

Henrik Tommerup

Energirenovering af typisk parcelhus
opført i perioden 1960-1980

Del 2: Målinger



Rapport
BYG·DTU R-166
2007
ISSN 1601-2917
ISBN 9788778772404

Forord

Denne rapport omhandler energi- og indeklimamålinger før og efter en gennemgribende energirenovering af et typisk parcelhus fra 1960/70'erne. Det konkrete udvalgte hus er et tidstypisk arkitekttegnet parcelhus i ét plan med loft til kip i halvdelen af huset. Huset er opført i 1972 og har et opvarmet etageareal på 155 m².

Rapporten inkluderer kun sparsomme målinger efter renoveringen, men de videreføres til at omfatte hele fyringssæsonen 2007/2008, som rapporteres separat medio 2008.

Rapporten er udarbejdet af BYG•DTU for Rockwool International A/S i forbindelse med projektet "Energy Project Retrofit". Der findes også en separat rapport vedrørende beregninger (BYG•DTU R-165).

Firmaet Isolink har foretaget undersøgelser af klimaskærmen lufttæthed (trykprøvning) og SBi og DTU har gennemført sporgas målinger af luftskiftet under normalt brug af huset.

Danmarks Tekniske Universitet, Kongens Lyngby, december 2007.

Indhold

FORORD	2
INDHOLD	3
KONKLUSION	4
KONKLUSION	4
RESUMÉ	5
SUMMARY	6
1 INDLEDNING	7
1.1 BAGGRUND	7
1.2 FORMÅL	7
2 ENERGIFORBRUG OG INDEKLIMA FØR ENERGIRENOVERINGEN	8
2.1 INDETEMPERATURER	8
2.2 LUFTSKIFTE OG – FUGTIGHED	9
2.3 ENERGIFORBRUG	10
2.4 ÅRLIGT BRUTTOENERGIFORBRUG TIL OPVARMNING	13
3 ENERGIFORBRUG OG INDEKLIMA EFTER ENERGIRENOVERINGEN	14
3.1 INDETEMPERATURER	14
3.2 LUFTSKIFTE OG – FUGTIGHED	15
3.3 ENERGIFORBRUG	17
3.4 VALIDERING AF BEREGNINGSMODEL	19
3.5 ÅRLIGT BRUTTOENERGIFORBRUG TIL OPVARMNING	22
4 REFERENCER	24
BILAG 1. MÅLEPROGRAM	25
BILAG 2. MÅLERESULTATER	28

Konklusion

Målinger af energiforbrug og indeklima i et typisk parcelhus fra 1960/70'erne, som er blevet energirenoveret gennemgribende, viser at man kan opnå store energibesparelser samtidigt med at indeklimaet forbedres. Dette er opnået uden at gå på kompromis med eksisterende arkitektoniske kvaliteter.

For det konkrete hus er der opnået en varmebesparelse på 65 %. Besparelsen er dog baseret på relativt sparsomme målinger efter renoeringen, men yderligere målinger og analyser vil blive foretaget og de rapporteres separat medio 2008. Potentialet for større energibesparelser i danske parcelhuse er således betydeligt, idet 45 % eller ca. 500.000 af alle 1,1 mio. danske parcelhuse er opført i 1960/70'erne.

Resumé

Rapporten præsenterer resultater og sammenligninger af energi- og indeklimamålinger før og efter en gennemgribende energirenovering af et typisk parcelhus fra 1960/70'erne.

Målingerne før energirenoveringen blev påbegyndt ultimo juni 2005. Da energirenoveringen blev forsinket (påbegyndt 1. september 2006), foreligger der målinger for en periode på over et år. Det er derfor valgt at rapportere ét års målinger, svarende til perioden 1. september 2005 til 31. august 2006 inkl., der således omfatter hele fyringssæsonen 2005/2006.

Energirenoveringen var færdiggjort ultimo december 2006, så målingerne efter energirenoveringen omfatter kun resultater for januar og februar måned 2007 (59 dage).

De målte energiforbrug til rumopvarmning før og efter energirenoveringen er blevet opskaleret til årligt energiforbrug samt konverteret til standardbetingelser vedrørende inde- og udeklima (20°C inde og standard vejrdata svarende til DRY). Med disse korrektioner fås et årligt bruttoenergiforbrug til opvarmning i før- og efter-situationen på hhv. 35 og 12 MWh. Der er antaget det samme varmtvandsforbrug både før og efter energirenoveringen samt at der ikke forekommer brugsvandscirkulation (hvilket beboerne af komfortmæssige årsager fik etableret som en del af energirenoveringen). Målingerne viser altså, at der kan opnås en energibesparelse på 23 MWh eller en reduktion på ca. 65 %.

Luftskiftet under normal anvendelse af huset er målt både før og efter energirenoveringen. I før situationen blev der ved to forskellige metoder (PFT og CO₂) målt luftskifter på 0,3-0,4 gange i timen. Efter energirenoveringen blev der foretaget en standard indregulering af det mekaniske ventilationsanlæg med varmegenvinding, hvor det samlede luftskifte (ekskl. infiltration) blev målt til 0,45 gange i timen. Efterfølgende PFT-målinger bekræftede omtrent dette luftskifte, idet der blev målt et lidt større luftskifte (inkl. infiltration) på 0,51 gange i timen. Klimaskærmens lufttæthed blev målt før og efter energirenoveringen ved en standard trykprøvning. Resultatet ved en referencetrykforskel på 50 Pa var et luftskifte før og efter energirenoveringen på hhv. 8,5 og 1,4 l/s/m², og der er således tale om en væsentlig forbedring af lufttætheden, der opfylder kravet til nye huse på 1,5 l/s/m².

Indetemperatur niveauet er målt til at være ca. 2°C højere efter energirenoveringen (21,9°C) end før energirenoveringen (20,1°C), hvilket er baseret på målinger på samme tid af året (januar og februar måned). Generelt varierer indetemperaturen mindre fra rum til rum efter renoveringen (21-24°C) end før renoveringen (17-22°C). Samlet set har målingerne vist at der er sket en betydelig forbedring af den termiske komfort i huset, men også at temperaturniveauet er noget højere efter energirenoveringen, hvilket resulterer i et forøget energiforbrug i forhold til en situation, hvor indetemperaturen var den samme som før energirenoveringen.

Den relative luftfugtighed ligger på et fornuftigt og generelt lavt efter energirenoveringen (35-40 %), som er lidt højere end før energirenoveringen (30-35 %). Umiddelbart burde man forvente en reduktion i fugtigheden pga. det højere indetemperaturniveau og et lidt større luftskifte. Man skal dog passe på at sammenligne de to situationer på det eksisterende datagrundlag, idet de udvendige og indvendige fugtforhold har været forskellige.

Summary

The report presents results and compares energy and indoor climate measurements before and after an extensive energy renovation of a typical Danish single-family house from the 1960/70s. The measurements before the renovation started at the end of June 2005. As the renovation was held up (started September 2006) measurements for a whole year before the renovation is available, i.e. September 2005 – August 2006. The renovation was completed December 2006 and the measurements therefore only include the period from January and February 2007.

The measured energy consumptions for room heating before and after the renovation have been scaled up to yearly energy consumptions and converted to standard conditions regarding indoor and outdoor climate, i.e. 20°C indoor temperature and standard weather data corresponding to Danish Design Reference Year (DRY). Implementing these corrections, the yearly gross energy consumption for heating before and after are 35 MWh and 12 MWh respectively. Accordingly, the energy savings amount to a whole 23 MWh or a 65 % reduction.

The air change rates were measured both before and after the renovation and using both PFT and CO₂ methods. In the before-situation air change rates of 0.3 to 0.4 h⁻¹ were measured. After the renovation a standard adjustment of the air flows in the mechanical ventilation system was carried out showing 0.45 h⁻¹. Subsequently, the PFT method nearly confirmed the air change rate (0.51 h⁻¹) when considering the increase by the air infiltration. The air tightness measured using the “blower door test” resulted in air change rates before and after the renovation of 8.5 and 1.4 l/s/m² respectively. This constitutes a great improvement in the air tightness to a level of the requirement for new houses in the building regulations (1.5 l/s/m²).

The measured indoor temperature level was approximately 2°C higher after the renovation (21.9°C compared to 20.1°C), which is based on measurements in the same time of the year (month of January and February). Generally, the energy renovation has greatly improved the thermal comfort but the higher temperature has its drawbacks as it results in higher energy consumption compared to a situation where the temperature was the same as before the renovation.

The relative humidity level is reasonable and generally a little higher after the renovation (35-40 %) compared to before the renovation (30-35 %). One should expect a reduction because of the higher temperature level and a little higher air flow rate. However, comparing the two situations on the basis of the existing data is problematic as the inner and outer moisture conditions have been different.

1 Indledning

1.1 Baggrund

I 2006 blev der indført nye skærpede energikrav til både nye og eksisterende bygninger, inkl. en klassifikationsordning for lavenergibygninger. Disse krav er baseret på EU-direktiv om bygningers energimæssige ydeevne (EPBD 2002/91/EC). Generelt set er konsekvensen af de nye energibestemmelser at eksisterende bygninger skal bringes på energimæssigt niveau med nye bygninger i forbindelse med større renoveringer eller tilbygninger. Der er i den forbindelse et stort behov for at vise hvordan dette kan gøres og hvilke arkitektoniske, konstruktive, energimæssige og økonomiske konsekvenser det har. Det er især i parcelhuse fra 60'erne og 70'erne, at der kan hentes store energibesparelser ved at energirenovere, idet ca. 500.000 af i alt ca. 1,1 million danske parcelhuse er opført i denne periode.

1.2 Formål

Projektets formål har været at demonstrere, at energirenovering af boliger vil resultere i store rentable energibesparelser og en forbedring af indeklimaet. Projektet vil ideelt set give et praktisk bevis for de teoretiske beregninger for energibesparelser i boliger, der indgår i rapporten ”Energibesparelser i eksisterende og nye boliger” (BYG.DTU R-080). Projektet formål har mere overordnet været at bidrage til en bedre viden om hvordan boligmassen inden for overskuelig fremtid kan konverteres til lavenergibyggeri.

2 Energiforbrug og indeklima før energirenoeringen

Målinger af energiforbrug og indeklima før energirenoeringen blev påbegyndt ultimo juni 2005. Da energirenoeringen blev forsinket (påbegyndt 1. september 2006), foreligger der målinger for en periode på over et år. Det er valgt at behandle, analysere og rapportere ét helt års målinger, svarende til perioden 1. september 2005 til 31. august 2006 (inkl.), der således omfatter hele fyringssæsonen 2005/2006.

Der redegøres først for indeklimaet gennem målte indetemperaturer, lufttæthed, luftskifte og relativ luftfugtighed. Efterfølgende redegøres der for aktuelle målte energiforbrug. Til sidst sammenlignes målinger og beregninger, svarende til en validering af den detaljerede BSIM beregningsmodel af huset før energirenoeringen [1]. På baggrund af den validerede beregningsmodel foretages en opskalering til årligt energiforbrug til opvarmning, hvor der er korrigeret for inde- og udeklima, dvs. en beregning af det forventede årlige energiforbrug for et normalår ved brug af standard vejrdata (DRY).

Der redegøres i næste kapitel for tilsvarende analyser af målinger efter energirenoeringen, og der foretages beregninger af det årlige energiforbrug med henblik på at bestemme energibesparelsen ved den udførte energirenoering.

