



Ny metod för mätning av värmeförlust från byggnader



Ny metod för mätning av värmeförlust från byggnader

Thomas Olofsson, Umeå Universitet

Anders Ohlsson, Umeå universitet



Energimyndighetens projektnummer: 39699-01

E2B2



Förord

E2B2 Forskning och innovation för energieffektivt byggande och boende är ett program där akademi och näringsliv samverkar för att utveckla ny kunskap, teknik, produkter och tjänster.

I Sverige står bebyggelsen för cirka 35 procent av energianvändningen och det är en samhällsutmaning att åstadkomma verklig energieffektivisering så att vi ska kunna nå våra nationella mål inom klimat och miljö. I E2B2 bidrar vi till energieffektivisering inom byggande och boende på flera sätt. Vi säkerställer långsiktig kompetensförsörjning i form av kunniga människor. Vi bygger ny kunskap i form av nyskapande forskningsprojekt. Vi utvecklar teknik, produkter och tjänster och vi visar att de fungerar i verkligheten.

I programmet samverkar över 200 byggtreprenörer, fastighetsbolag, materialleverantörer, installationsleverantörer, energiföretag, teknikkonsulter, arkitekter etcetera med akademi, institut och andra experter. Tillsammans skapar vi nytta av den kunskap som tas fram i programmet.

Ny metod för mätning av värmeförlust från byggnader är ett av projekten som har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten. Det har letts av *Institutionen för tillämpad fysik och elektronik, Umeå universitet*, och har genomförts i samverkan med *AB Bostaden i Umeå, Sveriges byggindustrier och Sweco*.

Projektet ska bidra till att utveckla en ny metod för att mäta värmeflödet från byggnaders ytterhölje. Idag används ofta teoretiskt beräknade värden som inte alltid stämmer överens med verkligheten. Den nya metoden ska med hjälp av värmekamera skapa bilddata som översätts till mer exakta mätvärden och som kan tillämpas för en hel fasad eller byggnad. Att kunna mäta energiprestandan för en byggnads klimatskal skulle innebära en betydande kvalitetsförbättring och bidra till energieffektiviseringsåtgärder.

Stockholm, 22 december 2017

Anne Grete Hestnes,

Ordförande i E2B2

Professor vid Tekniskt-Naturvetenskapliga Universitetet i Trondheim, Norge

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att E2B2 har tagit ställning till innehållet.



Sammanfattning

Vårt samhälle använder stora mängder energi för uppvärmning och kylning av byggnader med syfte att reglera inomhustemperaturen. Sveriges byggnadsbestånd använder årligen uppskattningsvis ca 64 TWh enbart för uppvärmning. Åtgärder för energibesparing i en byggnad grundar sig ofta på energisimulering med hjälp av datormodeller. Energisimuleringen kan ske i designfasen, innan huset är byggt, eller vid planering av renoveringsåtgärder. Det stora problemet är att energisimulering av byggnader i många fall har visat sig kraftigt underskatta den verkliga energianvändningen. Den uppmätta energianvändningen kan vara ända upp till 100% större än det beräknade värdet. Här finns alltså en stor potential för besparingar av resurser som kan utnyttjas om man kan göra energimodellerna mer träffsäkra.

För att en modell för energisimulering av byggnader skall bli träffsäker måste modellen valideras. Detta innebär att beräkningsresultat från modellen jämförs mot mätvärden för byggnaden och för det lokala väder som råder på platsen för byggnaden. För validering av energimodeller för byggnader behövs alltså mätdata för bland annat temperaturer och isolationsförmåga för byggnadens väggar och tak, omgivningens temperatur, solljus och luftströmning runt byggnaden.

Projektet "Ny metod för mätning av värmeförlust från byggnader" syftar till att på längre sikt kunna använda värmekamera för mätning av värmeflöde och andra mätstorheter som har med värmetransport att göra. Normalt används värmekameran för att ge 2D bilder av temperaturen på ytan av till exempel en husvägg.

Det viktigaste resultatet från projektet är att vi visat hur en så kallad solair-termometer (SAT) kan användas för mätning av värmeflödet från en yta, t.ex. en vägg, till byggnadens omgivning. SAT är en genialt enkel konstruktion då den i princip endast består av en metallplatta placerad på ett isolerande underlag. Då en SAT placeras på byggnadens yttervägg kommer den att utbyta energi med den omgivning som väggen är riktad mot. Vid energijämvikt har SAT samma temperatur som omgivningen. I projektet utvecklar vi metodik för att med SAT mäta det så kallade värmeövergångstalet (heat transfer coefficient) för värmetransport från byggnadens yta till dess omgivning. Temperaturen för SAT kan avläsas med användande av värmekameran, som också ger en bild av husväggens yttemperaturer. Med dessa temperaturdata inlästa av värmekameran kan slutligen värmeflödet beräknas.

