebäuden ist das Fluid Luft. Daher wird der konduktive Anteil I_{kdt} i.A. zu Null, d.h. es sind nur die konvektiven und radiativen (Strahlungs-) Anteile an I_E zu berücksichtigen.

Dies vereinfacht die Messaufgabe ganz erheblich, da der konvektive Anteil I_{knv} nur vom Wärmeübergangsparameter α_k und der leicht messbaren Temperaturdifferenz $T_s(x, y) -$

$T_{fld}(Umgb)$ abhängt. Der Parameter α_k wiederum hängt nur von (Oberflächen-) Geometrie ($\gamma_s \Delta x_{12}$, Δy_{12}) der (Hüll-) Fläche A_{12} , ihrer mittl. Oberflächentemperatur $\varnothing(T_s)$ sowie von (weitgehend konstanten) Materialparametern sowie der Strömungsgeschwindigkeit des Umgebungsfluides (i.A. Luft) ab.

Ein wesentlicher Gedanke besteht darin, alle diese Parameter gleichzeitig und automatisch zu erfassen und mit einem ebenfalls automatisch und fallspezifisch erstellten Modell die zugehörigen Energieströme (z.B. I_{knv}) in Wert und Richtung physikalisch korrekt zu ermitteln. Dies wird so in keinem mir bekannten Verfahren getan.

Was den Strahlungsanteil I_{rad} des Energiestromes betrifft, so sind die Zusammenhänge jedoch sehr viel komplexer. Sie sind sogar i.A. nicht berechenbar, d.h. es gibt nur für besondere Fälle und Geometrien geschlossene Lösungen, also Formeln zur Berechnung der jeweiligen Werte. Ein weiterer sehr wichtiger Punkt ist, dass hierbei neben den Oberflächentemperaturen $T_s(x,y)$ von A_{12} auch die (Rück-) Strahltemperaturen $T_{R2}(2\pi-Hem(x,y))$, d.h. die Oberflächentemperaturen von schwarzen Strahlern die eine äquivalente Wärmestrahlung auf A_{12} aussenden, zu berücksichtigen sind. Ohne vereinfachende Modellannahmen sowie eine geeignete Messung/Modellierung ist dieser häufig sogar dominante Anteil I_{rad} am Energiestrom I_E durch A_{12} weder mess- noch berechenbar.

Genau hier setzt wiederum das Verfahren an mit den folgenden, für praktische Zwecke hinreichend genauen Vereinfachungen und Modellierungen:

A_{12} ist ein grauer (ϵ_1) Strahler, der seine 2π -Umgebung nicht messbar beeinflusst. Seine äquivalente Schwarzkörper-Strahlung $T_s(x,y)$ wird also vollständig absorbiert!

Die relevante 2π -Wärmestrahlung der Umgebung auf A_{12} wird durch die Messung einer äquivalenten Strahlung der jeweiligen schwarzen ($\epsilon_2=1!$) 2π -Halbkugelumgebung von A_{12} (zumindest hinreichend korrekt) modelliert.

Eine 2π -Hemisphären-Thermokamera (auf der z-Achse) von A_{12} misst genau diese äquivalente schwarze ($\epsilon_2=1!$) 2π -Hemisphärenstrahlung und damit $T_{R2}(2\pi\text{-Hem}(x,y))$ hinreichend genau.

Mit diesen Annahmen und Modellierungen wird jetzt I_{rad} erstmals mess- und berechenbar. Die i.A nicht lösbare Integralformel für $I_{\text{rad}} = \int_{A_{12}} [C_{12}(\dots) * (T_s^4(\dots) - T_{R2}^4(\dots))]$ kann nun durch geschlossene Formeln ersetzt und I_{rad} berechnet werden.

So wird der Integralterm $C_{12}(\dots)$ zu $C_{12} = \epsilon_1(x,y) * (\epsilon_2=1) * \sigma$ mit der Boltzmannkonstanten σ . Die Integralformel für den Energiestrom I_{rad} wird so zu $I_{\text{rad}} = \int_{A_{12}} [C_{12} * (T_s^4(x,y) - T_{R2}^4(\dots))]$ die in einfacher Form über jedes $\Delta A_{12}(x,y)$ berechnet und aufsummiert werden kann. So bleibt erfindungsgemäß lediglich die Aufgabe die für den Fall jeweils relevanten Rückstrahltemperaturen $T_{Rk}^4(\dots)$ zu messen und in die Formeln/Modelle einzufügen.