2.1 Indetemperaturer

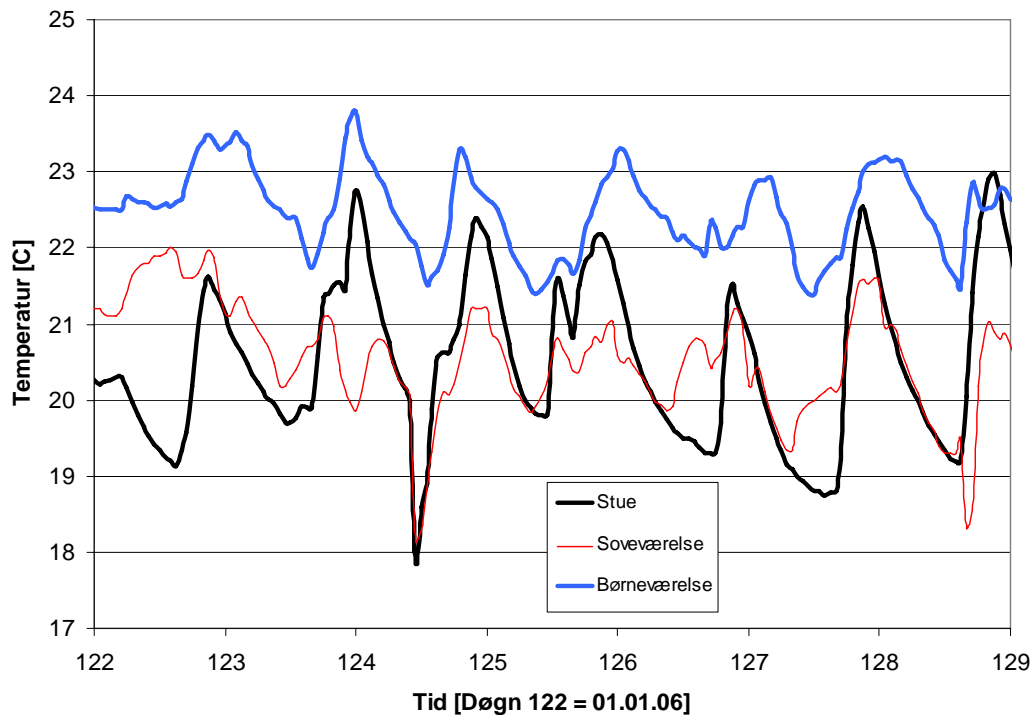
Det er valgt at sammenligne indetemperaturer for samme tidsperiode både før og efter energirenoeringen. Da måleperioden efter renoeringen er begrænset til januar og februar, er der nedenfor også angivet data for disse måneder. I Tabel 1 er vist en oversigt over målte lufttemperaturer i de enkelte rum i form af middel, minimum og maksimum værdier i perioden. Temperaturerne er for overskuelighedens skyld angivet i heltal. Temperaturerne for hele huset er beregnet som et vægtet gennemsnit ved brug af de enkelte rums volumen.

Tabel 1. Oversigt over indetemperatur niveauer i huset før energirenoeringen.

Temperaturer målt 1/1-28/2-2006	Middel [°C]	Minimum [°C]	Maksimum [°C]
Stue	20	17	24
Køkken	20	18	26
Soveværelse	20	15	22
Børneværelse	22	19	24
Kontor	21	18	25
Bad	21	17	25
Entre	17	15	20
Bryggers	20	16	24
Hele huset	20	17	24
Udetemperatur	0	-8	8

De ses at temperaturniveauerne generelt er lave. Middelttemperaturen er målt til 20,1°C. Middeludetemperaturen er målt til 0,1°C, hvilket svarer fint til middelttemperaturen for januar og februar i et normalår. De målte minimumstemperaturer når helt ned på 15-16°C i flere rum. Generelt varierer temperaturerne betydeligt fra rum til rum og svarende til middeltemperaturer på 17-22°C.

Den daglige variation i temperaturen for en typisk kold vinteruge fremgår af Figur 1. Der er tale om en uge med overskyet vejr og med relativt stabile døgnmiddel udetemperaturer lige omkring frysepunktet (-1,1 til 1,7°C). Der er altså ikke tale om en uge med størst variation, men en uge hvor de ydre vejr påvirkninger er omtrent konstante, så beboernes brug af huset slår maksimalt igennem på temperaturforholdene. Figuren viser at temperaturen i børneværelset dagligt varierer stabilt med et par grader. Den 3/1 (døgn 124) skiller sig ud, idet temperaturen i både stue og soveværelse dykker til 18°C midt på dagen. Elmålinger viser at der denne dag (en tirsdag) er et særligt højt samlet elforbrug, hvilket indikere stor aktivitet i huset, og de lave temperaturer skyldes formentlig udluftning.



Figur 1. Indetemperaturer i huset før energirenoeringen. Typisk kold vinteruge, 1/1-7/1 2006.

2.2 Luftskifte og – fugtighed

2.2.1 Trykprøvning

Klimaskærmens lufttæthed i form af den ukontrollerede infiltration af udeluft er blevet målt ved trykprøvning ved 50 Pa iht. DS/EN 13829. Resultatet af målingen var et luftskifte på 8-9 l/s/m². Til sammenligning er kravet til nye huse opført efter energibestemmelser i de nye tillæg til bygningsreglementerne på 1,5 l/s/m². Huset har altså en ret dårlig lufttæthed, hvilket ikke umiddelbart er kritisk, da huset er naturligt ventileret. Der er dog risiko for at den samlede ventilation under normale driftsforhold bliver for stor (se næste afsnit).

2.2.2 Luftskifte

Det typiske luftskifte under normal anvendelse af huset er målt ved brug af to metoder; PFT-metoden, der anvender perfluorcarbon som sporgas samt CO₂-målinger (se http://www.sensotron.pl/e_ps31.htm). Målingerne blev foretaget i november 2005.

PFT-målingerne, udført af SBI [2], viste et samlet luftskifte i huset på $0,39 \text{ h}^{-1}$, mens CO_2 -målinger, udført af DTU [3], viste et luftskifte på $0,19 - 0,46 \text{ h}^{-1}$ i de forskellige rum eller ca. $0,3 \text{ h}^{-1}$ i gennemsnit.

Målingerne har fastslået at luftskiftet generelt er lavere end bygningsreglementets minimumskrav på $0,5 \text{ h}^{-1}$. Dette harmonerer med erfaringer fra en energirenovering af en murerstervilla i Køge, hvor de i praksis forekommende ventilationsforhold også svarede til et mindre luftskifte end foreskrevet i nye huse.

Det må konkluderes at luftskiftet ligger på et fornuftigt niveau mht. at opretholde et godt indeklima og undgå et unødigt højt varmetab ved ventilation.

2.2.3 Relativ luftfugtighed

Den relative luftfugtighed er målt før (og efter) energirenoveringen for at dokumentere indeklimaet og give en indikation af fugtforholdene og risikoen for kondens og skimmelsvamp. Som det ses af Tabel 2 ligger den relative luftfugtighed på et generelt lavt niveau (30-35 %). Hvis den relative luftfugtighed er under 40 % i vinterperioden, som der er tale om, er det typisk fordi fugtpåvirkningerne er små, hvilket må siges at gælde for det aktuelle hus, som er beboet af to voksne og deres teenagesøn. En medvirkende årsag til den lave luftfugtighed skyldes også beboernes gode vaner vedr. udluftning efter bad og kun i begrænset omfang at tørre tøj indendørs. En relativ luftfugtighed på under 30 % vil typisk give anledning til ubehag, særligt hvis luftkvaliteten er dårlig.

Tabel 2. Oversigt over relative luftfugtigheder i huset før energirenoveringen.

Relativ luftfugtighed målt 1/1-28/2-2006	Middel [%]	Minimum [%]	Maksimum [%]
Stue	35	24	48
Køkken	35	25	58
Soveværelse	34	21	43
Børneværelse	32	21	40
Kontor	28	21	38
Bad	30	18	65

2.3 Energiforbrug

2.3.1 Opvarmning

Energiforbruget til husets opvarmning før energirenoveringen i perioden 1/9 2005 til 31/8 2006 er målt til:

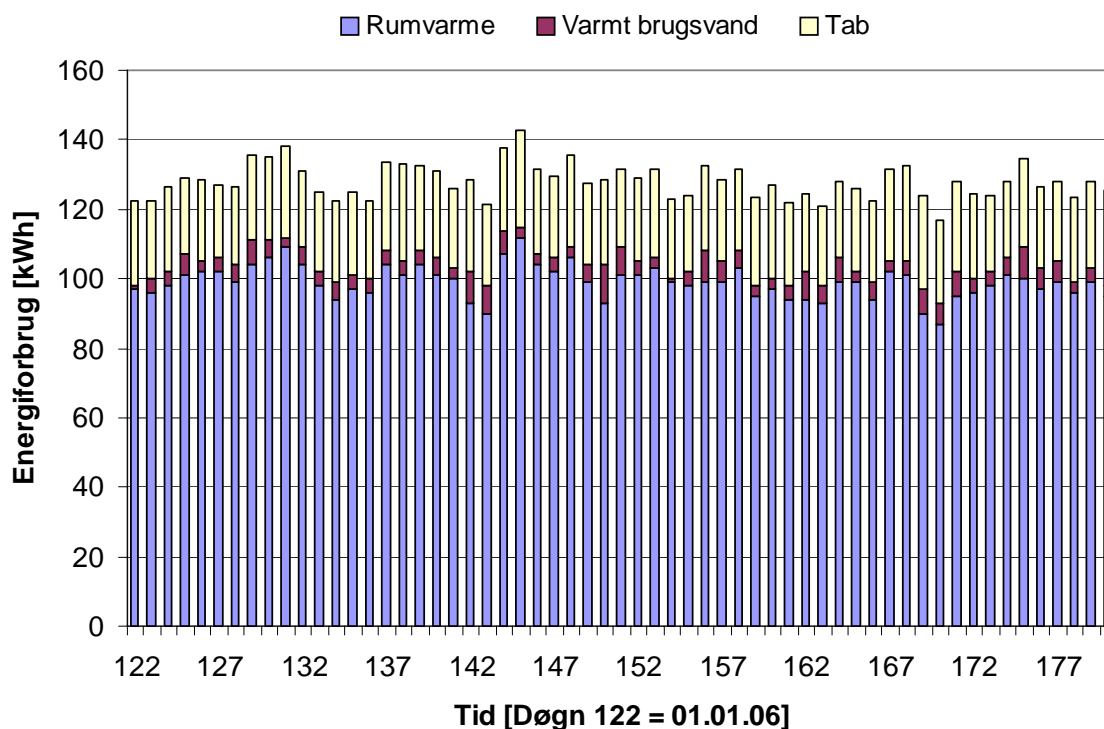
Total varmeproduktion fra kedel:	29.891	kWh
Varmt brugsvand (netto):	1339	kWh
Rumvarme (netto)	22.415	kWh
Tab (kedel, inkl. VVB)	6.137	kWh

Den totale varmeproduktion fra kedlen er baseret på et gasforbrug på 2717 m^3 og en typisk nedre brændværdi på 11 kWh/m^3 ($39,6 \text{ MJ/m}^3$).

Kedlens årsnyttevirkning kan bestemmes som forholdet mellem leveret varme (varmt brugsvand og rumvarme) og produceret varme (gasforbrugets energiindhold): $(22.415 + 1.339) / 29.891 = 0,80$. Kedlens årsnyttevirkning (inkl. varmtvandsbeholder) er altså 80 %, svarende til et tab på 20 %.

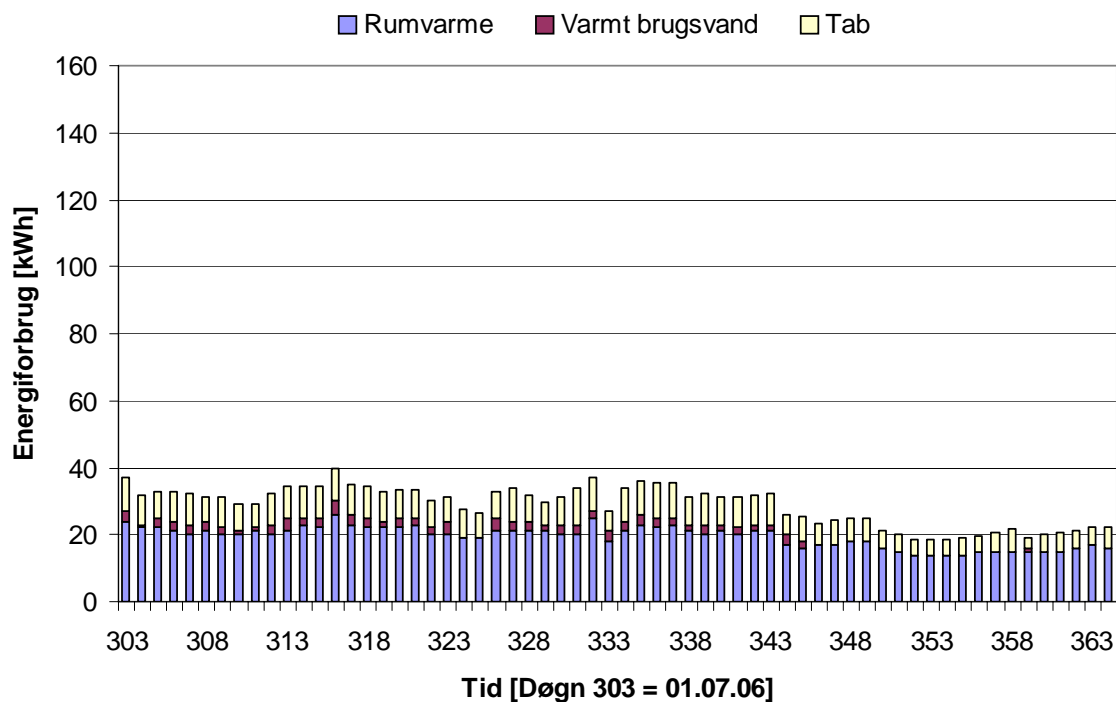
Beboerne har som supplement til opvarmningen i fyringssæsonen benyttet brændeovn, svarende til et opmålt brændeforbrug på ca. 4 m^3 . Forudsat en energimængde på 5 kWh/kg træ, en densitet på 400 kg/m^3 og en virkningsgrad på 50 %, kan beregnes et varmetilskud på 4000 kWh . Dette kan konverteres til varmereproduktion fra kedlen ud fra virkningsgraden, hvilket resulterer i et fortrængt gasforbrug på 455 m^3 svarende til et energiindhold på 5000 kWh . Det samlede bruttoenergiforbrug til opvarmning i måleperioden udgør således ca. $34,9 \text{ MWh/år}$ (3172 m^3 gas).