Projektet har öppnat upp för en metodutveckling där SAT används i kombination med värmekameran (termografi) för att i slutändan mäta värmeflöde, omgivningstemperatur, och därigenom väggens värmegenomsläpplighet (U-värde). Vi anger också ett antal krav som bör ställas på mätsystemet vid en sådan fortsatt metodutveckling. För framtiden ser vi flera möjliga utvecklingsscenarier för SAT-metodiken: (1) Applikationer inom termografi för mätning av värmeflöde. (2) Validering av datormodeller för luftströmningsberäkningar, s.k. Computational Fluid Dynamics (CFD). (3) Förbättrad teknik för styrning och reglering av byggnaders värmesystem baserat på användning av klimatdata från SAT-mätningar.

Nyckelord: Solair-termometer; Termografi; U-värde; Värmeflöde; Värmeöverföringstal; Solair-temperatur.



Summary

Our society uses large amounts of energy for heating and cooling of buildings with the purpose to control the indoor temperature. For example, about 64 TWh is used annually for space heating of the Swedish building stock. Energy saving measures are usually based on simulations using building energy models. Energy simulation could be performed at the design phase, before construction of the building, or when planning renovation measures. However, it has been shown that energy simulations in many cases grossly underestimate the true energy usage. This is a serious problem since the measured energy usage could be up to 100 % larger than values predicted from energy simulations. This energy performance gap could also be regarded as a great potential for saving resources, provided that the accuracy of the energy models is improved.

Accurate models for building energy simulations require that models are validated. This means that simulation results must be compared to measurement results for the building and its on-site local weather. For validation of building energy models, there is therefore a need to measure, for example, the temperatures and insulation properties of building walls and roofs, surroundings temperature, solar radiation and air flows around the building.

The long-term aim of the project “New method for measurement of heat loss from buildings” is to enable the use of infrared thermal camera for measurement of the heat flux and other quantities relevant to heat transfer. Normally, the thermal camera is used to provide 2D-images of the surface temperature of a building wall.

The most important project outcome is that we have shown how the so-called solair-thermometer (SAT) could be used in the measurement of the heat flux from a surface, for example from a building wall to the surrounding. The SAT is a smart but simple construction that in principle consists of a metal plate insulated at its rear side. When placed onto the building exterior wall, the SAT exchanges energy with the environment seen by the wall. At energy equilibrium, the SAT temperature equals the environmental temperature. In the project, we develop a method where the SAT is used for measurement of the so-called heat transfer coefficient, which describes the heat transfer between the building surface and its environment. The temperature of the SAT could be recorded by using the thermal camera, which also provides an image of the building wall surface temperatures. Eventually, with these temperatures measured by the camera, the heat flux from the surface could be estimated.

The project has opened up for further method development, where the SAT and the thermal camera (thermography) are used in combination for the measurement of heat flux, environmental temperature, and the wall heat transmittance (U-value). We also specify some of the requirements that should be considered in further development of the SAT methodology. There are several possible application scenarios for the future: (1) Thermography applications for measurement of heat flux. (2) Validation of Computational Fluid Dynamics (CFD) models for airflow calculations. (3) Improved techniques for control of heating systems of buildings, based on climate data measured by SAT systems.

Keywords: Solair thermometer; Thermography; U-value; Heat flux; Heat transfer coefficient; Solair temperature.



INNEHÅLL

1	INLEDNING OCH BAKGRUND	7
2	GENOMFÖRANDE	9
3	RESULTAT	13
3.1	DELMÅL 1: UTFORMA EN MÄTMETOD FÖR FÄLTMÄTNING AV KONVEKTIONSKOEFFICIENTEN (CHTC).	13
3.2	DELMÅL 2: DEMONSTRERA FÄLTMÄTNING AV VÄRMEFLÖDET I EN PUNKT PÅ EN BYGGNADS YTTRE YTA.	13
3.3	DELMÅL 3: TA FRAM ETT UTKAST TILL KRAV SPECIFIKATION FÖR METODEN SOM GRUND FÖR DESS VIDARE UTVECKLING:	14
4	DISKUSSION	15
5	PUBLIKATIONSLISTA	16
6	REFERENSER	17



1 Inledning och bakgrund

Vintertid sker det värmeförluster från en byggnad genom att värme leds genom väggar och tak till byggnadens omgivning. Sommartid är det ibland tvärtom så att värme från solinstrålning leds in i byggnaden. Vanligen värmer man därför byggnaden vintertid och detta sker ofta genom tillförsel av köpt energi utifrån. Sommartid kan kylning bli aktuell vilket också ofta innebär användande av köpt energi. För att spara energi är det därför av vikt att kostnadseffektivt minska transport av värme genom byggnadens väggar och tak. En förutsättning för effektiva åtgärder att minska värmeförlusten är att värmeförlustens storlek kan fastställas. Idag beräknas vanligen värmeförlusten genom energisimulering med hjälp av datormodeller av byggnaden. Problemet är att dessa datorberäkningar ger problematiskt stora avvikelser i förhållande till verkligheten. Lösningen på detta problem är att justera datormodellen så att beräkningsresultaten stämmer överens med mätdata, det vill säga att modellen ändras så att den stämmer med verkligheten. Man säger att modellen valideras och detta skall ske innan den används för beräkningar på byggnadskonstruktioner.

