

Wärmestrommessung an Außentestständen zur Bestimmung der Betriebsparameter von Außenwandbauteilen

Von der Fakultät Energietechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Rainer Pfluger
aus München

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt
Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2002

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart
I T W

2002

Kurzfassung

Wärmestrommessung an Außentestständen zur Bestimmung der Betriebsparameter von Außenwandbauteilen

Außenwände von Gebäuden werden nach ihrem Wärmeschutz beurteilt, transluzente Bauteile darüber hinaus auch nach ihren Eigenschaften bezüglich der solaren Gewinne bzw. dem Sonnenschutz. Besonders bei großflächigen, komplexen und inhomogenen Bauteilen bietet die Messung im Außenteststand Vorteile gegenüber der Labormessung: Hier können Außenwandbauteile in ihrer Originalgröße unter realen Wetterbedingungen getestet werden. Labormessungen sind dagegen auf Sonnensimulatoren angewiesen, welche sich dem Strahlungsspektrum der Sonne nur annähern, ihm aber nicht gleichkommen.

Im Gegensatz zu Labormessungen liegen beim Test von Außenwandbauteilen im Außenteststand naturgemäß instationäre Randbedingungen vor. Um auf die Betriebsparameter der Testwand (Wärmedurchgangskoeffizient k , Gesamtenergiedurchlaßgrad g und Wärmekapazität C) schließen zu können, muß eine vollständige Wärmebilanz unter Berücksichtigung der Wärmespeicherung über die gesamte Testraumhülle aufgestellt werden. Neben der zugeführten Heizleistung bzw. der abgeführten Kühlleistung müssen auch die Wärmeströme durch die Testraumhülle gemessen werden. Mit Hilfe der Parameteridentifikation, einem numerischen Verfahren zur Anpassung von Rechenmodellen, werden die thermophysikalischen Parameter aus diesen Meßwerten bestimmt.

In der vorliegenden Arbeit werden die unterschiedlichen Konzepte zur Messung der Wärmeströme durch die Testraumhülle, nämlich die geregelte Schutzheizung PAS (Pseudo Adiabatic Shell) und die großflächige Wärmestrommessung HFS bzw. LAH (Heat Flux Sensitive Tiles bzw. Large Area Heat Flux Sensors), experimentell und theoretisch untersucht.

Letztere wurde vom Autor entwickelt und speziell für den Einsatz in Außentestständen konzipiert und gebaut. Im Gegensatz zu konventionellen Wärmestrommeßplatten wurden die Temperaturmeßstellen nicht in Richtung des Wärmestroms angeordnet, sondern quer dazu. Durch Einbringen von Aluminium-Zylinderstiften in das Grundmaterial der Wärmestrommeßplatten wird das Isothermenfeld im Bereich dieser Inhomogenitäten verzerrt. Folglich treten auch zwischen Punkten einer Ebene parallel zur Plattenoberfläche Temperaturdifferenzen auf, diese sind proportional zum Wärmestrom durch die Platte. Diese Bauweise bietet fertigungstechnische Vorteile, weil die Thermoelementketten in einer Ebene parallel zur Plattenoberfläche mit geringem Aufwand verlegt werden können. Die Oberflächentemperaturmessung erfolgte über die Widerstandsmessung an einem Nickeldraht, welcher unter einer Aluminiumschicht verlegt war.

Die Herstellung der Thermoelementketten erfolgte mit Hilfe der Galvanotechnik. Die Galvanisierapparatur mußte speziell für diese Anwendung entwickelt und gebaut werden. Um die Funktionsweise der neuartigen Wärmestrommeßplatten zu überprüfen und die Bauart zu optimieren, waren drei verschiedene Prototypen hergestellt und getestet worden.

Theoretische Untersuchungen wurden mit Hilfe von Simulationsrechnungen für verschiedene Prototypen durchgeführt. Über die Einführung eines modifizierten Formkoeffizienten konnte der Einfluß der Geometrie auf die Sensorempfindlichkeit quantifiziert werden. Auf diese Weise können beliebige Konstruktionen weitgehend unabhängig vom verwendeten Grundmaterial direkt miteinander verglichen werden.