Energiforbruget på døgnbasis for en typisk vinterperiode fremgår af Figur 2. Heraf ses det at det samlede energiforbrug til opvarmning ligger i intervallet $120\text{-}140 \text{ kWh/døgn}$, mens forbruget til rumopvarmning er $90\text{-}110 \text{ kWh/døgn}$. Den relativt lille variation skyldes forholdsvis konstante udetemperaturer.



Figur 2. Energiforbrug til opvarmning før energirenoeringen. Typisk vinterperiode. 1/1-28/2 2006.

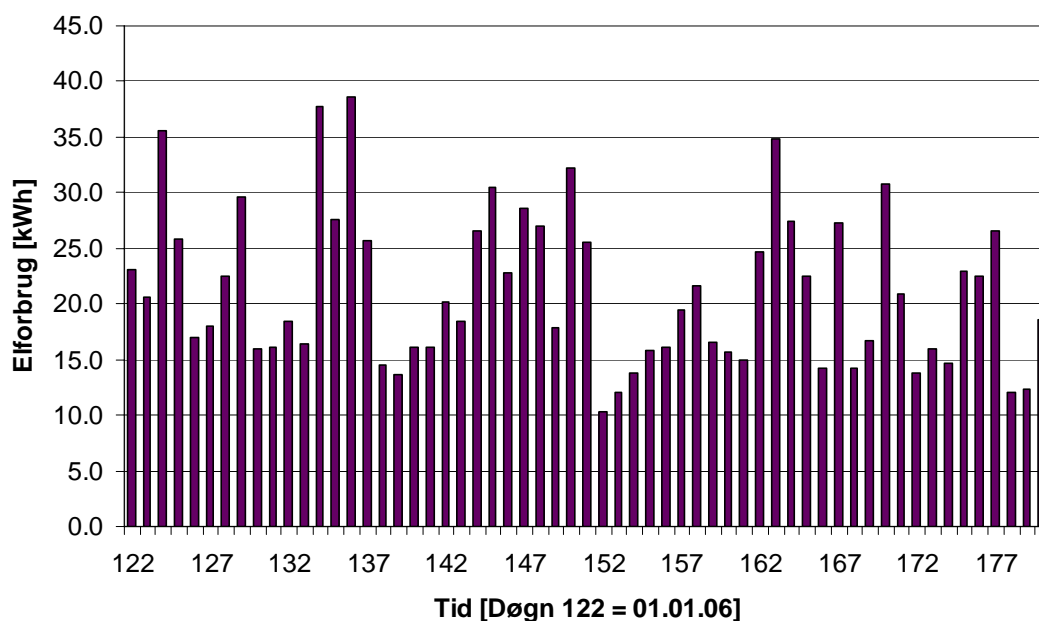
Energiforbruget på døgnbasis for en typisk sommerperiode fremgår af Figur 3. Heraf ses det at det samlede energiforbrug til opvarmning ligger i intervallet $20\text{-}40 \text{ kWh/døgn}$, mens forbruget til rumopvarmning er $15\text{-}20 \text{ kWh/døgn}$. Rumopvarmning skyldes formentlig primært (komfort)gulvvarmen i badeværelset.



Figur 3. Energiforbrug til opvarmning før energirenoeringen. Typisk sommerperiode. 1/7-31/8 2006.

2.3.2 Elforbrug

Elforbruget for de enkelte døgn i en typisk vinterperiode fremgår af Figur 4. Det ses at elforbruget varierer en del hen over perioden og at elforbruget er klart størst i weekenderne. Det samlede årlige elforbrug er målt til ca. 6000 kWh/år, som er baseret på 10 måneders data i perioden 1/9-2005 til 1/9-2006, idet der har været 2 måneder med dataudfald. Dette svarer til 16,6 kWh/dag i gennemsnit. I august 2006 var beboerne på sommerferie og elforbruget var i disse dage på 3,8 kWh/dag. Det vil sige at den del af elforbruget, som er uafhængigt af beboernes tilstedeværelser (apparaters standby-forbrug, køleskab, fryser mv.), udgør 23 % af det gennemsnitlige elforbrug.



Figur 4. Totalt elforbrug før energirenoeringen. Typisk vinterperiode. 1/1-28/2-2006.

Elforbrug til gaskedlen var i måleperioden meget stabilt og i gennemsnit på 41 W. Hertil skal lægges et effektoptag på 45 W for en ældre Grundfos UPS cirkulationspumpe indstillet på trin 2. Samlet set er der tale om et elforbrug på ca. 750 kWh/år.

2.4 Årligt bruttoenergiforbrug til opvarmning

De målte gennemsnitlige inde- og udetemperaturer i måleperiodens fyringssæson (1/9-1/6-2005/2006) var 21,3°C og 6,3°C svarende til en temperaturforskel på 15°C. Denne temperaturforskel svarer præcis til temperaturforskellen ved anvendelse af en normal indetemperatur på 20°C og standard vejrdato (DRY). Måleperiodens solkorrigerede antal graddage for de to nærliggende DMI målestationer Flakkebjerg og Abed var på 2590, hvilket svarer omtrent til det tilsvarende antal graddage for et normalt år. Det kan derfor konkluderes at det målte bruttoenergiforbrug før energirenoeringen på ca. 35 MWh/år, svarer til standard betingelser vedr. inde- og udeklima.

3 Energiforbrug og indeklima efter energirenoeringen

Energirenoeringen var gennemført ultimo december 2006. I det følgende redegøres der for resultaterne af målinger i januar og februar måned 2007 (59 dage).

3.1 Indetemperaturer

I Tabel 1 er vist en oversigt over målte lufttemperaturer efter energirenoeringen i de enkelte rum i form af middel, minimum og maksimum værdier i perioden. Temperaturerne er for overskuelighedens skyld angivet i heltal. Temperaturerne for hele huset er beregnet som et vægtet gennemsnit ved brug af de enkelte rums volumen.

Tabel 3. Oversigt over indetemperatur niveauer i huset efter energirenoeringen.

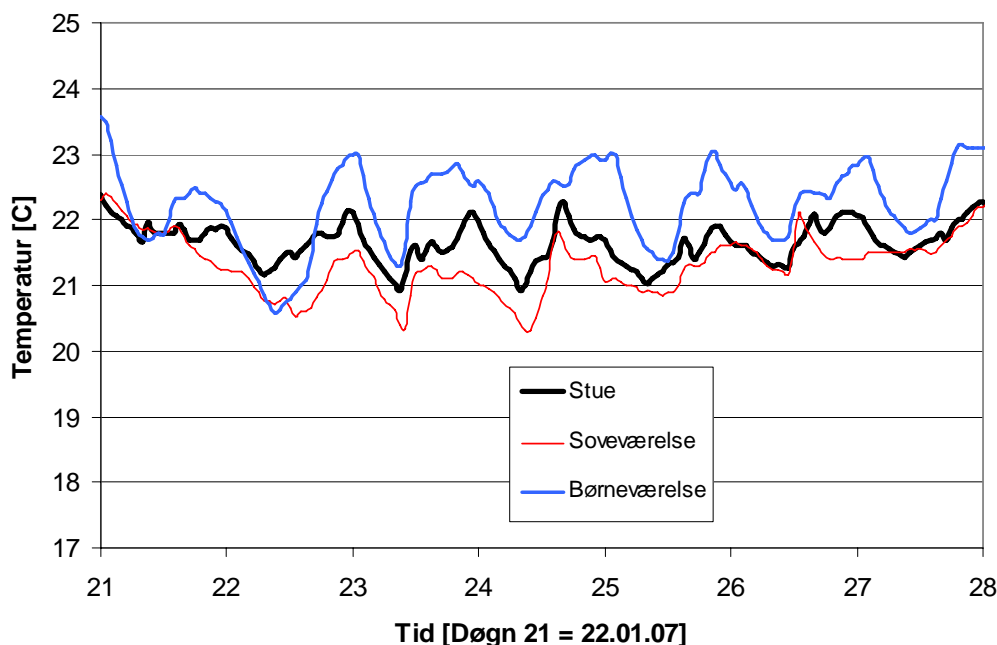
Temperaturer målt 1/1-28/2-2007	Middel [°C]	Minimum [°C]	Maksimum [°C]
Stue	22	21	23
Køkken	22	21	25
Soveværelse	22	20	24
Børneværelse	22	20	25
Kontor	21	19	26
Bad	23	20	24
Entre	21	19	24
Bryggers	24	21	26
Hele huset	22	21	24
Udetemperatur	4	-9	10

Det ses at temperaturniveauerne generelt er højere end før energirenoeringen. Middelttemperaturen er målt til 21,9°C, mens den var 20,1°C før renoeringen. Temperaturniveauet er altså steget knap 2°C. Det skal bemærkes at der er tale om præcist samme periode både før og efter renoeringen (januar + februar). Middeldudetemperaturen var dog noget højere for januar og februar måned efter renoeringen (3,6°C) end før renoeringen (0,1°C), hvilket vil have en mindre effekt på indetemperaturen.

De målte minimumstemperaturer er generelt 19-21°C, mens de før renoeringen nåede helt ned på 15-16°C i flere rum. Generelt varierer temperaturerne mindre fra rum til rum efter renoeringen (21-24°C) end før renoeringen (17-22°C).

Den daglige variation i indetemperaturen efter energirenoeringen for en typisk kold vinteruge fremgår af Figur 5. Der er forholdsvis små udsving overdøgnen efter energirenoeringen sammenlignet med før energirenoeringen (figur 1).

Samlet set viser måleresultaterne, at der er sket en betydelig forbedring af den termiske komfort i huset efter energirenoeringen.



Figur 5. Indetemperaturer i huset efter energirenoeringen. Typisk kold vinteruge, 22/1-28/1 2007.

3.2 Luftskifte og – fugtighed

3.2.1 Trykprøvning

Klimaskærmens lufttæthed i form af den ukontrollerede infiltration af udeluft er også målt efter energirenoering ved trykprøvning ved 50 Pa. Da huset efter renoeringen er blevet udstyret med et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding er det særdeles vigtigt at det ukontrollerede luftskifte er minimalt, så ”hele” luftskiftet går igennem varmegenvinderen. Der har derfor været fokus på lufttætning af klimaskærmen (samling mv.) ved udførelse af energirenoeringen.

Resultatet af trykprøvningen efter energirenoeringen var et luftskifte på 1,38 og 1,54 l/s/m² ved henholdsvis 50 Pa undertryk og overtryk. Det skal bemærkes at det er helt normalt at luftmængden er større ved overtryk. I henhold til DS/EN 13829 kan resultatet af trykprøvningen angives som resultatet af måling med undertryk, dvs. 1,38 l/s/m², hvilket til orientering er under kravet til nye huse, som er 1,50 l/s/m². Luftskiftet gennem utætheder i klimaskærmen, målt ved 50 Pa trykforskel, er således blevet reduceret fra ca. 8,5 l/s/m² før til 1,4 l/s/m² efter energirenoeringen.