En förutsättning för validering av energimodeller för en byggnad är därför att relevanta mätdata finns tillgängliga. Vad är det då för mätningar som behövs? Värmeegenomsläppligheten U (U -värdet) för ett byggnadselement, t.ex. en vägg, definieras som kvoten mellan värmeflödet q och differensen mellan temperaturerna för elementets inre och yttre omgivning (se ISO 9869-1, ref. [1]):

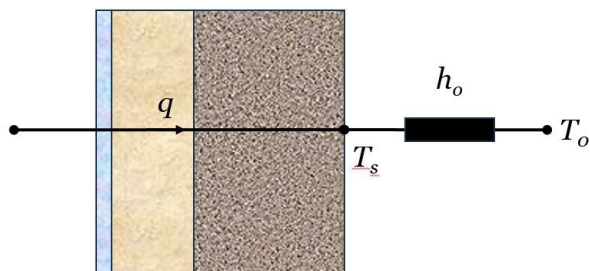
$$U = \frac{q}{(T_i - T_e)} \quad (1)$$

Mätning av värmeflödet q och omgivningstemperaturerna T_i och T_e ger därför mätdata som kan användas för validering av energimodeller för byggnader. I dagsläget mäts q vanligen med en sensor (heat flux meter; ref [1]) som placeras på väggens yta och ger ett värde på värmeflödet i just den punkt där sensorn är placerad. Lufttemperaturen används vanligen som en uppskattning av omgivningstemperaturen. Denna uppskattning innehåller emellertid ett fel eftersom infraröd värmestrålning och solstrålning inte finns medräknad.

Sedan ett antal år tillbaka pågår internationellt en metodutveckling som syftar till att använda termografi för att i slutändan mäta U -värdet för ett byggnadselement. Termografi innebär att en värmekamera används för att avbilda den infraröda strålningen som kommer från t.ex. en väggyta. Värmekameran ger då en bild av väggytans temperatur T_s , inte bara i en punkt utan i alla punkter över den avbildade väggen. Idén är nu att använda värmekameran också för att mäta värmeflödet q . Denna idé bygger på att q också kan bestämmas som produkten av en konstant h_o (heat transfer coefficient) och skillnaden i temperatur mellan yta och omgivning:

$$q = h_o(T_s - T_o) \quad (2)$$

T_o betecknar endera inre eller yttre omgivningstemperaturen, men med solstrålningen inkluderad. T_o kallas sol-air temperaturen. Schematisk beskrivning återges i figur 1.



Figur 1. Schematisk beskrivning värmeflödet mellan yta och omgivning

I nuläget är ekvation 2 och dess användning för att mäta värmeflödet inte en etablerad praxis. Faktum är att andra forskargrupper använder andra samband och antaganden för att ta steget från mätning av ytemperaturen T_s med värmekameran till en uppskattning av värmeflödet q .

I projektet "Ny metod för mätning av värmeförlust från byggnader" avser vi på att använda ekvation 2 fullt ut. Vi använder en så kallad Sol-Air Termometer (SAT) för att mäta både T_o och h_o . Värmekameran kan sedan användas för mätning av ytemperaturen T_s över en hel väggyta, men också för att avläsa SAT-sensors temperatur. Denna utveckling av metodiken, där ekvation 2 och SAT används, förutsågs inte av oss då projektet planerades för över tre år sedan. Det är något som vi kommit på spåren under projektets gång och sedan styrt projektet mot eftersom vi såg den största potentialen för att framgångsrikt lyckas med en metodutveckling för mätning av värmeförlust från byggnader.

Projektperioden har omfattat tre år, från 2015 till och med 2017. Projektledare för projektet har varit Thomas Olofsson, professor vid Institutionen för tillämpad fysik och elektronik, Umeå universitet. Genomförandet har till betydande del gjorts av Anders Ohlsson, docent och förste forskningsingenjör, i nära samarbete med universitetslektorerna Ronny Östin och Staffan Grundberg, alla vid institutionen för tillämpad fysik och elektronik, Umeå universitet. Projektet har varit möjligt att genomföra genom den generösa ekonomiska satsningen från AB Bostaden till Institutionen för tillämpad fysik och elektronik, samt med hjälp av det aktiva deltagandet från Royne Söderström Hållbarhetsstrateg vid AB Bostaden. Betydelsefulla samarbetspartner i kommunikationen med bransch och avnämare har varit Christer Johansson, företagsrådgivare vid Sveriges Byggindustrier, Umeå, samt Anna Joelsson, gruppchef installation Sweco, Umeå.

