

BYG·DTU

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET



Jacob Birck Laustsen
Svend Svendsen

Bestemmelse af de varmetekniske egenskaber af forsatsvinduer og gl. koblede vinduer - eksperimentelt og beregnet

Sagsrapport
BYG· DTU SR03-17
2003
ISSN 1601-8605

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	4
2	Beskrivelse af de undersøgte vinduer	4
3	Måling af U-værdi i guarded hot box	6
3.1	Resultater af hot box målinger	8
4	Beregninger.....	9
4.1	Beregningsmetode til bestemmelse af U-værdi	9
4.2	Randbetingelser.....	10
4.3	Energtilskuddet	10
4.4	Sprosser.....	10
4.5	Resultater af beregninger	11
5	Sammenligning af målte og beregnede U-værdier	12
6	Konklusion.....	13
Bilag 1.	Measurement report for 1850 coupled window – one glazing bar.....	15
Bilag 2.	Measurement report for 1850 coupled window – multi glazing bars	17
Bilag 3.	Measurement report for 1920 double window – one glazing bar	19

Forord

Nærværende rapport beskriver arbejdet udført i forbindelse med projektet ”*Bestemmelse af de varmetekniske egenskaber af forsatsvinduer og gl. koblede vinduer – eksperimentelt og beregnet*”. Projektet er gennemført på Danmarks tekniske Universitet, BYG•DTU med støtte fra Raadvad Centret.

Formålet med projektet er at foretage en sammenligning af målte og beregnede U-værdier for ”gamle” dannebrogsvinduer med hhv. forsatsvinduer og koblede rammer med henblik på at vurdere om beregningsmetoden beskrevet i Tekniske bestemmelser for forsatsvinduer, bilag 4 giver rigtige resultater.

1 Indledning

I forbindelse med projektet "Udredning vedrørende energimærkning af forsatsvinduer, glasfacader og ovenlys", Jnr.: 75661/00-0022 udført under Projekt Vindue, blev der udviklet en beregningsmetode /8/ til bestemmelse af energimæssige egenskaber for forsatsvinduer. Beregningsmetoden er beskrevet i bilag 4 i Energimærkningsordningens "Tekniske Bestemmelser for forsatsvinduer".

Baggrunden for at udvikle en ny metode var, at standarden prEN ISO 10077-2 /6/ som anvendes til "almindelige" vinduer med termoruder ikke kan anvendes til vinduer med koblede rammer eller forsatsvinduer pga. den store glasafstand.

Beregningsmetoden er endnu ikke dokumenteret på tilfredsstillende vis, men tager udelukkende udgangspunkt i forskellige standarders beregningsforslag og metoder. Der er derfor behov for en eksperimentel og beregningsmæssig sammenligning af resultater. Ved at sammenligne beregnede U-værdier med U-værdier målt i en guarded hot box skal det vurderes om beregningsmetoden giver pålidelige resultater. Vinduerne som indgår i undersøgelsen er kopier af gamle typiske dannebrogsvinduer fra henholdsvis 1850 og 1920.

2 Beskrivelse af de undersøgte vinduer

Der er udført målinger og beregninger af tre forskellige dannebrogsvinduer med koblede rammer og forsatsvindue. Selve vinduerne er opbygget præcist som gamle traditionelle dannebrogsvinduer med fire felter fra hhv. 1850 og 1920. Alle vinduerne er lavet af træ og har de ydre mål (b x h): 1230 x 1480 mm, som er CEN standardstørrelsen. Vinduerne er vist og beskrevet i Figur 1 til Figur 3.

Vindue 1.1 og vindue 1.2: 1850, med koblede rammer af træ

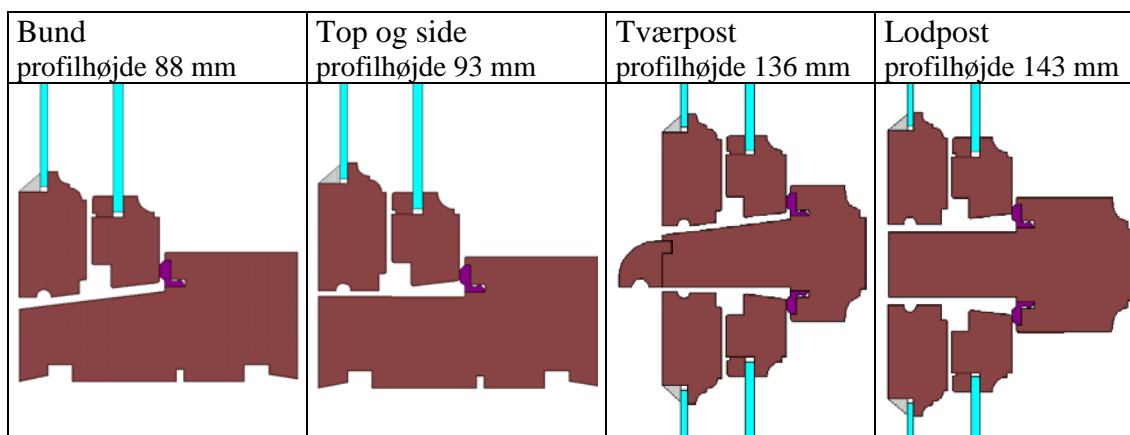
Vindue 1.1 og 1.2 er identiske bortset fra at 1.1 har en sprosse i de nederste felter mens 1.2 er småsprosset.