Dabei kann zwischen nur einer effektiven 2π -Temperatur $T_R^4(2\pi)$, zwischen zwei Temperaturen $(T_{Ra}^4(\phi_1), T_{Rb}^4(\phi_2))$ mit $\phi_1 + \phi_2 = 2\pi$ bis hin zu MxK-Raumwinkeln mit $T_{Rmk}^4(\phi_m, \phi_k)$ ggf. differenziert werden.

Die erfindungsgemäße Automatisierung und die Gleichzeitigkeit der Messung erlaubt als Folge auch über Zeitreihenmes-

sungen sogar die Messung/Bestimmung der Wärmekapazität C_w bzw. der Trägheitskonstante τ_w von A_{12} !

Das erfindungsgemäße Verfahren beruht also auf

einer automatischen Erstellung eines physikalische korrekten Konvektionsmodells ($\Leftrightarrow \alpha_k(\dots)$) auf der Basis von zu messenden Oberflächentemperaturen $T_s(x,y)$, Geometrieen (L_{char} , γ_s , ...) und Umweltinformationen (T_{fld} , v_{fld} , ...) zur Berechnung des zugehörigen Energiestromes I_{knv} durch A_{12} in Betrag und Richtung!

einer automatischen Erstellung eines physikalische korrekten Strahlungsmodells ($\Leftrightarrow \epsilon_k(x,y,z)$, $C_{12}(\dots)$, $T_s^4(x,y,z)$, $T_{Rmk}^4(\phi_m, \phi_k)$, ...) auf der Basis von zu messenden Oberflächentemperaturen $T_s(x,y,z)$, Rückstrahltemperaturen $T_{Rmk}^4(\phi_m, \phi_k)$ und Geometrieen ($\Leftrightarrow footprint(x,y,\phi_x,\phi_y)$) zur Berechnung des zugehörigen Energiestromes I_{rad} durch A_{12} in Betrag und Richtung!.

einer gleichzeitigen und automatisierten Messung der folgenden Parameter für die Messfläche A_{12} :

Geometrie (Dimension, Lage im Raum, L_{char} , γ_s , ...),

Oberflächentemperaturen $T_s(x,y,z)$,

relevante ($\Leftrightarrow$ Lage) 2π -Rückstrahlung $T_{Rmk}^4(\phi_m, \phi_k)$ und

der Umgebungsparameter $T_{fld}(int)$, $T_{fld}(ext)$, v_{fld} , ...

Aufgrund der i.A. sehr großen Temperaturunterschiede zwischen Himmel und Erde ist es bei der Messung von Gebäuden i.A. angebracht, zumindest diese beiden „Rückstrahltemperaturen“ getrennt zu erfassen und im Berechnungsmodell zu berücksichtigen. Bei „komplexeren“ Strahlungsumgebungen bietet das erfindungsgemäße Verfahren eine Vielzahl von Möglichkeiten diesen Einfluss auf den Wärmetransport durch geeignete Messungen, z.B. mittels einer MxK-Thermokamera, durch geeignete Messung/Mittelung einfach und physikalisch korrekt zu ermitteln.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen und Berechnen eines Wärmetransports durch eine Hüllfläche, bei dem eine Wärmestrahlung und eine Konvektion berücksichtigt werden, wobei zur Ermittlung der Wärmestrahlung eine Oberflächentemperatur der Hüllfläche und eine Rückstrahltemperatur der die Hüllfläche umgebenden Hemisphäre berücksichtigt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zur Ermittlung der Oberflächentemperatur eine Wärmebildkamera verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem zur Ermittlung der Rückstrahltemperatur eine Wärmebildkamera verwendet wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem bei der Berechnung der Konvektion Geometriebedingungen der Hüllfläche berücksichtigt werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem ein konduktiver Wärmeübergang zu einer Bodenfläche berücksichtigt wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, das für ein Gebäude durchgeführt wird.