I forbindelse med trykprøvningen blev der lavet en måling med lukket og tapet dør til teknikrummet (bryggers) ved 50 Pa undertryk, som viste 1,22 l/s/m². Dette indikerer at gennemføringer af ventilationskanaler og aftræk fra gasfyret med fordel kan tætnes yderligere.

3.2.2 Luftskifte

Luftskiftet under normalt brug af huset er også blevet målt efter energirenoeringen i form af PFT-målingerne udført af SBI [2]. Det gennemsnitlige luftskifte for huset som helhed blev målt til 0,51 gange i timen. Da huset efter energirenoeringen er blevet udstyret med et mekanisk ventilationsanlæg, som har kørt med en luftmængde svarende til et luftskifte på 0,45 gange i timen (jvf. nedenfor), er resultatet på ingen måde overraskende. Sammenlignet med målingen før energirenoeringen er der generelt en betydeligt bedre fordeling af den tilførte luft på husets rum, selvom der er fortsat en betydelig udelufttilførsel til soveværelset på grund af åbning af vindue.

3.2.3 Indregulering af ventilationsanlæg

Som led i etablering af mekaniske ventilation med varmegenvinding er luftmængderne i anlægget blevet indreguleret. I Tabel 4 ses de indregulerede luftmængder for ventilatortrin 4. Der er som normalt indreguleret en lille ubalance i anlægget svarende til en lidt større udsugning, hvilket skaber et mindre undertryk, som kan forhindre fugtig indeluft i at diffundere ud i klimaskærms-konstruktionerne og anrette skade. I måleperioden har anlægget kørt på trin 2, hvilket svarer til et luftskifte på $0,45 \text{ h}^{-1}$, forudsat et rumvolumen på 400 m^3 og baseret op oplysninger om at luftmængderne på trin 2 er 51 % lavere end anført i Tabel 4.

Tabel 4. Indregulerede luftmængder i huset efter energirenoeringen målt på det højeste ventilatortrin nr. 4.

Rum	Indblæsning [m^3/h]	Udsugning [m^3/h]
Stue	160	100
Køkken	-	65
Toilet	-	52
Bryggers	-	45
Bad	-	58
Børneværelse	60	-
Soveværelse	60	-
Kontor	70	38
Total (sum af målinger i rum)	350	358
Hovedluft (målinger i kanalsystem)	345	355

3.2.4 Relativ luftfugtighed

Tabel 5 nedenfor viser den relative luftfugtighed efter energirenoeringen. Det ses at den relative luftfugtighed ligger på et generelt lavt, men lidt højere niveau (36-40 %) end før energirenoeringen (30-35 %). Umiddelbart burde man forvente en reduktion i fugtigheden pga. det højere temperaturniveau og et lidt større luftskifte. En lidt højere relativ luftfugtighed af udeluften efter energirenoeringen (se bilag 2) har en vis betydning for det højere niveau.

Tabel 5. Oversigt over relative luftfugtigheder i huset efter energirenoeringen.

Relativ luftfugtighed målt 1/1-28/2-2007	Middel [%]	Minimum [%]	Maksimum [%]
Stue	39	30	52
Køkken	40	29	58
Soveværelse	37	28	47
Børneværelse	36	27	47
Kontor	38	23	49
Bad	39	27	68

3.3 Energiforbrug

3.3.1 Opvarmning

Energiforbruget til opvarmning efter energirenoeringen, for perioden 1/1 2007 til 28/2 2007, er målt til:

Total varmeproduktion fra kedel:	4176 kWh
Varmt brugsvand (netto):	235 kWh
Rumopvarmning (netto):	2560 kWh
Varmetab ¹ :	1381 kWh

¹ varmetab fra kedel, varmtvandsbeholder, tilslutningsrør mv., varmfordelingsrør, varmerør til cirkulation af varmt brugsvand.

Den totale varmeproduktion fra kedlen er baseret på et gasforbrug på ca. 380 m³ og en typisk nedre brændværdi på 11 kWh/m³ (39,6 MJ/m³). Dette giver anledning til en lidt mindre varmeproduktion end i virkeligheden, da den nedre brændværdi svarer til, at al den vanddamp, der dannes ved forbrændingen, bliver bortledt sammen med røgen. Men da der er tale om en kondenserende kedel, vil del af dampen kondensere, og på den måde udvindes der reelt en større mængde varme. Kondenserer man al vanddampen, vil varmemængden svare til den høje øvre brændværdi på 12,2 kWh/m³ (44,0 MJ/m³). I praksis er det ikke muligt at opnå denne værdi.

Det skal bemærkes at beboerne har undladt at benytte brændeovnen i måleperioden. Der er således ikke anvendt supplerende varmekilder efter energirenoeringen.

Det er bemærkelsesværdigt at ”varmetabet”, dvs. forskellen mellem den leverede mængde varmt brugsvand og rumvarme inkl. varmfordelingstab og så den samlede produktion af varme fra kedlen, udgør hele 33 % af den samlede producerede varmemængde. Årsagen til dette relativt store varmetab ligger umiddelbart i de uisolerede tilslutningsrør mellem kedel og varmtvandsbeholder, og mellem kedel og målepunkt for rumvarme-energimåler, samt ikke mindst varmetabet fra cirkulation af varmt brugsvand (12 timer/døgn), som beboerne af komfortmæssige årsager har fået etableret som en del af energirenoeringen.

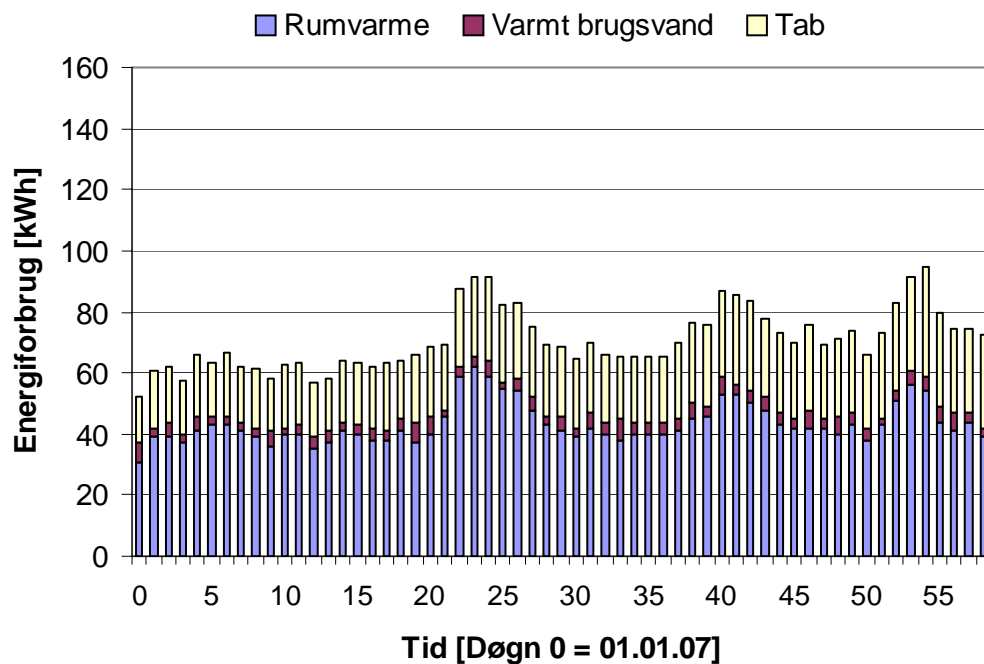
Varmetabet fra cirkulationen af det varme brugsvand i rør i terrændækket under klaplaget, bidrager formentligt meget til tabet, da terrændækket kun har 30 mm isolering. Derfor er cirkulationstiden efter aftale med beboerne mindsket til 6 timer/døgn (3 timer morgen og aften). En del af de uisolerede tilslutningsrør kan forholdsvis nemt isoleres, mens andre dele (herunder også separat pumpe til brugsvandscirkulation) er svært tilgængelige, besværlige at

isolere og giver efterfølgende dårlig mulighed for servicering af installationen. En form for isoleringskasse kunne være en løsning.

De målte gennemsnitlige inde- og udetemperaturer i perioden var hhv. 21,9°C og 3,6°C.

Energiforbruget på døgnbasis i måleperioden fremgår af Figur 2. Heraf ses det at det samlede energiforbrug til opvarmning efter energirenoeringen ligger i intervallet 60-90 kWh/døgn (før: 120-140 kWh/døgn), mens forbruget til rumopvarmning ligger på 40-60 kWh/døgn (før: 90-110 kWh/døgn). Der er tale om relativt små variationer i energiforbruget, når man tager i betragtning at udeklimaet har varieret betydeligt i måleperioden (se bilag 2). Hovedårsagen er de ovennævnte tab, som i modsætning til rumvarmeforbruget kun påvirkes i begrænset grad af udetemperatur, solindfald og interne varmetilskud.

Måleresultaterne indikerer at energiforbruget til rumopvarmning er blevet reduceret med ca. 50 % efter energirenoeringen. Indetemperaturen er dog efter energirenoeringen omkring 2°C højere end før energirenoeringen (øget termisk komfortniveau), så der er reelt tale om en større energibesparelse, hvilket dokumenteres senere i rapporten.



Figur 6. Energiforbrug til opvarmning efter energirenoeringen. Typisk vinterperiode. 1/1-28/2 2007.

3.3.2 Elforbrug

Der er efter energirenoeringen foretaget målinger af det samlede elforbrug samt elforbruget til varme- og ventilationsanlæg.

Samlet elforbrug

Det samlede elforbrug i den to måneder lange måleperiode har været 1142 kWh. Ved simpel opskalering og fradrag fra mindre belysning i sommerperioden, sommerferie mv., vurderes niveauet efter energirenoeringen også at ligge på 6000 kWh/år, som før energirenoeringen.

Varmeanlæg

Elforbruget til varmeanlægget har været meget konstant i perioden og er i gennemsnit målt til 2,2 kWh/døgn eller ca. 800 kWh/år ved simpel opskalering, svarende til en effektforbrug på 92 W. Dette effektforbrug omfatter:

Kombipumpe i kedel	52 W	Fabriksindstilling
Ventilator	15 W	Jf. DGC kedeldata
Automatik	7 W	Jf. DGC kedeldata
Brugsvandpumpe, 25 W, 12 timer/døgn	12 W	
Tidsstyring for brugsvandpumpe	6 W	”Rest”
I alt	92 W	

Målingerne viser at der især er et betydeligt elforbrug til cirkulationspumpen. Hvis fabriksindstillingen ændres til minimumsindstilling reduceres elforbruget til 35 W. Beregningerne viser at pumpekapaciteten ved minimumsindstilling umiddelbart er tilstrækkeligt til at levere den nødvendige varme.

Ventilationsanlæg

Elforbruget til ventilation af huset efter energirenoveringen med det mekaniske ventilationsanlæg med varmegenvinding (Nilan Comfort 300 EC TOP) er spotmålt til et effektoptag på 36 W på det normalt anvendte trin 2, svarende til en luftmængde på ca. 180 m³/h (luftsifte på 0,45 h⁻¹). Standby effektoptaget er målt til 7-8 W.

Der foreligger en prøvningsrapport på ventilationsanlæggets [4], hvori effektoptaget er målt til 55 W ved 200 m³/h og et typisk tryktab udenfor ventilationsaggregatet på 100 Pa. Det målte effektforbrug er noget mindre end i prøvningsrapporten, men hvis der tages i betragtning af effektforbruget afhænger af luftmængden i tredje potens (10 % mindre luftmængde = 27 % mindre elforbrug), og at tryktabet formentlig er mindre end i et typisk villaanlæg, da kanalstrækningerne er korte, så er der god overensstemmelse.

Et effektoptag på 36 W konstant hele året svarer til et elforbrug på 315 kWh/år.

3.4 Validering af beregningsmodel

Formålet med dette afsnit er at foretage en sammenligning af målinger med detaljerede beregninger på en realistisk beregningsmodel af huset med henblik på at validere beregningsmodellen, så den kan bruges til opskalering til årligt energiforbrug efter renoveringen.

De detaljerede beregninger foretages med programmet BSIM, og modellen som benyttes er beskrevet i [1]. Modellen valideres for en kold periode svarende til de sidste 22 dage i måleperioden (7/2 2007 til 28/2 2007). I denne periode forekommer der ikke meget unormalt høje udetemperaturer, som var tilfældet i måleperiodens første 3 uger. Desuden har der i den udvalgte periode ikke været dataudfald, og varme- og ventilationsanlæg har fungeret normalt.