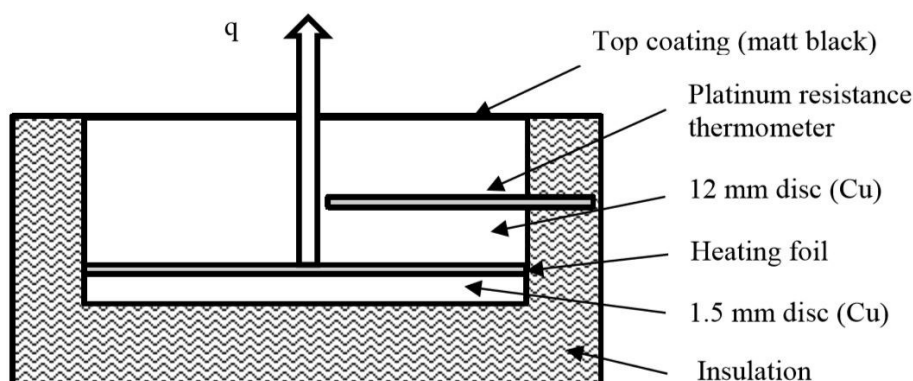


2 Genomförande

I en förstudie från 2014 använde vi värmekamera för att mäta värmeflödet ut från ett väggelement på i stort samma sätt som andra forskargrupper gjorde vid den tidpunkten (ref. [2]). Detta innebar att vi gjorde separata mätningar av lufttemperaturen och den infraröda strålningstemperaturen. Vi använde också tidigare framtagna experimentella samband mellan vindhastigheten vid väggytan och den konvektiva delen av h_o (convective heat transfer coefficient; betecknad CHTC eller h_c). Det nya som förstudien tillförde var i huvudsak en analys av mätfeLEN. Vi drog slutsatsen att det största bidraget till mätosäkerheten i värmeflödet orsakades av osäkerheten i värdena för CHTC. Istället för att förlita sig på tidigare framtagna generella samband för CHTC och vindstyrka så borde direkt mätning på den aktuella byggnaden ge mer tillförlitliga värden.

När vi därefter planerade det här aktuella E2B2-projektet "Ny metod för mätning av värmeförlust från byggnader" så blev vårt första delmål att utforma en bra mätmetod för fältmätning av CHTC. Vi utgick från ett antal existerande metoder som använts för mätning av CHTC utomhus på fasader av byggnader. Vi ville finna den mätmetod som gav det noggrannaste mätresultatet. Vi genomförde två studier under detta delmål, som bägge har publicerats i internationella vetenskapliga tidskrifter [3, 4]. I den första genomförde vi en felanalys av två metoder, utformade av forskargrupperna representerade av förstaförfattarna Ito respektive Loveday [3]. Tidigare ansågs Lovedays metod vara överlägsen, men vi visade att Itos metod kunde prestera lika bra eller ge bättre resultat, förutsatt att mätproceduren modifierades något. I det andra arbetet gjorde vi en dynamisk modell av den sensor som både Ito och Loveday använde, den så kallade "heated gradient sensor" (HGS) [4]. Då man mäter i en utomhusmiljö så utsätts sensorn för variationer i omgivningen som påverkar värmetransporten. Exempelvis så varierar vindstyrkan med olika frekvenser från kortvariga vindbyar till långsammare variationer då ett lågtryck drar förbi. Strålning från himlen, både infraröd värmestrålning och solstrålning, varierar såklart över dygnet men också då molntäcket växlar i sin täckning av himlen. Ofta vill man att sensorn skall svara på en del av denna variation men kanske vara immun mot de allra snabbaste variationerna. I vilket fall så är det av intresse att förstå HGS-sensorns dynamik och vilka faktorer i dess konstruktion som påverkar sensorns snabbhet eller tidskonstant. Vi utformade därför en dynamisk modell av HGS-sensorn och dess termiska omgivning, beräknade tidskonstanten och validerade modellen genom att också mäta tidskonstanten experimentellt.

Det var vid arbetet med den dynamiska modellen av HGS-sensorn som vi insåg att sensorns termiska omgivning förenklat kunde representeras av sol-air-temperaturen T_o och heat transfer coefficient h_o . Detta var ett resultat som publicerats flera decennier tillbaka men som inte tycktes vara välkänt för en bredare krets, inte ens inom byggnadsfysiken. Vi kände också till ekvation 2 som innebär att värmeflödet q kan beräknas baserat på mätning av storheterna T_o , h_o och T_s . Vi återupptäckte även den så kallade sol-air-termometern (SAT) som beskrevs redan på 1940-talet men som senare nästan inte alls förekommer i den vetenskapliga litteraturen. Med en SAT mäter man T_o . En SAT består i princip av en metallplatta placerad nedsänkt i ett värmeisolerande underlag. En schematisk beskrivning av SAT sensorn ges i figur 2.