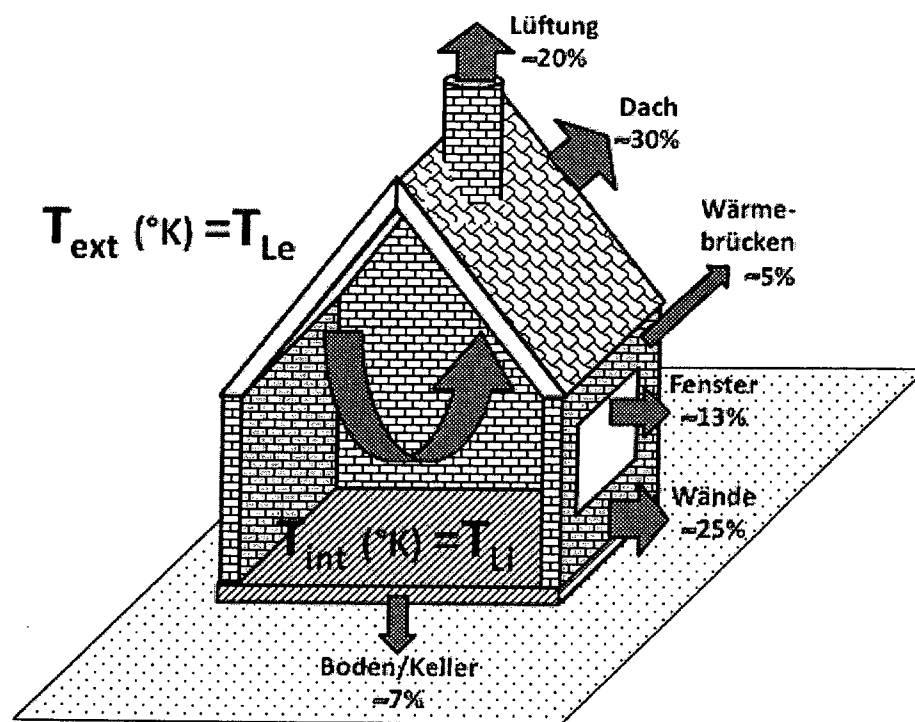
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass im Falle einer teilweisen Integration/Bedeckung des Messobjektes in/durch ein unbekanntes Wärmeleitungsmedium - hier Boden genannt - auch die Wärmeleitungsverluste in den Boden durch Differenzbildung einer integralen Innen- und Außen-Messung bestimmt werden.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, bei dem die jeweiligen Oberflächentemperaturen aller Flächenelemente mittels Kamera bzw. Sensor berührungslos erfasst und ihre jeweilige tatsächliche Lage und Geometrie im Raum durch ein integriertes Geometriemesssystem gleichzeitig mit erfasst und berechnet werden.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 und 8, bei dem der Strahlungsenergieeintrag der Messobjektumgebung in jedes vermessene Flächenelement durch einen integrierten 2π -Halbraum-Strahlungssensor nach mindestens zwei einstellbaren Raumwinkeln (φ_{sky} , φ_{Earth}) getrennt und mit der Messung der Oberflächentemperaturen der jeweiligen Flächenelemente gleichzeitig mit erfasst wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem der 2π -Halbraum-Strahlungssensor den zu messenden Halbraum in $M \times K$ gleiche/ungleiche Raumwinkel aufteilt, getrennt vermisst und die jeweiligen Strahlungstemperaturen der einzelnen Raumwinkel raumwinkelanteilskorrekt an das integrierte Messsystem weitergibt.
11. Verfahren nach Anspruch 9 und 10, bei dem die Aufgaben des 2π -Halbraum-Strahlungssensors durch einen Sensor nach Anspruch 8 mit zusätzlicher Panoramafunktion zur automatischen Erfassung der vollständigen 2π -Hemisphäre