Rude:

3 mm alm. float glas

27 mm hulrum (luft)

4 mm float glas med hård lavemissionsbelægning



Figur 1. Profiler i vindue 1.1 og vindue 1.2 som har koblede rammer

Vindue 2: 1920 med forsatsvindue.

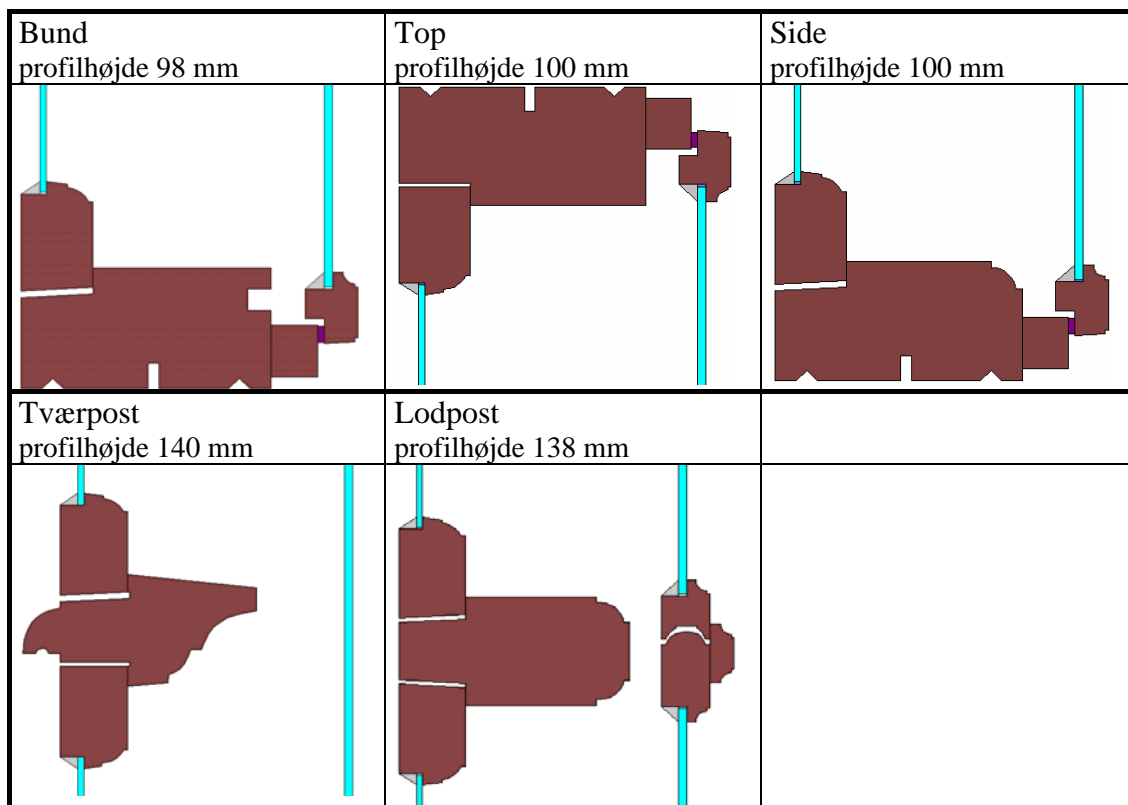
Rude:

3 mm alm. float glas

131 mm hulrum (luft)

4 mm float glas med hård lavemissionsbelægning.

Vindue 2 har en sprosse i de nederste felter. Forsatsvinduet er kun delt i to felter som går fra bund til top. Det har således en lodpost men ingen tværpost (se Figur 2).

**Figur 2. Profiler i vindue 2 med forsatsvindue.**

Dannebrog, en sprosse	Dannebrog, Småsprosset
Vindue 1.1 og vindue 2	Vindue 1.2

Figur 3. Vinduernes udformning. Ydre mål (b x h) : 1230 x 1480 mm

3 Måling af U-værdi i guarded hot box

Der er foretaget målinger af vinduernes U-værdi i en guarded hot box i overensstemmelse med ISO 12567-1 /3/. Foto og skitse af hot boxen er vist i Figur 4.

Princippet i hot boxen er: Hot boxen består af en kold kasse hvor, temperaturen holdes konstant på 0 °C og en varm kasse (guard kassen) hvor temperaturen holdes konstant 20 °C. I mellem de to kasser monteres vinduet i en skillevæg af isoleringsmateriale. Uden på vinduet, på den varme side, monteres målekassen. I målekassen sidder temperaturfølere og et elektrisk varmepanel som opvarmer luften til 20 °C. Da der er samme temperatur på begge sider af målekassen, er der ingen varmestrøm hen over denne, dvs. at alt varmetab fra målekassen vil ske ud gennem vinduet. Den tilførte effekt til el-panelet svarer derfor til varmetabet ud gennem vinduet og er således udtryk for vinduets U-værdi. Ved at registrere den tilførte effekt til el-panelet fås hermed vinduets U-værdi.