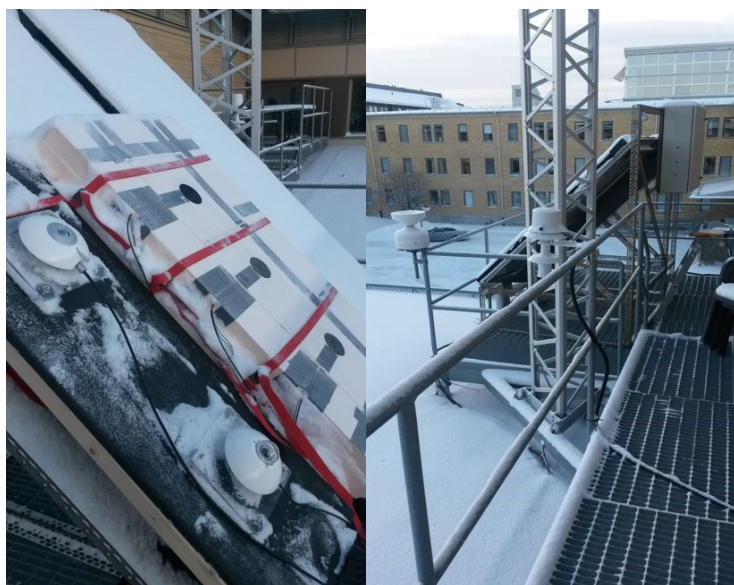


Figur 2. Schematisk beskrivning av en så kallad sol-air-termometern (SAT)

Plattans framsida är svartmålad för att absorbera solstrålning och också för att få en bestämd emissivitet (förmåga att utsända infraröd strålning). SAT utbyter värme med den omgivning som plattans framsida riktar sig mot, dess "synfält". Under förutsättning att SAT-plattan har nått jämvikt i sitt utbyte av värme med omgivningen så är plattans temperatur lika med omgivningens temperatur, det vill säga sol-air-temperaturen T_o . Hit hade vi kommit ungefär sommaren 2016. Då hade vi insett potentialen med att använda SAT inom vårt projekt "Ny metod för mätning av värmeförlust från byggnader".

Under vintermånaderna december 2016 till januari 2017 genomförde vi utomhusmätningar med tre SAT-sensorer placerade i närheten av varandra och riktade mot samma håll (samma "synfält"). Den experimentella uppställningen åskådliggörs i figur 3. Två studier genomfördes parallellt: Den ena studien avsåg att mäta omgivningstemperaturen T_{env} (= sol-air-temperaturen under mörkerförhållanden) och CHTC [5] den andra avsåg att mäta Heat transfer coefficient h_o [6].

Den första utomhusstudien inriktades på att demonstrera att direkt mätning av omgivningstemperaturen T_{env} är fullt möjlig [5]. I standarden ISO 9869-1, för mätning av U-värdet, påstås det uttryckligen att T_{env} "cannot be measured directly" (§ A.3.1, ref. [1]). Vi ville visa att detta påstående är falskt. Vi mätte därför T_{env} direkt genom att använda en enda SAT-sensor. För att validera denna mätning gjorde vi samtidigt mätningar av flera storheter som tillsammans kan användas för att räkna fram ett värde för T_{env} (en traditionell procedur). Dessa storheter var lufttemperatur, infraröd strålningstemperatur (med pyrgeometer), CHTC (med hjälp av två SAT-sensorer varav en värmdes med känd elektrisk effekt), samt ett tidigare uppmätt värde för emissiviteten för SAT-ytans svarta färg. Överensstämmelsen mellan direkt och indirekt mätning av T_{env} var god.



Figur 3. Experimentell uppställning för utomhusmätningar

Den andra utomhusstudien visade hur två SAT-sensorer kan användas för att mäta h_o (heat transfer coefficient) [6]. Metoden är en modifikation av Itos metod för mätning av CHTC (se ref. [3, 7]). En av SAT-sensorerna värms elektriskt med en känd (uppmätt) effekt, medan den andra SAT-sensorn förblev ouppvärmad. I studien valideras mätmetoden genom samtidig mätning av CHTC och "infraröd radiative heat transfer coefficient h_r ", vilkas summa skall vara lika med h_o . Överensstämmelsen var god mellan de två sätten att mäta h_o .