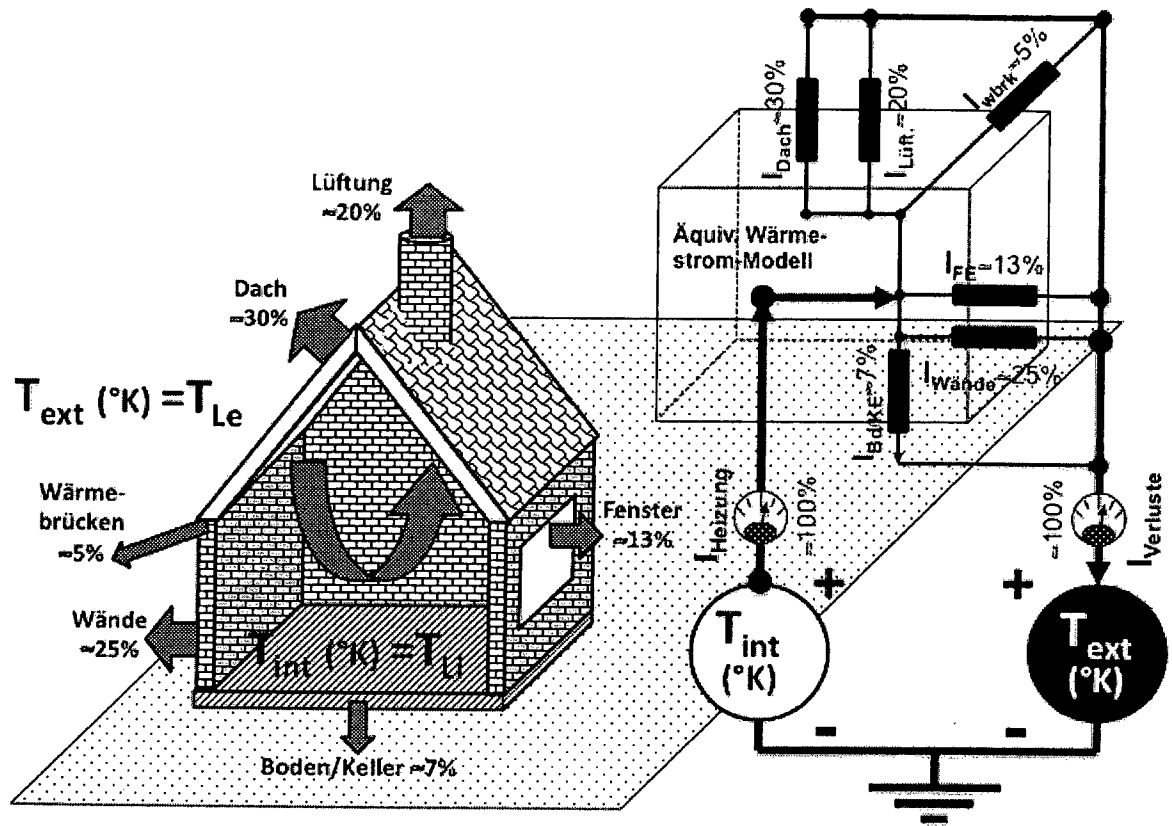
der Messfläche, bspw. durch einen 2π -Kameraschwenk, erfüllt werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, bei dem das kameraintegrierte Geometriemesssystem gleichzeitig mit der Temperaturmessung mittels 3er oder mehr Messstrahlen ($S_1, S_2, S_3, \dots$) mit bekannten Winkeln ($\alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{12}, \dots$) zueinander jeweils 3 oder mehr Punkte ($P_1, P_2, P_3, \dots$) auf der jeweiligen Messebene in Lage und Abstand zur Bildebene der Kamera vermisst und so durch einfache trigonometrische Berechnung jedem Bildpixel des Messobjektes reale physikalische Dimensionen (z.B. in m) zuordnet und damit dem Gesamtbild der Wärme- bzw. Messkamera ebenfalls reale x/y/z-Koordinaten zuordnet.
13. Anordnung zur Berechnen eines Wärmetransports durch eine Hüllfläche, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 12, mit einer Recheneinheit, die dazu ausgelegt ist, eine Wärmestrahlung und eine Konvektion zu berücksichtigen, wobei zur Ermittlung der Wärmestrahlung eine Oberflächentemperatur der Hüllfläche und eine Rückstrahltemperatur der die Hüllfläche umgebenden Hemisphäre berücksichtigt werden.
14. Anordnung nach Anspruch 13, die eine Wärmekamera umfasst.
15. Computerprogramm-Produkt, das direkt in den internen Speicher eines Computers geladen werden kann und Softwareabschnitte umfasst, mit denen ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12 durchgeführt wird.