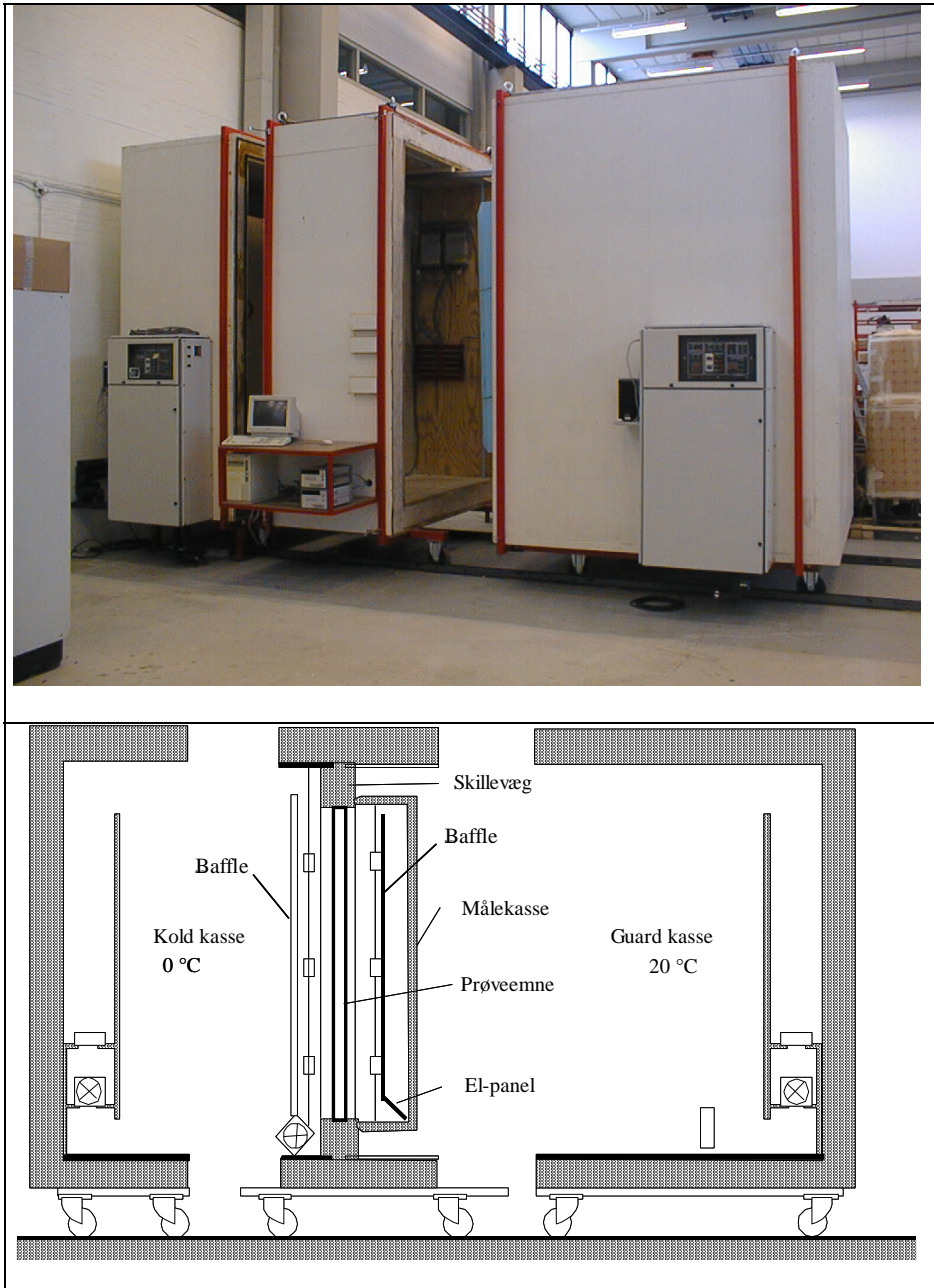
Under målingerne er der etableret en samlet overgangsmodstand (indvendig + udvendig overgangsmodstand) på ca. 0,17 m²K/W vha. ventilatorer som blæser langs vinduets overflade.

Hot boxen er forud for målingerne kalibreret i henhold til ISO 12567-1.

For hver måling er der udført en trykprøvning af vinduet monteret i hot boxen for at undersøge, om det er tilstrækkeligt tæt for at U-værdimålingen bliver korrekt.

Utætheden skal være under 1 % . Alle tre vinduer var tætte nok til at opfylde trykkra-
vet .

For vindue 2 blev der foretaget en ekstra trykprøvning med forsatsrammerne åbnet men de yderste rammer lukket. Denne viste, at vinduesrammerne er meget utætte, hvilket skyldes at der ikke er monteret tætningslister mellem rammer og karm. På forsatsrammerne er der tætningslister, som tætnet vinduet indadtil.