Der er tale om en forholdsvis kort måleperiode (ca. 10 % af fyringssæsonen), men den vurderes at være tilstrækkelig til at validere beregningsmodellen med henblik på beregning af det forventede årlige energiforbrug.

Der er foretaget en række ændringer til den oprindelige BSIM model, som er beskrevet kort i det følgende.

Udeklima

For at give de korrekte randbetingelser til beregningsmodellen opbygges et nyt referenceår, hvor udetemperatur og solindfald defineres som de målte værdier i den udvalgte måleperiode (7/2 2007 til 28/2 2007).

Indetemperatur

For at opnå samme betingelser i forbindelse med simuleringerne med BSIM, som i måleperioden, fastsættes setpunktet for indetemperaturen i de enkelte rum svarende til den gennemsnitlige indetemperatur for den betragtede måleperiode.

Effektivitet af varmegenvinding

Ventilationen foregår med udeluft der ledes gennem en varmeveksler i et ventilationsaggregat. Varmevekslerens temperaturvirkningsgrad sættes jf. målingerne til 81 %. Oprindeligt var der forventet en temperaturvirkningsgrad på 85 %.

Ventilation

Ventilationen angives svarende til indreguleringen, dvs. der anvendes de indregulerede luftmængder i indblæsning og udsugning for trin 2. På denne baggrund opstilles en luftbalance for huset og herudfra fastlægges luftudvekslingen mellem de enkelte rum/zoner.

Infiltration

Infiltrationen kan bestemmes på baggrund af de tidligere omtalte målinger af bygningens lufttæthed ved trykprøvning, samt konverteringsformlen fra SBI anvisning 213 (Bygningers energibehov) til bestemmelse af det årlige gennemsnitlige infiltration i bygninger, hvor klimaskærmens lufttæthed er undersøgt ved trykprøvning. Benyttes denne formel kan der beregnes en infiltration på: $0,04 + 0,06 \cdot 1,38 \text{ l/s/m}^2 = 0,12 \text{ l/s/m}^2$ eller $0,17 \text{ h}^{-1}$ for samtlige zoner/rum.

Det vurderes imidlertid at denne teoretisk beregnede infiltration er for høj sammenlignet med den i praksis forekommende infiltration. Den europæiske standard EN ISO 13790: 2004 [5] vedr. beregning af energiforbrug til rumopvarmning angiver en typisk konverteringsfaktor på 0,07 for moderat beskyttede bygninger som f.eks. huse i byområdets udkant, hvilket gælder for det aktuelle hus. På denne baggrund kan det målte luftskifte ved 50 Pa konverteres til en infiltration på $0,10 \text{ h}^{-1}$. Denne værdi benyttes i de følgende beregninger.

Internt varmetilskud fra udstyr og personer

Varmetilskud fra el-apparater og belysning ($3,5 \text{ W/m}^2$) og personer ($1,5 \text{ W/m}^2$) ændres ikke i forhold til den oprindelige beregningsmodel (jvf. udredning om internt varmetilskud i bilag 2).

Internt varmetilskud fra varmeinstallation

Varmetabet fra varmeinstallationen i bryggers, dvs. kedel, varmtvandsbeholder, brugsvandpumpe og diverse tilslutningsrør er skønsmæssigt opgjort til 245 W.

Resultater

Der er gennemført en simuleringsperiode på 22 dage, svarende til den periode som er målt. Resultaterne er sammenfattet i Tabel 6.

Tabel 6. Beregnet energibalance for perioden 7. februar til 28. februar 2007.

Energibalance		kWh
qHeating	Nettoenergiforbrug til rumopvarmning	1131
qCooling	Energi afsat til køling	0
qInfiltration	Varmetab ved infiltration	-147
qVenting	Varmetab ved udluftning	-3
qSunRad	Varme tilført ved solindfald	195
qPeople	Varme tilført fra personer	126
qEquipment	Varme tilført fra apparatur + installationer	425
qLighting	Energi afsat til kunstig belysning	0
qTransmission	Varmetransmissionstab via klimaskærmen	-1622
qMixing	Energi overført ved luftudveksling	-5
qVentilation	Varmetab ved ventilation	-100
Sum	Sum af tilskud fratrukket tab	0
tOutdoor mean	Middelværdien af den operative indetemp.	21,8°C
tOp mean	Middelværdien af udeluftens temperatur	1,8°C

Energiforbruget i samme periode er målt til:

Total varmeproduktion fra kedel:	1697 kWh
Varmt brugsvand:	91 kWh
Rumopvarmning (inkl. varmfordelingstab):	998 kWh
Varmetab ¹	608 kWh

¹ forskel mellem total varmeproduktion og varmeforbrug til rumopvarmning + varmt brugsvand.

”Varmetabet” kommer primært fra varmtvandsbeholder, tilslutningsrør og cirkulationsrør til varmt brugsvand. En betydelig del af dette varmetab/-tilskud vil komme huset til gode og kunne nyttiggøres til rumopvarmning, da der er tale om en vinterperiode. Dette er afspejlet i energiforbruget til rumopvarmning. Dette er således ikke direkte sammenligneligt med det med BSIM beregnede nettoenergiforbrug til rumopvarmning, men korrigeres nedenfor.

Diskussion af resultater

Målingerne viser et energiforbrug til rumopvarmning på 998 kWh inklusiv varmetab fra indstøbte varmfordelingsrør i terrændækket. Dette varmetab kan på baggrund af den tidligere fastlagte varmetabskoefficient på 15,3 W/K og et gradtimetallet på 10,6 kWh for måleperioden skønsmæssigt beregnes til 150 kWh. Det korrigerede målte nettoenergiforbrug til rumopvarmning er således ca. 850 kWh.

Ud af det målte ”varmetab” på 608 kWh er der i BSIM-beregningsmodellen taget højde for udnyttelse af et estimeret varmetab fra varmeinstallationen i bryggers på ca. 130 kWh (245 W). For den resterende del på 470 kWh, som primært omfatter varmetab ved cirkulation af varmt brugsvand, må antages at en stor del vil tilgå rummene, som varmetilskud, der vil

kunne nyttiggøres, men også at en stor del ikke vil kunne nyttiggøres, da huset efter energirenoveringen er forholdsvis velisoleret og en stor del de 470 kWh afsættes i bryggers, hvor der i forvejen er varmeoverskud. Hvis det antages at 60 % af dette varmetab, dvs. ca. 280 kWh (875 W), er blevet nyttiggjort til rumopvarmning i måleperioden, er der overensstemmelse mellem målinger og beregninger, idet $850 + 280 = 1130$ kWh, hvilket svarer til det med BSIM beregnede nettoenergiforbrug til rumopvarmning i måleperioden.

Det kan dermed konkluderes, at det er muligt at validere beregningsmodellen, idet forskelle mellem beregninger og målinger umiddelbart kan forklares, selvom der naturligvis er betydelige usikkerheder mht. primært nyttiggørelsen af varmetab/-tilskud fra indstøbte varmerør i terrændækket.

3.5 Årligt bruttoenergiforbrug til opvarmning

Energiforbruget for den betragtede periode er meget højt og hvis man tager udgangspunkt i målingerne i forbindelse med en beregning af det forventede energiforbrug på årsbasis vil man få en meget høj værdi, som afspejler en række uhensigtsmæssige og urealistiske forhold. Følgende forhold ændres derfor i beregningen af det årlige energiforbrug efter energirenoveringen:

- I den betragtede måleperiode har indetemperaturen været $21,8^{\circ}\text{C}$ i gennemsnit, hvor man normalt vil vurdere et energiforbrug ved en temperatur på 20°C . Sidstnævnte temperatur anvendes som setpunkt for indetemperaturen i BSIM-modellen.
- Varmetabet fra den delvist uisolerede varmeinstallation i bryggers antages reduceret betydeligt ved isolering af rør og ventiler mv. I BSIM-modellen medtages kun et varmetilskud fra varmtvandsbeholderen på 50 W og et tilsvarende varmetilskud fra den øvrige varmeinstallation, dvs. i alt 100 W (876 kWh/år).

Hvis man ændre disse forhold i BSIM-modellen som tidligere er sammenlignet med målingerne, og herefter gennemfører en årssimulering på baggrund af typisk vejrdata (DRY) får man energibalancen vist i Tabel 7.

Tabel 7. Beregnet energibalance for hele året.

Energibalance		kWh
qHeating	Nettoenergiforbrug til rumopvarmning	8.177
qCooling	Energi afsat til køling	0
qInfiltration	Varmetab ved infiltration	-1.693
qVenting	Varmetab ved udluftning	-2.096
qSunRad	Varme tilført ved solindfald	7.289
qPeople	Varme tilført fra personer	2.104
qEquipment	Varme tilført fra apparatur + installationer	5.817
qLighting	Energi afsat til kunstig belysning	0
qTransmission	Varmetransmissionstab via klimaskærmen	-18.666
qMixing	Energi overført ved luftudveksling	85
qVentilation	Varmetab ved ventilation	-1.018
Sum	Sum af tilskud fratrukket tab	0

Det forventede nettoenergiforbrug til rumopvarmning efter energirenoveringen er altså ca. 8177 kWh/år

Det samlede bruttoenergiforbrug til rumopvarmning og varmt brugsvand beregnes ud fra følgende forudsætninger:

- Der er tale om et meget betydeligt varmetab ved cirkulation af varmt brugsvand. Brugsvandscirkulation i småhuse med uisolerede rør placeret i et næsten uisolaret terrændæk bør undgås. Beregningen foretages derfor under antagelse af at der ikke sker brugsvandscirkulation.
- Der antages et varmtvandsforbrug på 1.339 kWh/år, som målt i perioden 1/9 2005 til 1/9 2006.
- Der antages et netto varmetab fra varmfordelingsrør på 1.400 kWh/år.
- Varmetab fra varmeinstallation (876 kWh) medtages 100 % som tab, da der er taget højde for nyttiggørelsen i BSIM beregningen (8177 kWh).
- Der anvendes en årsnyttevirkning på 98 %, svarende til energimærket for gaskedlen, som er målt af Dansk Gasteknisk Center (DGC).

Bruttoenergiforbrug (rumopvarmning + varmt brugsvand):

$$E_{\text{brutto}} = \frac{Q_{\text{brutto}}}{\eta} = \frac{8.177 + 1.339 + 1.400 + 876}{0,98} = 12.033 \text{ kWh/år} \approx 12,0 \text{ MWh/år}$$

På baggrund af målingerne kan der således forventes et bruttoenergiforbrug efter energirenoveringen på ca. 12 MWh/år. Da energiforbruget før energirenoveringen er målt til ca. 35 MWh/år, svarer dette til en energibesparelse på 23 MWh/år. Energiforbrugene er henført til standard betingelser vedr. inde- og udeklima.

4 Referencer

- [1] Energirenovering af typisk parcelhus opført i perioden 1960-1980 – Del 1: Beregninger. Henrik Tommerup. BYG.DTU rapport R-165. 2007.
- [2] Retrofit – PFT-målinger i villa i Næstved. Notat med jour. nr. 732-014. Niels Christian Bergsøe. Afdelingen for Energi & Miljø, SBI. April 2007.
- [3] Ventilation Measurements in Næstved by the CO₂ Method. (internal report). Petra Baránková. Czech Technical University in Prague – International Centre for Indoor Environment and Energy, DTU. Juni 2007.
- [4] Prüfbericht Nr. HP-05476/B. Nilan Comfort 300 Lüftungsgerät. Hochschule für Technik+Architektur Luzern. Prüfstelle HLK. 2006-06-20.
- [5] European standard EN ISO 13790: 2004. Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for space heating.

Bilag 1. Måleprogram

Til energi- og indeklimamålingerne er der anvendt en kombination af måleudstyr fra Brunata A/S (www.brunata.dk) og Testo (forhandles af Buhl & Bønsøe A/S, www.testo.dk).

Datablade for det anvendte udstyr fremgår af de respektive firmaers hjemmeside.