Figur 1:

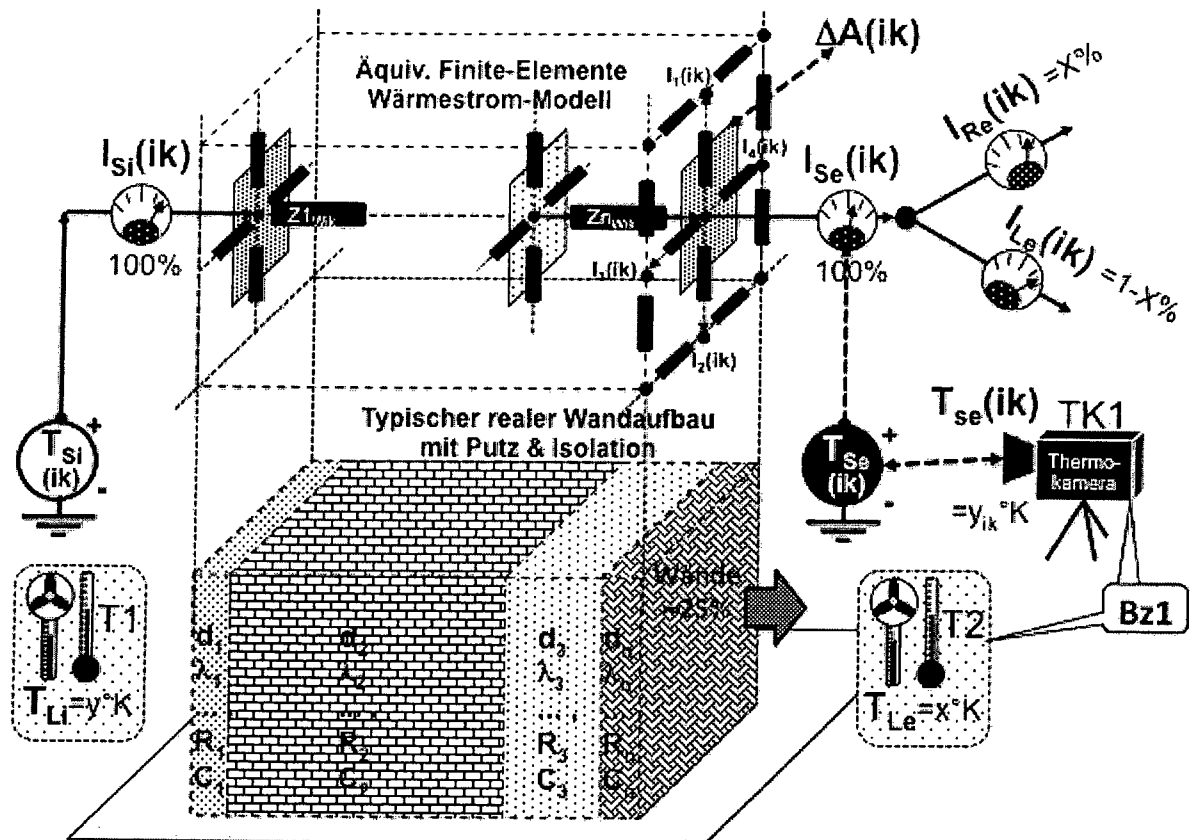
Typische Energieverluste eines Wohnhauses