Figur 4. Foto og skitse af Guarded hot box.

3.1 Resultater af hot box målinger

Resultaterne af hot box målingerne er vist i Tabel 1. Ifølge [Duer, K. /1/] er der en usikkerhed på målingerne på 5-6 %.

Tabel 1. Målte U-værdier for de tre vindueskonfigurationer. (W/m^2K). De anvendte værdier er fremhævet med fed.

Vindue id og type	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4
1.1 Koblet En sprosse	2,18± 0,12	2,16± 0,12	1,83 ± 0,10 a)	1,83 ± 0,10 a), b)
1.2 Koblet Småsprosset	1,87± 0,10 a)			
2 Forsatsvindue En sprosse	1,85± 0,10 a)			

a) : Med tape

b) : Pudset

De første målinger af vindue 1.1 gav væsentligt højere U-værdier end forventet. Ved nærmere undersøgelse viste det sig at skyldes utætheder. For at undgå kondensproblemer i mellemrummet mellem de to glaslag, er der ikke nogen tætningsliste mellem de udvendige rammer og de koblede rammer, hvilket medfører at ruderne er svagt ventilerede med udeluft.

Som tidligere nævnt er der monteret en ventilator i den kolde side over vinduet, som blæser luft hen over vinduets overflade for at skabe den ønskede udvendige overgangsisolans på $0,04 m^2K/W$. Pga. de små sprækker mellem rammer og karm er det sandsynligt, at der blæses luft ind gennem vinduet mellem de to glaslag, hvilket forringer U-værdien. Derfor blev der foretaget målinger, hvor åbningerne var lukkede med tape for at forhindre luftgennemstrømning. Dette resulterede i en væsentlig forbedring af U-værdien (fra 2,18 til 1,83 W/m^2K), hvilket indikerer, at utætheder mod udeklimaet har relativ stor betydning for de energimæssige egenskaber. Det samme gælder for forsatsvinduet.

Den konstante luftstrøm som ventilatoren skaber inde i hot boxen svarer dog ikke altid til det rigtige udeklima, hvor vindforholdene varierer.

Alligevel må det anbefales, at der monteres tætningslister mellem de udvendige rammer og de koblede rammer for vindue nr. 1.1 og 1.2 og mellem de udvendige rammer og karm for vindue nr. 2. For at undgå kondens i hulrummet anbefales det dog, at bevare en mindre åbning ved at undlade tætningsliste et par cm i top og bund.

Da det i de efterfølgende U-værdiberegninger antages, at vinduerne er lufttætte (åbninger < 2 mm regnes som uventilerede), er det besluttet, at anvende målingerne hvor spalterne er lukket med tape (værdierne fremhævet med **fed**).

Det fremgår af resultaterne at U-værdien for de tre vinduer ligger ganske tæt. U-værdien for vindue 1.2 er $0,04 W/m^2K$ højere end for vindue 1.1, på tross af at den eneste forskel er, at vindue 1.2 er småsprosset. Dette indikerer, at mange små sprosser kan have en forringende effekt på den samlede U-værdi.

For vindue nr. 1. er der foretaget en ekstra måling efter pudsning af alle glasoverflader. Det fremgår af resultaterne at det snavs der måtte være ikke har indflydelse på U-værdien.

4 Beregninger

Vha. simuleringsprogrammet Therm /2/ er der foretaget beregninger af U-værdien af de enkelte ramme/karmprofiler som indgår i de tre vinduer og herudfra er der lavet konsekvensberegninger for hele vinduet.

Sollystransmittansen, τ , og den totale solenergitransmittans, g , for ruderne er beregnet vha. af programmerne Glas 02 /9/ og WIS /5/ og er således gældende for standardruder i Pilkingtons katalog.

Udover de nævnte tre vindues konfigurationer er der gennemført beregninger for en række andre vindueskonfigurationer, herunder forsatsvinduer med to-lags energirude. Alle beregninger er dokumenteret i datablade som findes som vedlagte bilag.

4.1 Beregningsmetode til bestemmelse af U-værdi

Grundlaget for at udvikle en ny beregningsmetode for forsatsvinduer var at den traditionelle metode beskrevet i prEN ISO 10077-2 til beregning af vinduers transmissionskoefficient ikke kan bruges direkte til vinduer med forsatsvinduer eller koblede rammer pga. den store glasafstand.

prEN ISO 10077-2 foreskriver en beregningsmetode til bestemmelse af energimærkningsdata, hvor vinduets totale U-værdi baseres på en center U-værdi for ruden, en linitabsværdi, Ψ_{kant} , for rude-ramme samlingen, U-værdien for ramme/karm og U-værdien for poster.