Måleudstyret fra Brunata omfatter:

- 1 HGQ3 energimåler til måling af nettoenergiforbrug til rumopvarmning
- 1 HGQ1 energimåler til måling af nettoenergiforbrug til varmt brugsvand
- 2 Enermet elmålere til hhv. måling af samlet elforbrug og elforbrug til varmeanlæg
- 9 temperaturloggere til måling indetemperaturer i alle rum (undtagen gang) og én udetemperatur
- 1 Controllerboks (dataopsamlingsenhed)
- 2 Pulsopsamlere
- Radiomodtagere
- Solintegrator til konvertering af lavvoltage signal fra solarimetre (se nedenfor) til pulser og efterfølgende pulsopsamling (inkl. radiosender)

Der er tale om en specialudgave af BrunataNet RS485 til opsamling af temperatur- og energidata samt solindfaldsmåling. Brunata Net RS 485 virker på følgende måde:

- Data opsamles fra alle måler typer via radio i den enkelte måler eller i pulsopsamler, der strømforsynes fra batteri med maksimalt 5 års levetid. Alle data transmitteres digitalt, dvs. at selv om en enkelt sending ikke opfanges af radiomodtageren vil systemet automatisk blive opdateret ved den næste transmission.
- Data opsamles og lagres i database i radiomodtagerne.
- Data hentes via trådbaseret netværk fra radiomodtagerne til controllerboks og lagres i database i en industri PC.
- Data kan herfra hentes via - telefon modem, bærbar PC, stationær PC.
- Data kan behandles i et ”filterprogram”, der kan indsætte manglende målinger, fjerne dubletter mm.

Måleudstyret fra Testo omfatter:

- 7 Testo 175-H2 kombinerede loggere til måling af temperatur og relativ fugtighed i opholdsrum og ude.
- 1 Testo 177-T4 logger til måling af friskluft-, indblæsnings-, udsugnings-, og afkasttemperaturer umiddelbart før og efter ventilationsaggregatet.
- Testo 580 dataopsamler til opsamling af data fra Testo 175/177.

Alle temperatur og fugtighedsmålere er placeret i opholdszone, så vidt muligt ca. 1,1 m over gulv og så målingen så vidt repræsenterer hele rummet. Placeret så de ikke rammes af direkte solstråling.

Øvrigt måleudstyr omfatter:

- 4 pyranometre af typen CM5 til måling af solbestrålingsstyrken på vandret og på de tre facader med vinduer. Pyranometrene var placeret på kasse på tag (se billeder nedenfor) og orienteret som anført. Pyranometrene genererer en spænding afhængig af solintensiteten

med en nøjagtighed på 2 % og ved brug af kalibreringskonstanter for de enkelte pyranometre kan de målte spændinger omregnes til W/m^2 .

- 1 Krom Schröder BK-G4T gasmåler med pulsudgang.

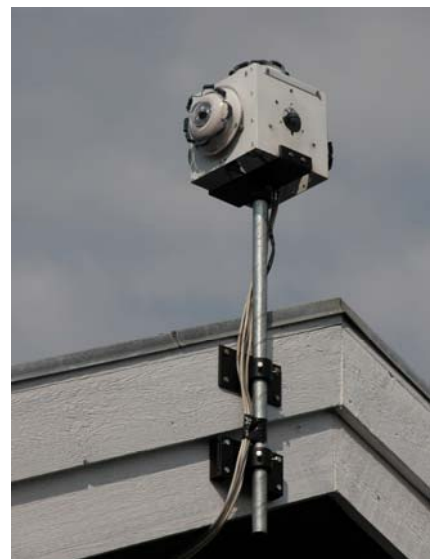
Nedenfor er vist eksempler på måleudstyrets placering.



Venstre: Testo 175-H2 temperatur og fugt måler samt Brunata temperaturlogger i køkken.
Højre: Samme målere placeret udvendigt på den "kolde" del af rem på nordsiden af huset og beskyttet mod direkte solstråling via udhænget.



HGQ energimålere og Enermet elmålere.

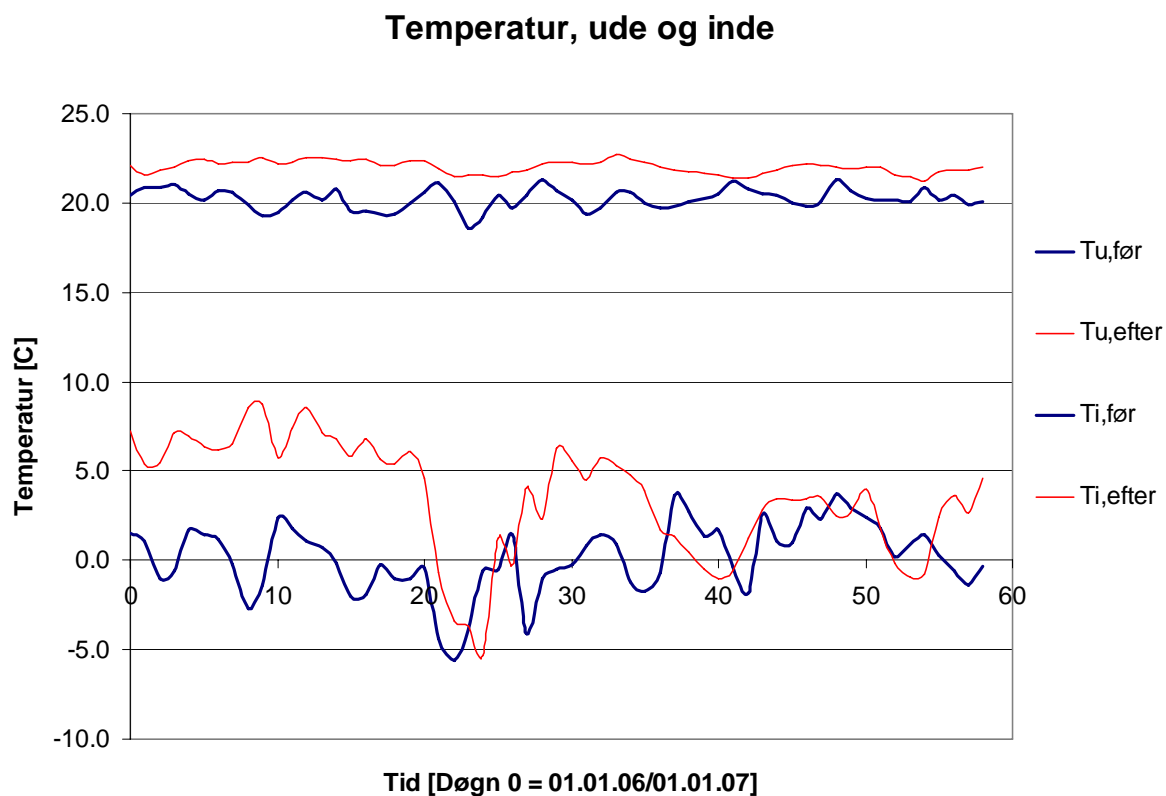


Pyranometre på tag til måling af solbestrålingsstyrken på facader med vinduer. Bemærk varmetråde på hvert enkelt pyranometer, så dug, sne og is kan undgås.

Bilag 2. Måleresultater

I dette bilag præsenteres supplerende og detaljerede måleresultater vedrørende ude- og indetemperatur, relativ luftfugtighed, internt varmetilskud, energiforbrug, solindfald samt effektivitet af varmegenvinding.

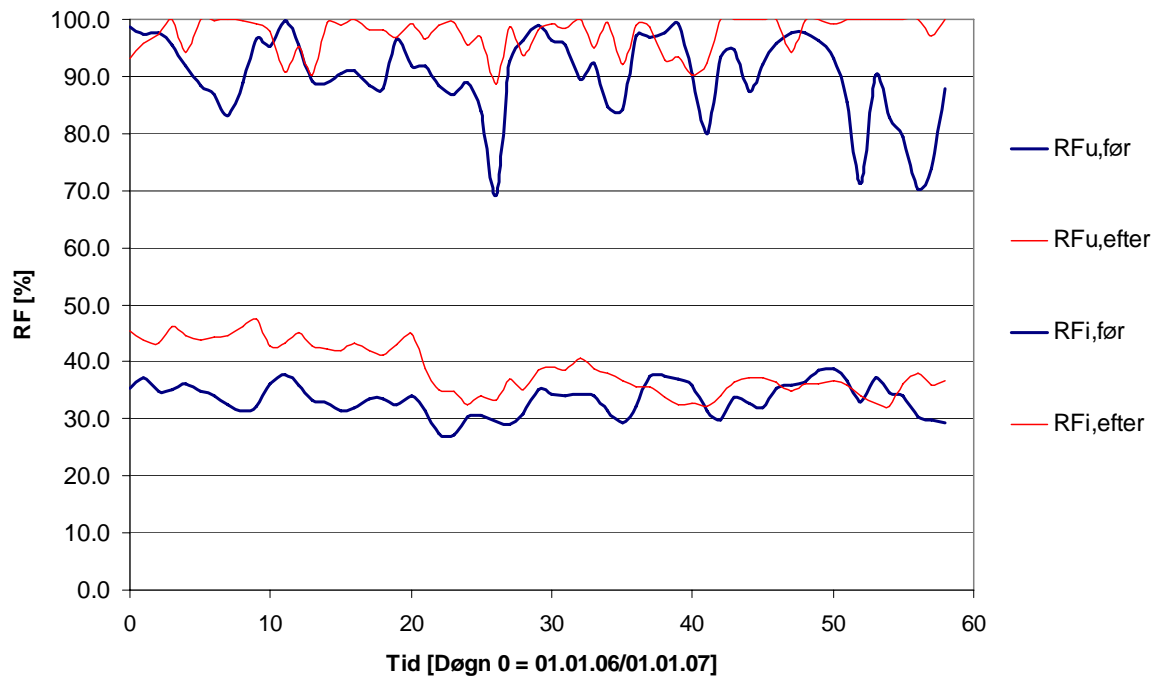
Inde og udetemperaturer



Figur 7. Inde- og udetemperaturer (døgnmiddel) for januar og februar måned 2006 (FØR) hhv. 2007 (EFTER).