I en laboriestedie har vi utvecklat SAT-metodiken ytterligare. Denna studie är under peer-review granskning i tidskriften Journal of Building Physics och kan därför inte redovisas här i detalj. Vi kan emellertid avslöja att vi visar hur en enda SAT kan användas för att mäta både T_o och h_o . Vid validering av metoden jämförde vi (i) resultat för h_o med motsvarande h_o -resultat från den modifierade Itos metod enligt [6], och (ii) framräknat värmefflöde q enligt ekvation 2 med tillförd känd elektrisk effekt. Överensstämmelsen var god i båda fallen.

Under vårterminen 2017 genomfördes ett examensarbete av Erik Westergren där syftet var att mäta värmefflöde enligt en regressionsmetod som liknar ekvation 2. Två HGS-sensorer användes istället för SAT i denna studie. Termografering med värmekamera användes för mätning av alla temperaturer och mätningarna gjordes utomhus. Arbetet är genomfört men publiceringen är fördröjd med anledning av att en patentansökan är inlämnad.

Anders Ohlsson har varit ansvarig för planering, genomförande och rapportering av den experimentella delen. Thomas Olofsson har i egenskap av projektledare varit ansvarig för samordning, av arbetet, rapportering, kommunikationen av resultaten samt samordning av företagsdeltagandet.



Projektet har kommunicerats och diskuterats i flera seminarier och konferenser: Ett urval av konferenser återges i tabell 1.

Tabell 1. Konferenser och seminarier där projektet redovisats

2015	Årets Energi-Kick 2015, Umeå Klimatforum 2015, Umeå Energieffektivt Byggande, Borlänge Rådslag om hållbar stadsutveckling, Umeå MountEE- Spridningskonferens, Umeå Hållbart byggande och Förvaltande, Kommunföretagen Borlänge kommun, Tällberg Umeå as a Test Bed for Smart Sustainable City Development, France – Sweden Sustainable Cities Workshop, Paris, France Forskningsutbytesdialoger som genomförts vid Hongkong City University, Hunan University, Ningbo Nottingham University, Tianjin University, Beijing University of Science and Technology, China
2016	Platsen, Umeå Mätning av värmeförlusttal från byggnader, IVA Avdelning 1: Maskinteknikkonferens i Umeå
2017	Research presentation for University of Rwanda, Umeå, Sweden Umeå universitets vetenskapliga lunchseminarium Rådslag om hållbar stadsutveckling, Umeå Energimyndigheten, forskningsseminarium, Eskilstuna 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, Trondheim, Norway

En viktig del av genomförandet av projektet har varit den nära dialog och deltagande av det allmännyttiga fastighetsbolaget AB Bostaden i Umeå. För projektet betydelsefullt deltagande har Royne Söderström, hållbarhetsstrateg vid AB Bostaden, bidragit med. Därtill har avrapportering och diskussion kontinuerligt genomförts med Berndt Elstig, Fastighetschef samt AB Bostadens förre VD Ann-Sofi Tapani och nuvarande VD Jerker Eriksson.



3 Resultat

Resultat och slutsatser i projektet beskrivs nedan i anslutning till projektets delmål. Vi har arbetat med två typer av sensorer: (1) med den traditionella HGS (heated gradient sensor; med inbyggd värmeflödesmätare; används i Ito's metod), och (2) med sol-air-termometern (SAT). I ansökan specificerades tre delmål. Nedan redovisas mer specifikt hur dessa uppnåtts.

3.1 Delmål 1: Utforma en mätmetod för fältmätning av konvektionskoefficienten (CHTC).

Vi har här förbättrat den redan etablerade metodiken utvecklad av Ito [7] för mätning av CHTC med användande av HGS-sensorn [3]. Genom analys av mätosäkerheten kunde vi ändra på mätproceduren så att mätningen av CHTC får ett mindre mätfel.

Dynamisk modellering av HGS-sensorn visade vilka faktorer som styr sensorns tidskonstant, det vill säga hur snabbt den förmår följa variationer i mätstorheten [4]. Detta möjliggör anpassning av sensorns tidskonstant till den aktuella situationen där mätningen sker.

CHTC mättes även utomhus vintertid men i detta fall användes sol-air termometern (SAT) [5, 6]. Dessa två studier var primärt inriktade på att visa att SAT-sensorerna kan användas för att mäta både sol-air-temperaturen i mörker (T_{env}) och värmeöverföringskoefficienten (h_o). Vi visade att detta är möjligt.

3.2 Delmål 2: Demonstrera fältmätning av värmeflödet i en punkt på en byggnads yttre yta.

I ett examensarbete gjordes utomhusmätning av värmeflödet från en liten punktformad yta (ytan på en HGS; diameter 80 mm). För mätning av värmeflödet användes HGS-sensorer tillsammans med en regressionsmetod. Yttertemperaturerna på HGS-sensorerna mättes med användande av en värmekamera, det vill säga med termografi. Examensarbetet förväntas bli publicerat i början på år 2018. Examensarbetet har också resulterat i en patentansökan som är under färdigställande.