I henhold til prEN ISO 10077-2 beregnes U-værdien for ramme/karm (og post) ved at beregne varmemestrømmen gennem et udsnit af ramme/karm og rude, hvor ruden er erstattet med et isoleringspanel med fast varmeledningsevne og derefter trække den en-dimensionale varmemestrøm gennem panelet fra den samlede varmemestrøm gennem hele udsnittet. Herefter beregnes Ψ -værdien ved at indsætte den aktuelle rude inklusiv kantkonstruktion. Ψ -værdien udgør det resterende varmetab når varmemestrømmen for ramme/karm og den en-dimensionale varmemestrøm for ruden trækkes fra varmemestrømmen gennem det samlede udsnit.

Metoden beskrevet i standarden kan ikke anvendes ved beregninger på forsatsvinduer, da der vil opstå en skæv fordeling mellem linitabet og U-værdien for ramme/karmkonstruktionen.

Dette skyldes, at med den store glasafstand vil et isoleringspanel indsat i stedet for ruden virke som isolering på oversiden af karmen, der derved vil få for lav en U-værdi. Derudover adskiller de undersøgte konstruktioner sig i designet en del fra et vindue med to-lags termorude, idet rudesystemerne opbygges uden kuldebro i form af afstandsprofil og vinduerne har derfor ikke en udpræget kuldebro i rudesystemet. I ”forsatsmetoden” er derfor valgt en anden fremgangsmåde, hvor Ψ -værdien overalt defineres som værende lig 0. Ramme/karmkonstruktionens U-værdi kan derfor be-

stemmes ud fra modellering af ramme/karmprofil og rudesystem samlet og dernæst fratække den en-dimensionale varmestrøm gennem rudesystemet.

I stedet for at erstatte ruden med et isoleringspanel er varmestrømmen gennem rudedelen modelleret ved at tillægge de flader, der vender mod hulrummet en varmeoverføringskoefficient baseret den på forhånd kendte center U-værdi for ruden. Således regnes der på en varmebalance mellem de to lag og ramme/karmens indvendige overflade, som skal være i ligevægt. Dette foregår ved iteration idet de indvendige overfladetemperaturer justeres indtil varmestrømmen er den samme ind og ud gennem vinduet. Proceduren svarer til den i EN 6946 /10/ afsnit 5 beskrevne metode svarende til hulrum med stor tykkelse.

Metoden kræver at arealforholdet mellem rude og ramme/karm, i udsnittet der regnes på, svarer til arealforholdet i det konkrete vindue. I beregningsmetoden er det valgt at anvende et rudeudsnit på 190 mm som standard. Dette svarer relativt godt til dannebrogsvinduer i standardstørrelsen. Beregningsprincippet medfører, at ramme/karmkonstruktionernes U-værdi afhænger af den aktuelle rude. Metoden er nærmere beskrevet i Energiforsatsgruppens ”Energimærkning. Tekniske bestemmelser for forsatsvinduer” 2. udkast januar 2001.

4.2 Randbetingelser

Der anvendes følgende randbetingelser ifølge prEN ISO 10077-2.

$$T_{\text{inde}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ude}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_u = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_i = 7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_r = 5 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ (for reduceret stråling)}$$

$$q = 0 \text{ (adiabater i top og bund)}$$

Lukkede hulrum og hulrum med spaltebredde < 2mm regnes som uventilerede. Hulrum med forbindelse til det fri med spaltebredde < 10 mm regnes som let ventilerede.

4.3 Energitilskuddet

Vinduers energitilskud defineres som den tilførte solenergi minus varmetabet gennem vinduet i fyringssæsonen. Energitilskuddet, E, for en typisk fordeling af vinduer i et hus er bestemt til følgende udtryk:

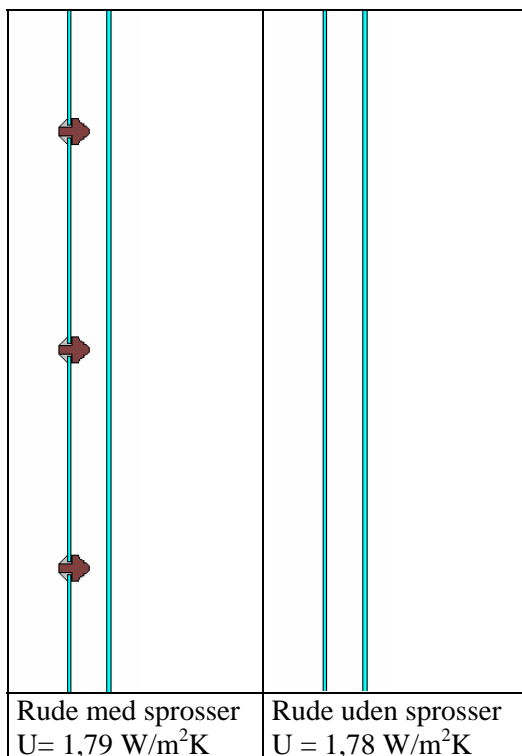
$$E = 196,4 \cdot g - 90,36 \cdot U \text{ ,}$$

hvor g-værdien angiver hvor stor en del af solindfaldet der transmitteres gennem vinduet og U-værdien angiver vinduets samlede varmetab ud gennem vinduet. Et stort energitilskud, som er ønskeligt i opvarmningsdominerede bygninger i dansk klima, opnås således for høje g-værdier og lave U-værdier.