Abstract

Heat Flow Measurement in Outdoor Test Facilities for Identification of the Thermophysical Properties of Building Components

External walls and building components are usually characterized by their overall heat transfer coefficient, their total solar heat gain factor and their heat capacity. The thermophysical properties of small homogeneous samples are measured in laboratories by standardized procedures. For large samples with inhomogeneous structures, outdoor test facilities have several advantages: Tests can be performed on components of original size under real weather conditions. Solar simulators in the laboratory reproduce the spectrum of solar radiation only to a certain extent, but never identically.

In contrast to laboratory tests, outdoor tests are performed under non-stationary boundary conditions. The heat balance must include all heat flows through the test cell envelope as well as heat storage within the walls. The heat flows to be measured include the heating and cooling power as well as the heat flow by heat conduction through the test cell envelope. By means of parameter identification, a numerical method for estimation of parameters, the mathematical model of the test component is adapted to the measurement data. This way the thermophysical global parameters, i.e. the overall heat transfer coefficient U , the solar gain factor g and the thermal capacity C can be derived.

A survey of different heat flow measurement concepts is given, focussed on their application for outdoor test cells. Two of these concepts, the Pseudo Adiabatic Shell (PAS) and Heat Flux Sensitive tiles (HFS), are investigated theoretically and experimentally.

A new technique of large-area heat flow measurement and respective sensors were developed by the author, manufactured and optimized for application to outdoor test cells. The construction differs from conventional heat flow sensors in its arrangement of the thermopiles. The thermopiles are mounted in a plane perpendicular to the direction of heat flow. Aluminium cylinders are implanted into the plates, thus causing a distortion of the isotherms. With a perpendicular heat flow through the plate, temperature differences will be measured by the thermopiles. These temperature differences are proportional to the heat flow through the sensor. This type of sensor design provides a simplification in the manufacture of Large Area Heat flux sensors (LAH). With this new type of sensor it is possible to measure the mean heat flow through the test cell envelope even in the case of an inhomogeneous heat flow distribution. In order to measure the mean inner surface temperature of the test room, a nickel resistance wire is fixed to the inner surface of the LAH board, covered by aluminium plates.

The thermopiles were manufactured by means of galvanoplastics. The galvanoplastic facility was designed and constructed especially for this purpose. Three different prototypes of LAH boards were designed, constructed and tested in order to optimize the manufacturing process as well as the performance of the LAH boards.

The design procedure was simplified by numerical simulations of steady state heat conduction in different prototype geometries. By introduction of a modified form coefficient, the performances of different LAH-prototype designs were compared almost independently of the thermal conductivity of the materials used. The modified form coefficient describes the influence of the geometry of LAH design on the sensitivity of the sensor.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	1
ABSTRACT	2
INHALTSVERZEICHNIS	3
FORMELZEICHEN	6
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	9
1.1 Meßgrößen und prinzipieller Aufbau von Außentestständen	10
1.2 Ziele	12
2 LITERATURÜBERBLICK	13
2.1 Außenteststände	13
2.2 Testverfahren	14
2.2.1 Konzepte der Wärmestrommessung für Außenteststände	15
2.2.2 Grundlagen der Wärmestrommessung	16
3 TESTZELLEN	20
3.1 Aufbau der Testzellen	20
3.1.1 Die Standard-PASSYS-Testzelle	20
3.1.2 Testraum	20
3.1.3 Serviceraum	21
3.1.4 Heiz- und Kühlsystem	21
3.2 Testwände	25
3.2.1 Kalibrierwand	25
3.2.2 Referenzwand	26
3.2.3 Überblick über weitere Testwände	27
3.3 Meßeinrichtungen des Teststandes	27
3.3.1 Wetterstation.....	28
3.3.2 Tracergasmessung im Testraum	29
3.3.3 Messung der Heiz- und Kühlleistung	29
3.3.4 Temperatursensoren.....	30
3.3.4.1 Lufttemperatursensoren im Test- und Serviceraum	31
3.3.4.2 Oberflächentemperaturen im Testraum der konventionellen PASSYS-Testzelle....	31
3.3.4.3 Oberflächentemperatursensoren im Testraum mit PAS (Pseudo-Adiabatic Shell)..	32
3.3.4.4 Oberflächentemperatursensoren im Testraum mit LAH (Large Area Heat Flux Sensor).....	32
3.3.5 Abschattungswagen	33
3.3.6 Coldbox	34
3.3.7 Wärmestrommessung	35