Vi har också genomfört framgångsrika försök att mäta värmeflöde med användande av en enda SAT-sensor. Försöken genomfördes i laboratorium och under en serie olika termiska förhållanden där vindstyrka och strålning varierades. Uppmätt värmeflöde visade god överensstämmelse med tillfört elektriskt energiflöde. Arbetet är under granskning i tidskriften Journal of Building Physics. Publicering sker troligen i början på 2018.



3.3 **Delmål 3: Ta fram ett utkast till kravspecifikation för metoden som grund för dess vidare utveckling:**

En specifikation av kraven som ställs på en mätmetod bestäms av syftet med mätningen. Om syftet är att mäta U-värdet för ett väggelement enligt ekvation 1 så listas först de storheter som måste mätas. Mätstorheterna är i detta fall:

- i. Inre och yttre omgivningstemperaturerna T_i och T_e . Dessa temperaturer kan direkt mätas med SAT-sensorer placerade på inre respektive yttre väggytan.
- ii. Värmeflödet q ut från väggytan. Eftersom värmeflödet varierar i tiden så måste en serie mätningar göras över en tidsperiod av några dygn. Tidskonstanten för en väggkonstruktion varierar vanligen mellan 10 och 50 tim. Mätssystemets tidskonstant bör anpassas till väggelementets tidskonstant. Värmeflödet kan också variera över väggytan och därför krävs att mätningen sker med en rumslig upplösning i storleksordningen 0.01 – 0.1 m.
- iii. Värmeöverföringskoefficienten h_o . Mätning av denna storhet är nödvändig för bestämning av värmeflödet med ekvation 2. Denna mätning kan göras med en enda SAT alternativt med två SAT-sensorer. Vad som ger bästa mätresultatet kan variera med förhållandena under mätningen och måste utredas närmare. SAT-sensorns tidskonstant kan anpassas för att ge optimala mätresultat.
- iv. Mätning av yttemperaturer. Värmekameran möjliggör beröringsfri mätning av en ytas temperatur. Värmekameran producerar också en 2D bild över temperaturen på en yta, så kallad termografi. Bildens rumsliga upplösning kan varieras genom kameraplacering eller val av kameraobjektiv. SAT-sensorernas temperatur kan också mätas med värmekameran genom avbildning av SAT-sensorns yta.

Med tillgång till mätdata på inre och yttre omgivningstemperaturerna T_i och T_e , värmeöverföringskoefficienten h_o och mätning av yttemperaturer så är det möjligt att beräkna värmeflödet q (W/m^2) från ytan på en byggnads klimatskal. Med detta uppnås målet med projektet, nämligen att möjliggöra mätning på plats av både värmeenergiförlusten (kWh) från byggnadens klimatskal, och dess värmegenomsläpplighet (U-värde).



4 Diskussion

Beräknad energianvändning genom energimodellering av byggnader har ofta visat sig vara lägre än den sedan faktiskt uppmätta energianvändningen. Detta så kallade "energy performance gap" är ofta av betydande storlek och kan i värsta fall vara större än 100 % [8, 9]. Detta gap utgör en potential för energieffektivisering och kan uttryckas i enheter av energi. Exempelvis använde Sveriges byggnadsbestånd 80.5 TWh per år för uppvärmning och varmvatten [10, 11]. Om man utgår från antagande att varmvattnets andel är 20% av denna värmeenergi så utgör uppvärmningen ca 64 TWh. Om man idag skulle göra en energiberäkning baserat på dagens modeller för hela detta byggnadsbestånd så skulle energianvändningen sannolikt underskattas med mellan 0 och 100%! Eftersom ingen vet i dagsläget var i detta intervall som den sanna avvikelsen ligger så är det rimligt att anta att gapet är 50% (medelvärde för en rektangulär sannolikhetsfördelning). Potentialen för denna energieffektivisering för hela Sveriges fastighetsbestånd är alltså i storleksordningen 32 TWh.

Om träffsäkerheten i modellberäkningar kan ökas så skulle åtgärderna för att spara energi bli mer kostnadseffektiva. Det finns många möjliga orsaker till gapet mellan beräknad och uppmätt energianvändning. En möjlig orsak som ofta betonas är att energimodellerna är dåligt validerade [8]. För validering av modeller behövs mätdata av god kvalitet och av rätt typ. Ofta förlitar man sig på mätning av enbart den till byggnaden tillförda energin. Väderdata hämtas ofta från regionala vädermodeller vilket kan innebära betydande avvikelser från det lokala vädret på platsen för byggnaden. I detta projekt användes en särskild metodik att i direkt anslutning till bygganden mäta termiska kriterier som påverkar byggnadens energianvändning.