4.4 Sprosser

For at vurdere om sprosser har indflydelse på den samlede U-værdi for vinduet er der foretaget beregninger i Therm af et rudeudsnit med og uden sprosser, som vist i Figur 5. Rudens U-værdi er beregnet i Glas 02 til 1,78 W/m²K. For at opnå denne U-værdi

er ruden modelleret i Therm ved at påføre overfladerne ind mod hulrummet en overgangsisolans, som er rudens samlede isolans minus de to glaslags isolans og den indvendige og udvendige overgangsisolans.



Figur 5. Udsnit af rude (koblede rammer, 1850) som modelleret i Therm med sprosser og uden sprosser.

Ruden med sprosser er modelleret med ca. 17 cm mellem hver sprosse. Resultaterne fremgår af Figur 5. Det ses, at der kun er ganske lille forskel mellem de beregnede U-værdier, og det konkluderes, at den termiske effekt af sprosserne er for lille i forhold til beregningsusikkerheden til at retfærdiggøre en medregning.

4.5 Resultater af beregninger

Resultaterne fra beregningerne er vist i Tabel 2

Tabel 2. Beregnede energimærkningsdata for de tre vinduer.

Vindue	Rude			Ramme/karm U-værdi ($\text{W/m}^2\text{K}$)					Vindue			
	τ	g	U $\text{W/m}^2\text{K}$	Bund	Top	Side	Lodpost	Tværpost	τ	g	U $\text{W/m}^2\text{K}$	E kWW/m^2
1.1	0,76	0,74	1,75	1,55	1,55	1,55	1,65	1,75	0,43	0,42	1,69	-70,8
1.2	0,76	0,74	1,75	1,55	1,55	1,55	1,65	1,75	0,39	0,38	1,69	-78,8
2	0,76	0,73	1,90	1,41	1,42	1,42	1,53	1,37	0,42	0,40	1,69	-73,9

5 Sammenligning af målte og beregnede U-værdier

I Tabel 3 er de målte og beregnede U-værdier vist for de tre vinduer.

Tabel 3. Målte og beregnede U-værdier for de tre vinduer (W/m²K).

Vindue nr.	Målt	Beregnet	Forskel
1.1 1850, Koblet, en sprosse	1,83	1,69	7,7 %
1.2 1850, Koblet, småsprosset	1,87	1,69	9,6 %
2 1920, Forsatsvindue	1,85	1,69	8,6 %

Det fremgår af Tabel 3, at de beregnede værdier generelt er noget lavere end de målte og ikke inden for usikkerheden på 5-6 % for hot box målingerne. Dette kan skyldes at beregningsmetoden giver for optimistiske værdier. Pga. den store glasafstand vil der ske komplicerede konvektive luftstrømninger inde i vinduerne, som det ikke er muligt at tage fuldstændig højde for i Therm, hvilket kan give for lave værdier. Andre fejlkilder kan være at der i beregningerne er anvendt standard materialeleværdier, som kan afvige fra de faktiske.

De anvendte U-værdier for ruderne er som nævnt beregnet vha. Glas 02, som kun kan regne på glasafstande på op til 60 mm. Værdier for større afstande er estimeret vha. WIS, som kan regne på større afstande, men det vurderes at der nogen usikkerhed forbundet med de anvendte U-værdier for ruderne. Der er i beregningerne ikke taget ikke hensyn til højden af ruden, som ellers kan være afgørende særligt for ruder med stor glasafstand, hvor bredde/højde forholdet er større.

I forbindelse med målingerne i hot boxen blev det erfaret, at den udvendige luftstrøm forårsaget af ventilatoren har stor indflydelse på vinduets U-værdi, hvis der er utætheder. Ved at tætte diverse sprækker reduceredes U-værdien fra 2,16 til 1,83 W/m²K, altså en klar forbedring. Hvis vinduerne havde været fuldstændig lufttætte, som det antages i beregningerne, var de målte U-værdier måske blevet lavere.

6 Konklusion

Der er i forbindelse med projektet udført målinger og beregninger af U-værdier for tre dannebrogsvinduer af træ bygget som traditionelle vinduer fra 1850 og 1920. Vinduerne er monteret med hhv. koblede rammer og forsatsvinduer. Målingerne er foretaget i en guarded hot box efter standarden ISO 12567-1. Beregningerne er foretaget efter den endnu ikke verificerede beregningsmetode beskrevet i Tekniske bestemmelser for forsatsvinduer.

De målte U-værdier er noget højere end de beregnede. Det har inden for projektets rammer ikke været muligt, entydigt at finde frem til de væsentligste årsager til afvigelserne, men det kan bl.a. skyldes at beregningsmetoden ikke er detaljeret nok og derfor giver for optimistiske resultater. En anden mulig årsag kan være, at den påførte luftstrøm på ydersiden af vinduet, som skal simulere naturligt udeklima i hot boxen medfører en svag ventilation ind gennem vinduet, som der ikke tages højde for i beregningerne, hvor vinduerne regnes som lufttætte.