Figur3: Energieverluste von Gebäuden und Wärmestrommodell

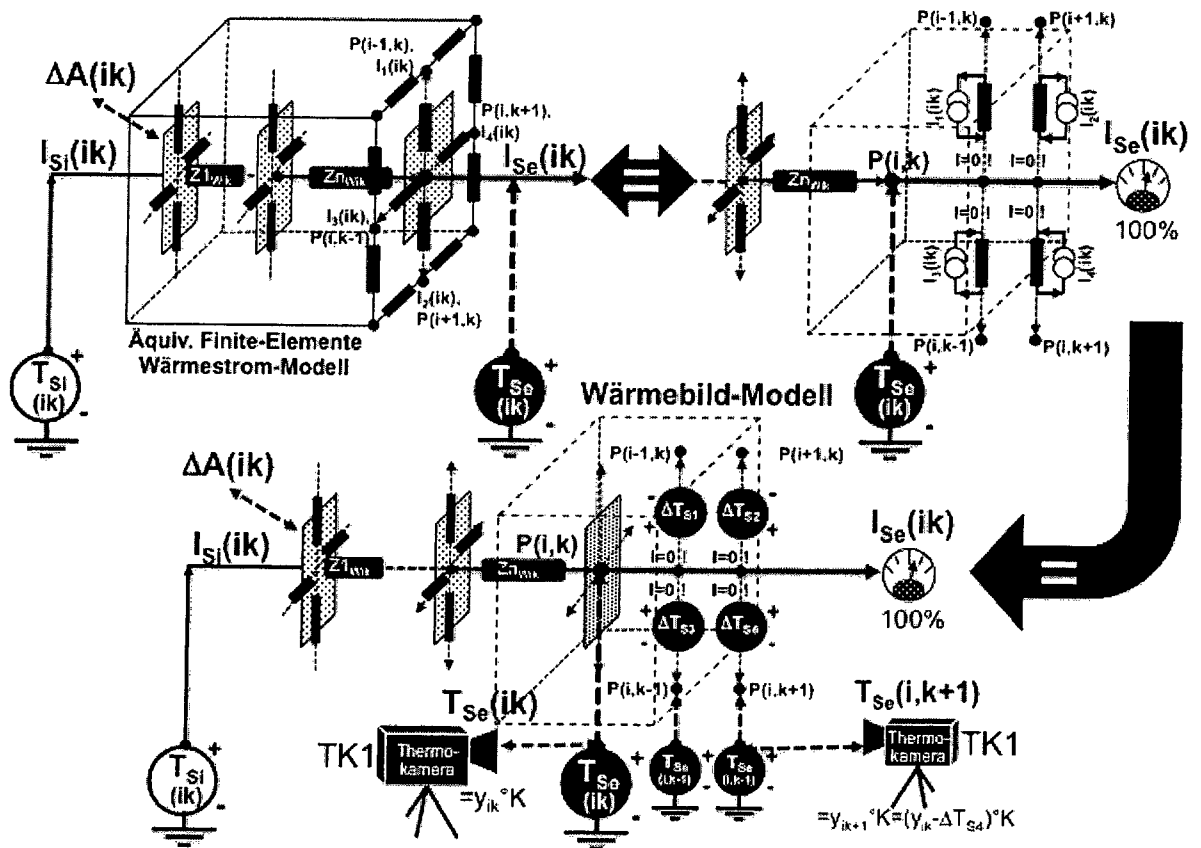
Figur 4:

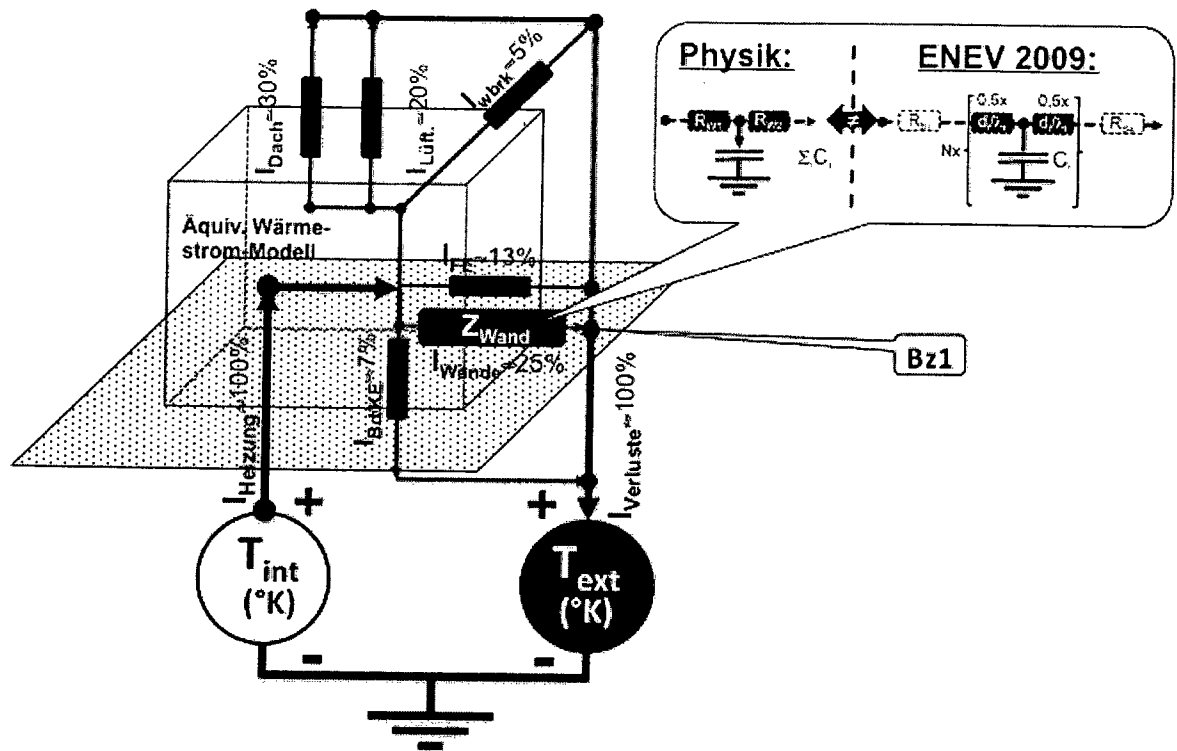
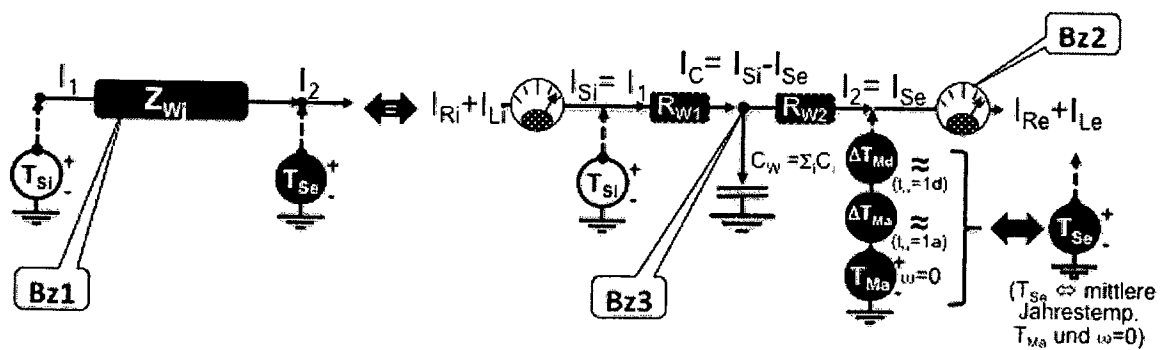
Messphysik - Wärmestrom- und Finite-Elemente Modell



Figur 5:

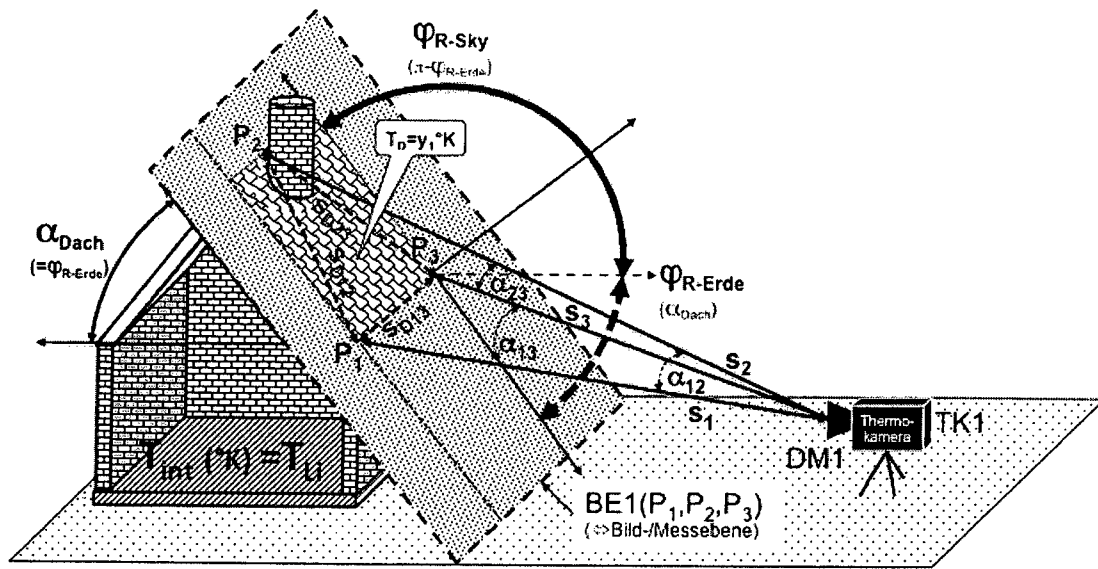
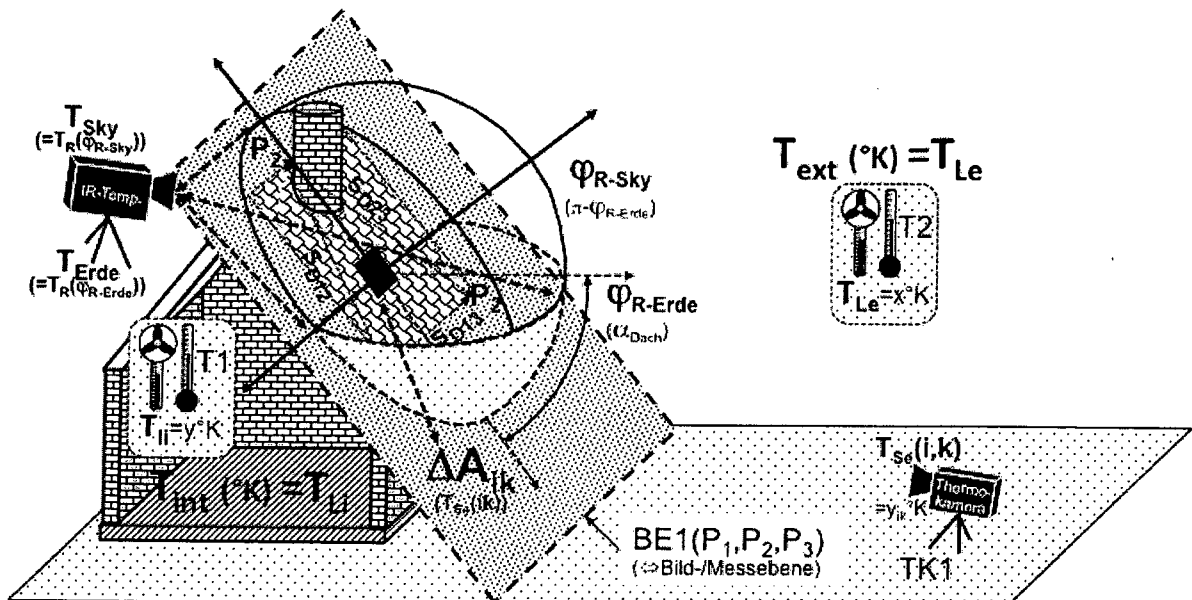
Messphysik - Äquivalenz Wärmestrom- und Wärmebild-Modell



Figur 6:Messphysik – Differenzen Physik $\Leftrightarrow$ Standards ENEC2009/2012**Figur 7:**Messphysik – Berechnung Energiekennwerte (R_W , C_W , τ_W , ...)

Figur 8:

Messphysik - Berechnung Bauteil-Dimensionen/Geometrie

**Figur 9:**Messphysik - Berechnung Energieströme (I_{Se} , I_{Re} , I_{Le} , ...)

Figur 10:

THERMO-U – Gesamtsystem zur Messung von Energieverlusten