Den utvecklade SAT-metodiken kan användas för mätning av värmeflödet q ut från fasaden på en byggnad och för mätning av storheter som karakteriserar byggnadens termiska omgivning (sol-air-temperaturen T_o och värmetransportkoefficienten h_o). Dessa mätdata kan i sin tur användas för validering av energimodeller för byggnader och för senare utvärdering av hur bra beräkningsresultat som kan fås ur modellen.

Med tillgång till förbättrade mätdata (q , T_o och h_o) så ser vi flera möjliga utvecklingsscenarier:

1. Möjlighet att utveckla applikationer inom termografi för mätning av värmeflöde från en yta
2. Validering av datormodeller för luftflödesberäkningar, s.k. Computational Fluid Dynamics (CFD). Med bättre CFD modeller så kan simulering av luftströmning bli mer tillförlitlig.
3. Förbättrad teknik för styrning och reglering av byggnaders värmesystem baserat på användning av den klimatdata som SAT-tekniken tillhandahåller.



5 Publikationslista

Vetenskapliga artiklar

Ohlsson A, Östin R. and Olofsson T, (2016), Accurate and robust measurement of the external convective heat transfer coefficient based on error analysis, *Energy and Buildings*, Vol 117, pp 83-90

Ohlsson, K.E.A, Östin R, Grundberg S and Olofsson, T, (2016) Dynamic model for measurement of convective heat transfer coefficient at external building surfaces, *Journal of Building Engineering*, Vol. 7, pp 239-245

Olofsson T, Ohlsson KAE and Östin R (2017) Measurement of the environmental temperature using the sol-air thermometer, *Energy Procedia*. 2017;132:357-62

Ohlsson A, Östin R. and Olofsson T, (2018), Sol-air thermometer measurement of heat transfer coefficient at building outdoor surfaces. *Cold Climate HVAC 2018 - The 9th International Cold Climate Conference*. Kiruna, Sweden: Springer; 2018. p. 036. (Accepted)

Examensarbeten

Westergren Erik, (to be published in 2018) Heat Flux Measurement using Infrared Thermography - The development and validation of a novel measurement method, Master Thesis in Energy Engineering, Umeå University, Sweden, Department of Applied Physics and Electronics.

Patentansökan

"Methods, computer programs and systems for determining heat flux of a surface", - patentansökan under färdigställande



6 Referenser

- [1] ISO. 9869-1. Thermal insulation - Building elements - *In-situ* measurement of thermal resistance and thermal transmittance; Part 1: Heat flow meter method. 1 ed. Switzerland: ISO; 2014.
- [2] Ohlsson KEA, Olofsson T. Quantitative infrared thermography imaging of the density of heat flow rate through a building element surface. *Appl Energy*. 2014;134:499-505.
- [3] Ohlsson KEA, Östin R, Olofsson T. Accurate and robust measurement of the external convective heat transfer coefficient based on error analysis. *Energy Build*. 2016;117:83-90.
- [4] Ohlsson KEA, Östin R, Grundberg S, Olofsson T. Dynamic model for measurement of convective heat transfer coefficient at external building surfaces. *Journal of Building Engineering*. 2016;7:239-45.
- [5] Olofsson T, Ohlsson KEA, Östin R. Measurement of the environmental temperature using the sol-air thermometer. *Energy Procedia*. 2017;132:357-62.
- [6] Ohlsson KEA, Östin R, Olofsson T. Sol-air thermometer measurement of heat transfer coefficient at building outdoor surfaces. *Cold Climate HVAC 2018 - The 9th International Cold Climate Conference*. Kiruna, Sweden: Springer; 2018. p. 036.
- [7] Ito N, Kimura K, Oka J. A field experiment study on the convective heat transfer coefficient on exterior surface of a building. *ASHRAE Transactions*. 1972;78:184-91.
- [8] Coakley D, Raftery P, Keane M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renew Sustain Energy Rev*. 2014;37:123-41.
- [9] De Wilde P. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation *Automation in Construction*. 2014;41:40-9.
- [10] Energimyndigheten. ES 2017: 6. Energistatistik för småhus, flerbostadshus och lokaler. 2016.
- [11] Energimyndigheten. ER 2012: 03. Vattenanvändning i hushåll, med schabloner och mätningar i fokus.



Runt 35 procent av all energi i Sverige används i bebyggelsen. I forskningsprogrammet E2B2 arbetar forskare och samhällsaktörer tillsammans för att ta fram kunskap och metoder för att effektivisera energianvändningen och utveckla byggandet och boendet i samhället. I den här rapporten kan du läsa om ett av projekten som ingår i programmet.

E2B2 genomförs i samverkan mellan IQ Samhällsbyggnad och Energimyndigheten åren 2013–2017. Läs mer på www.E2B2.se.