På baggrund af dette må det anbefales, at der gennemføres en mere detaljeret analyse af beregningsmetoden til bestemmelse af U-værdier for forsatsvinduer samt en nærmere undersøgelse af effekten af den påførte luftstrøm under hot box målinger af vinduer, som ikke er fuldstændig tætte.

Referencer

- /1/ Duer, K. Report R-045, Characterisation of advanced windows – Determination of thermal properties by measurements. Ph.d. thesis. 2000. Technical university of Denmark, Department of Buildings and Energy.
- /2/ THERM version 5.2: *A PC Program for Analyzing Two-Dimensional Heat Transfer Through Building Products*. Window and Daylighting Group, Building Technologies Program, Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, CA 94720 USA.
- /3/ ISO 12567-1: ” *Thermal performance of windows and doors – Determination of thermal transmittance by hot box method- Part 1: Complete windows and doors*” version 2000-09-01.
- /4/ Duer, K. SR-0030, Et energirenoveret dannebrogsvindues energimæssige egenskaber, 2000. Danmarks tekniske Universitet, BYG•DTU
- /5/ WIS, Advanced Windows Information System. TNO Building and Construction Research, The Netherlands, 1996.
- /6/ prEN ISO 10077-2 Windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance -Part 2: Numerical methods for frames, 2001
- /7/ EN410. Glass in building – Determination of luminous and solar characteristics of glazing.
- /8/ *Beregningsprocedure for de energimæssige forhold for forsatsvinduer*. 2001. Danmarks tekniske Universitet, BYG•DTU. <http://www.byg.dtu.dk/vinduer/>
- /9/ Glas 02, Pilkington Glas02.dk, version 2002©
- /10/ EN 6946 Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method, 1996

Bilag 1. Measurement report for 1850 coupled window – one glazing bar

Table 1. Window data (window 1.1).

Data element			Value
w	Frame width	m	0.088
d_{sur}	Surround panel thickness	m	0.17
A_{sp}	Area of window	m ²	1.820
A_{sur}	Area of surround panel	m ²	0.330
L	Perimeter length	m	5.42

Results

Measured thermal transmittance (*U value*)

The results of the measurements and the calculated U value are shown in table 2 and table 3

Table 2. Window measurement results (window 1.1).

Data element			Value
Cold temperatures - measured			
θ_{ce}	(air)	°C	-0.04
$\theta_{se,b}$	(baffle)	°C	0.12
$\theta_{se,p}$	(reveal temperature)	°C	0.18
$\theta_{se,sur}$	(surround panel temperature)	°C	0.18
Warm temperatures – measured			
θ_{ci}	(air)	°C	20.00
$\theta_{si,b}$	(baffle)	°C	19.43
$\theta_{si,sur}$	(surround panel temperature)	°C	18.72
Φ_{in}	(input power in hot box)	W	67.61

The effective emissivities were assumed to be $\varepsilon = 0.84$ for the glass surface; $\varepsilon = 0.95$ for the baffle surface; $\varepsilon = 0.92$ for the surround panel.

Table 3. Calculation of the thermal transmittance of the window (window 1.1).

Data element			Value	Remarks
$\theta_{me,sur}$	(mean temp. of surround panel)	°C	9.451	-
R_{sur}	(surround panel thermal resistance)	m ² K/W	4.109	figure 1
λ_{sur}	(conductivity of surround panel)	W/mK	0.035	-
ψ_{edge}	for w=0.125m	W/mK	0.003	table B.2*
$\Delta\theta_{s,sur}$	(temp. difference of surround panel)	K	18.543	-
$\Delta\theta_c$	(air temperature difference)	K	20.035	-
Φ_{in}	(input power to hot box)	W	67.611	-
Φ_{sur}	(surround panel heat flow)	W	1.487	(eq. 12)*
Φ_{edge}	(edge zone heat flow)	W	0.304	(eq. 10)*
q_{sp}	(heat flow density of specimen)	W/m ²	36.157	(eq. 11)*
F_{ci}	(convective fraction - warm side)	-	0.475	
F_{ce}	(convective fraction - cold side)	-	0.828	
$R_{s,tot}$	(total surface resistance)	m ² K/W	0.169	
θ_{ri}	(radiant temperature - warm side)	°C	19.426	(eq. A.3)*
θ_{re}	(radiant temperature - cold side)	°C	0.128	(eq. A.2)*
θ_{ni}	(environmental temp. - warm side)	°C	19.699	(eq. 7)*
θ_{ne}	(environmental temp. - cold side)	°C	-0.007	(eq. 7)*
$\Delta\theta_n$	(environmental temp. difference)	K	19.706	-
U_m	(measured U-value)	W/m ² K	1.835	(eq. 13)*
ΔU_m	(uncertainty of the measurement)	W/m ² K	0.120	
$R_{(s,tot),st}$		W/m ² K	0,17	European value
U_{st}	(standardised U-value)	W/m²K	1,830	(eq. 14)*

* Reference is given to ISO 12567-1, version 2000-09-01

Bilag 2. Measurement report for 1850 coupled window – multi glazing bars

Table 4. Window data (window 1.2).