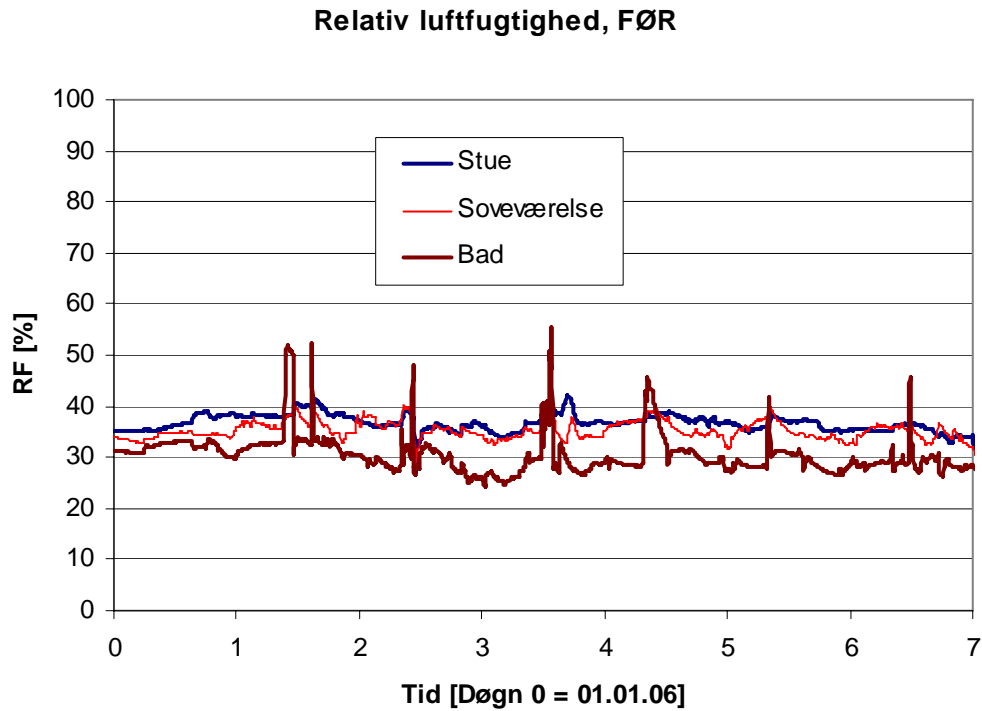
Relativ luftfugtighed

Relativ luftfugtighed, ude og inde

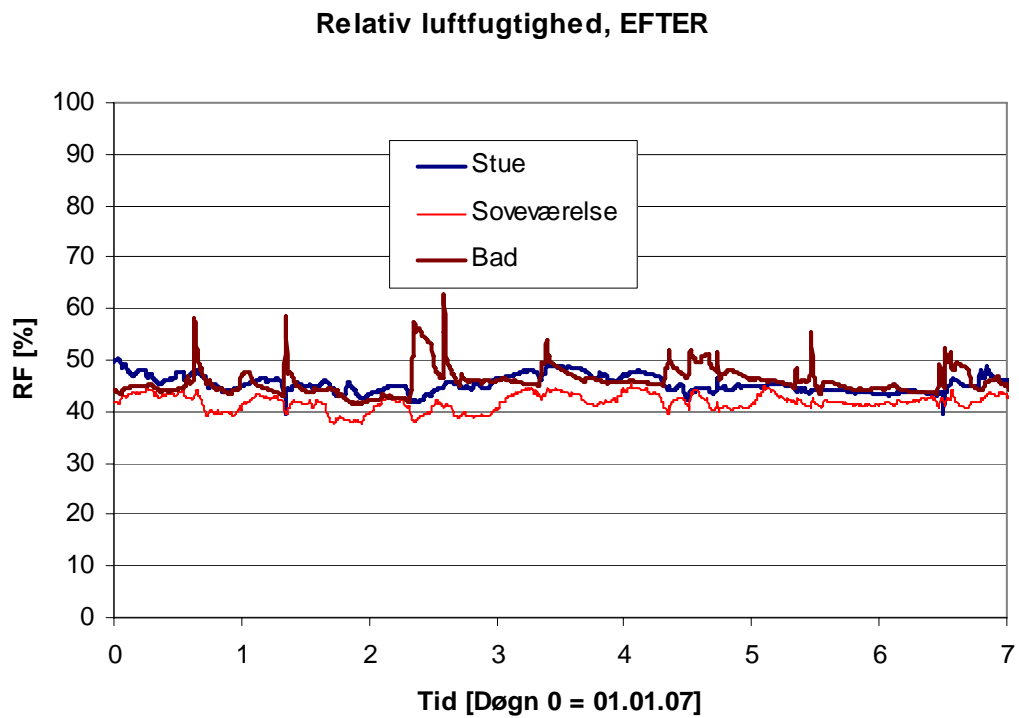


Figur 8. Relativ luftfugtighed (døgnmiddel) for januar og februar måned 2006 (FØR) hhv. 2007 (EFTER).

Figur 9 og 10 viser målte relative luftfugtigheder i typisk vinter uge (første 7 dage af januar) før og efter energirenoeringen. Der er angivet resultater for stue, soveværelse og bad. Det ses at luftfugtigheden før energirenoeringen lå på et relativt lavt niveau (25 – 40 %), mens niveauet efter renoeringen ligger på et mere fornuftigt niveau (40-50 %). Det skal dog bemærkes at man skal passe på at sammenligne de to situationer, idet de udvendige fugtigforhold har været forskellige.



Figur 9. Relativ luftfugtighed for typisk vinter uge FØR energirenoeringen.



Figur 10. Relativ luftfugtighed for typisk vinter uge EFTER energirenoeringen.

Internt varmetilskud - elforbrug

Målinger af det samlede elforbrug viser at dette ligger på et niveau af ca. 6000 kWh/år. I måleperioden efter energirenoeringen, dvs. 1. januar 2007 til 28. februar 2007 (59 dage) var elforbruget 1142 kWh, svarende til 807 W eller 5,0 W/m². En del af dette bliver til potentielt varmetilskud der kan udnyttes til rumopvarmning. Detaljerede målinger på nyere huse viser at ca. 75 % af elforbruget bliver til potentielt varmetilskud. Forudsættes samme andel for det aktuelle hus fås et varmetilskud på 3,75 W/m². I de oprindelige beregninger er der forudsat et varmetilskud på 3,5 W/m², som altså omtrent svarer til det målte. Da usikkerheden omkring udnyttelsen af de el relaterede varmetilskud er relativt stor, antages det derfor for rimeligt ikke at ændre på de oprindelige forudsætninger ved sammenligning af målte og beregnede energiforbrug. Der foretages heller ikke ændringer i den forholdsvis detaljerede beskrivelse af i hvilke rum varmen tilføres.

I de oprindelige beregninger er der antaget et varmetilskud fra personer på 1,5 W/m² og benyttet detaljerede beskrivelser af hvor varmen afsættes. Målingerne giver ikke anledning til at revurdere disse antagelser.

Energiforbrug og inde- og udeklima

Energiforbrug og inde- og udeklima er angivet i tabelform dag for dag. Døgnmiddel energiforbrug, solindfald og temperaturer er baseret på perioden fra midnat til midnat. De enkelte parametre er forklaret nedenfor. På grund af dataudfald i perioden 4-6/2, er værdier et gennemsnit af energiforbrug mm. for de 3 dage.

Total = Gasforbrug omregnet til energiindhold ved brug af nedre brændværdi (11 kWh/m³)

Rumvarme = Nettoenergiforbrug til rumopvarmning (inkl. varmetab ved varmefordeling)

VBV = Nettoenergiforbrug til varmt brugsvand (ekskl. varmetab fra varmtvandsbeholder)

Tab = Røgtab fra gaskedel, varmetab fra gaskedel, varmetab fra varmtvandsbeholder, varmetab fra tilslutningsrør mellem kedel og varmtvandsbeholder og fra kedel til målepunkt for rumvarme-energimåler samt varmetab ved cirkulation af varmt brugsvand (kun efter energirenoeringen). En del af dette tab vil kunne nyttiggøres til rumopvarmning.

T_i og T_u = hhv. inde- og udetemperatur.

Solindfald på vandret = Globalstråling på vandret, akkumuleret på basis af gennemsnitsværdier for solbestrålingsstyrken i døgnets timer og angivet i kWh/m².

El, total = Det totale elforbrug (indikator for størrelsen af det interne varmetilskud)

Måleresultater før energirenoeringen (vinterperiode):

Dag	Total [kWh]	Rum varme [kWh]	VBV [kWh]	Tab [kWh]	T _i [°C]	T _u [°C]	T _i - T _u [°C]	Solindfald på vandret [kWh/m ²]	El, total [kWh]
1.1.06	122	97	1	24	20,4	1,5	18,9	0,2	23
2.1.06	122	96	4	22	20,8	1,0	19,8	0,3	21
3.1.06	127	98	4	25	20,9	-1,1	21,9	0,4	36
4.1.06	129	101	6	22	21,0	-0,6	21,6	0,4	26
5.1.06	128	102	3	23	20,5	1,7	18,8	0,1	17
6.1.06	127	102	4	21	20,2	1,4	18,8	0,1	18
7.1.06	126	99	5	22	20,7	1,2	19,5	0,1	23
8.1.06	136	104	7	25	20,6	-0,2	20,8	0,9	30
9.1.06	135	106	5	24	19,9	-2,7	22,7	0,9	16
10.1.06	138	109	3	26	19,3	-1,4	20,6	0,3	16
11.1.06	131	104	5	22	19,4	2,4	17,1	0,2	18
12.1.06	125	98	4	23	20,2	1,8	18,4	0,3	16
13.1.06	122	94	5	23	20,6	1,1	19,5	0,4	38
14.1.06	125	97	4	24	20,1	0,7	19,4	0,5	28
15.1.06	122	96	4	22	20,8	-0,1	20,9	0,9	39
16.1.06	133	104	4	25	19,6	-2,0	21,6	0,9	26
17.1.06	133	101	4	28	19,6	-1,9	21,5	0,8	15
18.1.06	132	104	4	24	19,4	-0,3	19,7	0,2	14
19.1.06	131	101	5	25	19,4	-1,0	20,4	0,4	16
20.1.06	126	100	3	23	20,0	-1,1	21,0	0,2	16
21.1.06	129	93	9	27	20,6	-0,4	21,1	0,3	20
22.1.06	121	90	8	23	21,1	-4,4	25,5	1,1	18
23.1.06	138	107	7	24	20,1	-5,6	25,7	1,2	27
24.1.06	143	112	3	28	18,6	-3,9	22,5	0,9	30
25.1.06	131	104	3	24	19,2	-0,6	19,8	0,4	23
26.1.06	130	102	4	24	20,4	-0,5	20,9	1,1	29
27.1.06	136	106	3	27	19,7	1,5	18,2	1,4	27
28.1.06	127	99	5	23	20,4	-4,1	24,5	0,9	18
29.1.06	129	93	11	25	21,3	-1,1	22,4	0,5	32
30.1.06	132	101	8	23	20,7	-0,5	21,2	0,6	26
31.1.06	129	101	4	24	20,2	-0,2	20,4	1,4	10
1.2.06	131	103	3	25	19,4	0,8	18,5	0,5	12
2.2.06	123	99	1	23	19,8	1,4	18,3	0,6	14
3.2.06	124	98	4	22	20,6	0,9	19,7	0,8	16
4.2.06	132	99	9	24	20,6	-1,2	21,8	1,6	16
5.2.06	128	99	6	23	20,0	-1,7	21,8	1,2	20
6.2.06	131	103	5	23	19,7	-0,7	20,4	0,4	22
7.2.06	123	95	3	25	19,8	3,6	16,2	1,2	17
8.2.06	127	97	3	27	20,1	2,7	17,4	0,7	16
9.2.06	122	94	4	24	20,2	1,3	18,9	0,6	15
10.2.06	124	94	8	22	20,5	1,7	18,8	1,6	25
11.2.06	121	93	5	23	21,2	-0,3	21,5	1,6	35
12.2.06	128	99	7	22	20,8	-1,8	22,6	1,6	28
13.2.06	126	99	3	24	20,5	2,6	18,0	0,4	22
14.2.06	123	94	5	24	20,4	1,1	19,3	1,9	14

15.2.06	131	102	3	26	20,0	1,0	19,0	0,4	27
16.2.06	132	101	4	27	19,8	2,9	16,9	0,5	14
17.2.06	124	90	7	27	20,1	2,3	17,8	0,4	17
18.2.06	117	87	6	24	21,3	3,7	17,6	0,4	31
19.2.06	128	95	7	26	20,7	2,9	17,8	0,7	21
20.2.06	124	96	4	24	20,2	2,4	17,9	0,2	14
21.2.06	124	98	4	22	20,2	1,8	18,4	0,4	16
22.2.06	128	101	5	22	20,1	0,2	19,9	1,4	15
23.2.06	135	100	9	26	20,1	0,9	19,1	0,6	23
24.2.06	126	97	6	23	20,9	1,4	19,5	2,4	23
25.2.06	128	99	6	23	20,2	0,3	19,8	0,8	27
26.2.06	123	96	3	24	20,4	-0,6	21,0	2,8	12
27.2.06	128	99	4	25	19,9	-1,3	21,2	2,4	12
28.2.06	126	95	3	28	20,1	-0,3	20,4	0,5	19
Sum / middel	7555	5843	286	1426	20,2	0,1	20,1	47	1248

Måleresultater før energirenoeringen (sommerperiode):

1.8.06	34	21	3	10	25,8	22,9	2,9	6,4	12
2.8.06	36	23	3	10	25,1	19,1	6,0	3,0	17
3.8.06	35	22	3	10	24,2	19,1	5,1	5,2	11
4.8.06	35	23	2	10	24,4	20,6	3,9	5,8	9
5.8.06	31	21	2	8	25,1	21,2	3,9	5,9	10
6.8.06	32	20	3	9	25,5	21,9	3,6	6,2	14
7.8.06	31	21	2	8	26,0	21,7	4,3	6,0	10
8.8.06	31	20	2	9	25,7	20,7	4,9	6,3	11
9.8.06	32	21	2	9	24,5	19,6	4,9	3,8	10
10.8.06	32	21	2	9	24,2	19,1	5,2	4,7	9
11.8.06	26	17	3	6	23,4	17,3	6,1	2,6	16
12.8.06	25	16	2	7	22,7	16,7	6,0	1,9	10
13.8.06	23	17	0	6	21,9	16,3	5,7	1,4	4
14.8.06	24	17	0	7	21,8	16,9	5,0	3,2	4
15.8.06	25	18	0	7	21,6	16,8	4,8	2,5	4
16.8.06	25	18	0	7	22,7	19,1	3,6	5,8	4
17.8.06	21	16	0	5	23,3	18,9	4,4	3,2	4
18.8.06	20	15	0	5	23,6	20,2	3,4	4,2	4
19.8.06	19	14	0	5	24,2	20,9	3,4	5,1	4
20.8.06	18	14	0	4	24,2	19,6	4,6	3,2	4
21.8.06	19	14	0	5	24,1	19,1	5,0	4,8	4
22.8.06	19	14	0	5	24,0	18,9	5,1	4,3	4
23.8.06	19	15	0	4	23,6	17,6	6,0	2,8	4
24.8.06	20	15	0	5	23,4	17,7	5,7	5,3	4
25.8.06	22	15	0	7	23,2	16,8	6,4	3,3	4
26.8.06	19	15	1	3	23,1	18,5	4,6	2,4	6
27.8.06	20	15	0	5	22,4	16,9	5,6	2,1	4
28.8.06	20	15	0	5	22,3	16,8	5,5	4,3	4
29.8.06	21	16	0	5	21,6	14,6	7,1	1,3	4
30.8.06	22	17	0	5	20,9	15,3	5,6	3,4	4
31.8.06	22	16	0	6	21,5	16,7	4,8	3,9	12