4 WÄRMESTROMMESSUNG AN TESTZELLEN	35
4.1 Testzelle mit Schutzheizung (PAS)	36
4.1.1 Aufbau und Funktionsweise.....	36
4.1.2 Anordnung der Thermoelemente und Thermoelementketten.....	37
4.2 Testzelle mit HFS (Heat Flux Sensitive Tiles)	39
4.2.1 Aufbau und Funktionsweise.....	40
4.2.2 Anordnung der Thermoelementketten.....	41
4.3 Testzelle mit großflächigen Wärmestrommeßplatten (LAH)	42
4.3.1 Aufbau und Funktionsweise.....	42
4.3.2 Anordnung der Wärmestrommeßplatten an Wänden, Decke und Boden.....	45
4.3.3 Herstellung und Kalibrierung der LAH-Platten.....	48
4.3.3.1 Herstellung der LAH-Platten.....	48
4.3.3.2 Kalibrierung der LAH-Platten.....	49
4.3.4 Berechnung der Sensorempfindlichkeit von LAH-Platten.....	57
4.3.4.1 Theoretische Grundlagen zu plattierten Thermoelementen.....	57
4.3.4.2 Simulationsrechnungen zur dreidimensionalen stationären Wärmeleitung in LAH-Platten.....	61
4.3.4.3 Vergleich der berechneten und gemessenen Sensorempfindlichkeit der LAH-Platten.....	71
5 BETRIEBSPARAMETER UND GLOBALE PARAMETER	76
5.1 Definition der Betriebsparameter	76
5.1.1 Der Wärmedurchgangskoeffizient k	76
5.1.2 Der Strahlungstransmissionsgrad τ_e^*	77
5.1.3 Der Strahlungsabsorptionsgrad α_e^*	77
5.1.4 Der Strahlungsreflexionsgrad ρ_e^*	77
5.1.5 Der Gesamtenergiedurchlaßgrad g	78
5.1.6 Die flächenbezogene Wärmekapazität c_f	80
5.2 Globale Parameter	80
5.2.1 Wärmeübertragungsvermögen (kA) bzw. thermischer Leitwert L	80
5.2.2 Solarapertur (gA).....	81
5.2.3 Effektive Wärmekapazität C_{eff}	82
6 PARAMETERIDENTIFIKATION	82
6.1 Grundprinzip	83
6.2 Methoden der Parameteridentifikation	83
6.3 Klassifizierung der Außenwandbauteile	89
6.3.1 Einschichtige, opake Wand.....	89
6.3.2 Transparente Außenwandbauteile.....	89
6.3.3 Mehrschichtige, opake Wand.....	90
6.3.4 Opake Wand mit transparenter Wärmedämmung.....	91
6.3.5 Reale Wand.....	91
6.4 Elektroanalogie-Modell von Testraum und Testkomponente	92
6.5 Das Beuken-Modell	92

6.6 R-C-Modell der Testzelle.....	93
6.6.1 R-C-Modell der Standard-PASSYS-Testzelle.....	96
6.6.2 R-C-Modell der PAS-Testzelle	99
6.6.3 R-C-Modell der Testzelle mit HFS bzw. LAH.....	100
6.7 R-C-Modell der Testkomponente.....	101
7 KALIBRIERUNG DER TESTZELLE	103
7.1 Kalibrierprozedur.....	103
7.2 Durchführung der Kalibriermessung mit PAS-Testzelle.....	105
7.3 Meßergebnisse	107
7.4 Ergebnisse der Parameteridentifikation.....	110
7.5 Kalibrierung und Ergebnisse einer Standard-PASSYS-Testzelle.....	114
8 MESSUNGEN AN TESTWÄNDEN UND ERGEBNISSE	115
8.1 Testprozedur	115
8.2 Durchführung des Komponententests	115
8.2.1 Test einer Schalungsbetonsteinwand mit Fenster.....	116
8.2.2 Test der Referenzwand	119
8.2.3 Überblick über Ergebnisse von Messungen des ITW.....	119
9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	123
10 LITERATURVERZEICHNIS	125
11 ANHANG	135