Måleresultater efter energireoveringen:

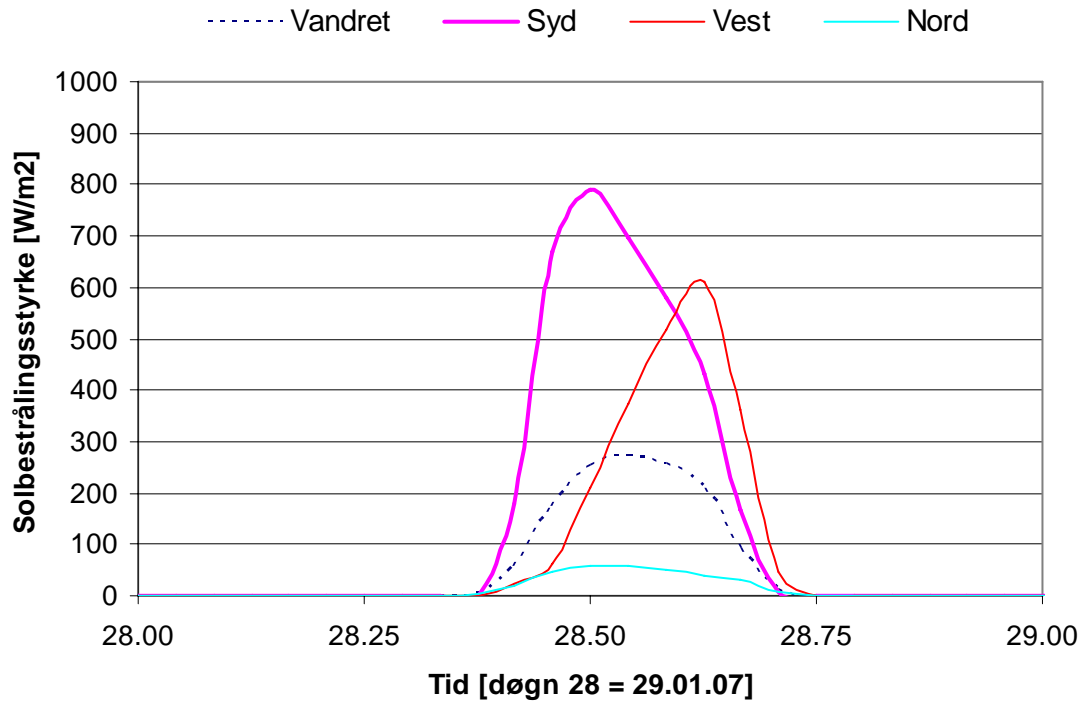
Dag	Total [kWh]	Rum varme [kWh]	VBV [kWh]	Tab [kWh]	T _i [°C]	T _u [°C]	T _i - T _u [°C]	Solindfald på vandret [kWh/m ²]	El, total [kWh]
1.1.07	52	31	6	15	22.1	7.2	14.9	0.3	25
2.1.07	61	39	3	19	21.6	5.3	16.3	0.5	21
3.1.07	62	39	5	18	21.9	5.4	16.4	0.5	23
4.1.07	58	37	3	18	22.0	7.2	14.8	0.2	20
5.1.07	66	41	5	20	22.4	6.9	15.4	0.5	20
6.1.07	64	43	3	18	22.4	6.4	16.1	0.3	22
7.1.07	66	43	3	20	22.2	6.2	16.0	0.4	22
8.1.07	62	41	3	18	22.3	6.5	15.8	0.1	20
9.1.07	62	39	3	20	22.3	8.5	13.8	0.1	19
10.1.07	58	36	5	17	22.6	8.7	13.9	0.0	17
11.1.07	62	40	2	20	22.2	5.7	16.5	0.0	16
12.1.07	63	40	3	20	22.2	7.4	14.8	0.4	21
13.1.07	57	35	4	18	22.5	8.5	14.0	0.5	21
14.1.07	58	37	4	17	22.5	7.1	15.4	0.8	23
15.1.07	64	41	3	20	22.5	6.8	15.7	0.3	16
16.1.07	63	40	3	20	22.4	5.9	16.5	0.1	18
17.1.07	62	38	4	20	22.4	6.8	15.7	0.1	17
18.1.07	63	38	3	22	22.1	5.7	16.5	0.1	17
19.1.07	64	41	4	19	22.1	5.4	16.8	0.8	18
20.1.07	66	37	7	22	22.4	6.1	16.3	0.2	30
21.1.07	68	40	6	22	22.4	4.6	17.8	0.3	28
22.1.07	69	46	2	21	21.9	-0.7	22.7	0.7	16
23.1.07	87	59	3	25	21.5	-3.4	24.9	0.4	24
24.1.07	91	62	3	26	21.6	-3.7	25.2	0.4	22
25.1.07	92	59	5	28	21.6	-5.3	26.9	1.3	19
26.1.07	82	55	2	25	21.5	1.2	20.3	0.4	16
27.1.07	83	54	4	25	21.7	-0.2	22.0	1.2	15
28.1.07	75	48	4	23	21.8	4.1	17.7	0.2	30
29.1.07	69	43	3	23	22.2	2.3	19.9	1.3	16
30.1.07	68	41	5	22	22.3	6.3	16.0	0.8	17
31.1.07	65	39	3	23	22.3	5.6	16.7	0.1	15
1.2.07	70	42	5	23	22.2	4.5	17.7	0.9	17
2.2.07	66	40	4	22	22.3	5.8	16.5	0.2	17
3.2.07	65	38	7	20	22.7	5.3	17.4	1.5	31
4.2.07	65	40	4	21	22.4	4.8	17.6	0.9	16
5.2.07	65	40	4	21	22.3	3.9	18.4	0.9	16
6.2.07	65	40	4	21	22.0	1.7	20.3	0.9	16
7.2.07	70	41	4	25	21.9	1.3	20.5	1.1	17
8.2.07	76	45	5	26	21.8	0.4	21.3	1.1	18
9.2.07	76	46	3	27	21.7	-0.5	22.1	1.0	22
10.2.07	87	53	6	28	21.6	-1.0	22.6	0.8	30
11.2.07	86	53	3	30	21.4	-0.6	22.0	0.5	17
12.2.07	84	50	4	30	21.4	1.3	20.1	0.1	16
13.2.07	78	48	4	26	21.7	2.9	18.8	0.1	15

14.2.07	73	43	4	26	21.9	3.5	18.4	0.2	17
15.2.07	70	42	3	25	22.1	3.3	18.8	0.6	17
16.2.07	75	42	6	27	22.2	3.4	18.8	0.1	27
17.2.07	70	42	3	25	22.1	3.5	18.6	1.2	17
18.2.07	71	40	6	25	22.0	2.5	19.5	1.2	24
19.2.07	74	43	4	27	21.9	2.7	19.3	0.0	14
20.2.07	66	38	4	24	22.0	4.0	18.0	0.7	15
21.2.07	73	43	2	28	22.0	1.8	20.2	0.0	17
22.2.07	83	51	3	29	21.6	-0.1	21.7	0.3	17
23.2.07	92	56	5	31	21.4	-0.9	22.4	0.4	11
24.2.07	95	54	5	36	21.2	-0.8	22.0	0.2	25
25.2.07	80	44	5	31	21.7	2.4	19.3	0.7	24
26.2.07	74	41	6	27	21.8	3.6	18.2	0.3	16
27.2.07	74	44	3	27	21.8	2.7	19.1	0.8	15
28.2.07	73	39	3	31	22.0	4.6	17.4	0.2	16
Sum / Middel	4176	2560	235	1381	22.0	3.6	18.4	31	1142

Solindfald

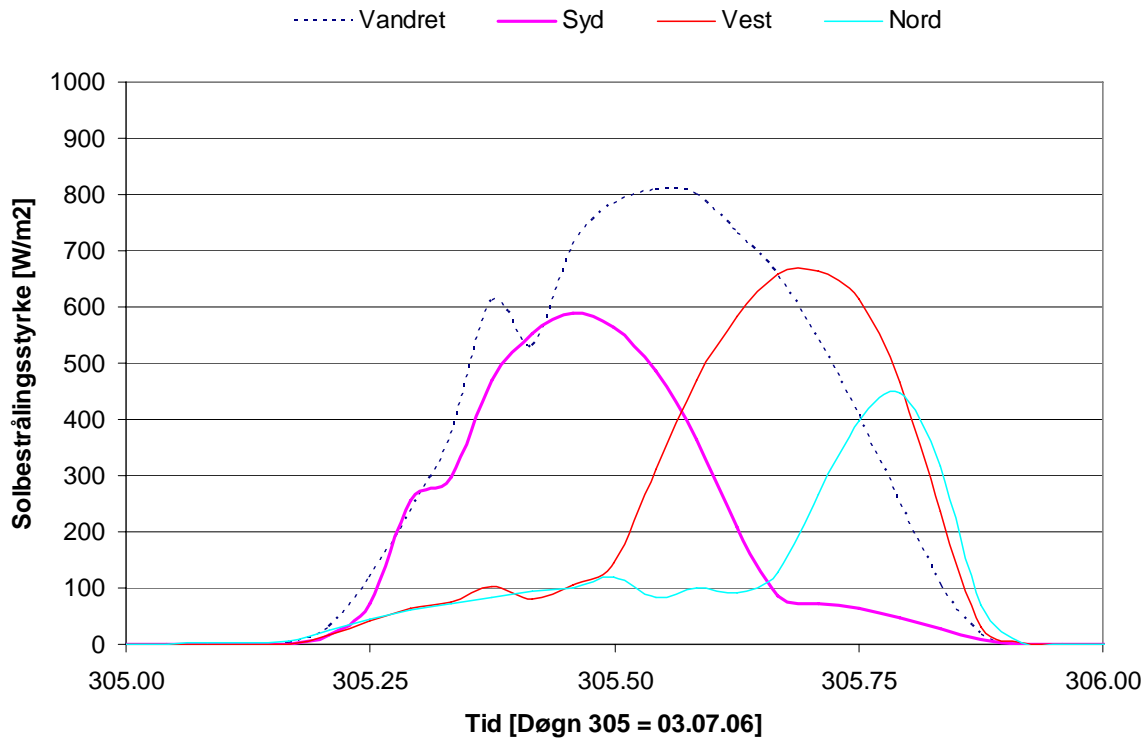
Solbestrålingsstyrken for henholdsvis en solrig vinterdag, forårsdag og sommerdag fremgår af figurerne. Der er ikke målt på øst, da huset ikke har vinduer i denne gavl. Sydfacaden vender ikke stik syd, men er orienteret 30° mod øst, dvs. syd-sydøst.

Det ses af figuren at solindstrålingen om vinteren på syd, helt som forventet, er klart større end på vandret. Det ses også at der solen først ramme vestfacaden sidst på formiddagen.



Solbestrålingsstyrke på vandet og husets facader og gavle for en typisk solrig vinterdag (29.01.07).

For den typiske solrige sommerdag er billedet væsentligt anderledes, idet solbestrålingsstyrken på vandret er betydeligt større pga. solhøjden. Det ses også at nordfacaden får direkte solstråling i en længere periode sidst på dagen, da den reelt er orienteret mod nord-nordvest.



Solbestrålingsstyrke på vandret og husets facader og gavle for en typisk solrig sommerdag (03.07.06).

Effektivitet af varmegenvinding

Ventilationsanlæggets effektivitet fremgår nedenfor i form af temperaturvirkningsgradens variation over måleperioden. De enkelte lufttemperaturer er også vist for en udvalgt uge (22.02-28.02-2007). Faldet i virkningsgrad midt i perioden skyldes ekstremt lave udetemperaturer og deraf kortvarig tilisning af varmeveksler.