Data element			Value
w	Frame width	m	0.088
d_{sur}	Surround panel thickness	m	0.17
A_{sp}	Area of window	m ²	1.820
A_{sur}	Area of surround panel	m ²	0.330
L	Perimeter length	m	5.42

Results

Measured thermal transmittance (*U value*)

The results of the measurements and the calculated U value are shown in Table 5 and Table 6

Table 5. Window measurement results (window 1.2).

Data element			Value
Cold temperatures - measured			
θ_{ce}	(air)	°C	-0.22
$\theta_{se,b}$	(baffle)	°C	0.04
$\theta_{se,p}$	(reveal temperature)	°C	0.00
$\theta_{se,sur}$	(surround panel temperature)	°C	0.00
Warm temperatures – measured			
θ_{ci}	(air)	°C	20.00
$\theta_{si,b}$	(baffle)	°C	19.41
$\theta_{si,sur}$	(surround panel temperature)	°C	18.69
Φ_{in}	(input power in hot box)	W	69.53

The effective emissivities were assumed to be $\varepsilon = 0.84$ for the glass surface; $\varepsilon = 0.95$ for the baffle surface; $\varepsilon = 0.92$ for the surround panel.

Table 6. Calculation of the thermal transmittance of the window (window 1.2).

Data element			Value	Remarks
$\theta_{me,sur}$	(mean temp. of surround panel)	°C	9.343	-
R_{sur}	(surround panel thermal resistance)	m ² K/W	4.105	figure 1
λ_{sur}	(conductivity of surround panel)	W/mK	0.035	-
ψ_{edge}	for w=0.125m	W/mK	0.003	table B.2*
$\Delta\theta_{s,sur}$	(temp. difference of surround panel)	K	18.684	-
$\Delta\theta_c$	(air temperature difference)	K	20.218	-
Φ_{in}	(input power to hot box)	W	69.532	-
Φ_{sur}	(surround panel heat flow)	W	1.500	(eq. 12)*
Φ_{edge}	(edge zone heat flow)	W	0.307	(eq. 10)*
q_{sp}	(heat flow density of specimen)	W/m ²	37.203	(eq. 11)*
F_{ci}	(convective fraction - warm side)	-	0.478	
F_{ce}	(convective fraction - cold side)	-	0.830	
$R_{s,tot}$	(total surface resistance)	m ² K/W	0,168	
θ_{ri}	(radiant temperature - warm side)	°C	19,409	(eq. A.3)*
θ_{re}	(radiant temperature - cold side)	°C	-0,039	(eq. A.2)*
θ_{ni}	(environmental temp. - warm side)	°C	19,691	(eq. 7)*
θ_{ne}	(environmental temp. - cold side)	°C	-0,188	(eq. 7)*
$\Delta\theta_n$	(environmental temp. difference)	K	19,879	-
U_m	(measured U-value)	W/m ² K	1,871	(eq. 13)*
ΔU_m	(uncertainty of the measurement)	W/m ² K	0,120	
$R_{(s,tot),st}$		W/m ² K	0,17	European value
U_{st}	(standardised U-value)	W/m²K	1,865	(eq. 14)*

* Reference is given to ISO 12567-1, version 2000-09-01

Bilag 3. Measurement report for 1920 double window – one glazing bar

Table 7. Window data (window 2).

Data element			Value
w	Frame width	m	0.098
d_{sur}	Surround panel thickness	m	0.17
A_{sp}	Area of window	m ²	1.820
A_{sur}	Area of surround panel	m ²	0.330
L	Perimeter length	m	5.42

Results

Measured thermal transmittance (*U value*)

The results of the measurements and the calculated U value are shown in Table 8 and Table 9

Table 8. Window measurement results (window 2).

Data element			Value
Cold temperatures - measured			
θ_{ce}	(air)	°C	-0.02
$\theta_{se,b}$	(baffle)	°C	0.14
$\theta_{se,p}$	(reveal temperature)	°C	0.28
$\theta_{se,sur}$	(surround panel temperature)	°C	0.28
Warm temperatures – measured			
θ_{ci}	(air)	°C	20.00
$\theta_{si,b}$	(baffle)	°C	19.21
$\theta_{si,sur}$	(surround panel temperature)	°C	18.29
Φ_{in}	(input power in hot box)	W	67.96

The effective emissivities were assumed to be $\varepsilon = 0.84$ for the glass surface; $\varepsilon = 0.95$ for the baffle surface; $\varepsilon = 0.92$ for the surround panel.

Table 9. Calculation of the thermal transmittance of the window (window 2).

Data element			Value	Remarks
$\theta_{me,sur}$	(mean temp. of surround panel)	°C	9.285	-
R_{sur}	(surround panel thermal resistance)	m ² K/W	4.102	figure 1
λ_{sur}	(conductivity of surround panel)	W/mK	0.035	-
ψ_{edge}	for w=0.125m	W/mK	0.003	table B.2*
$\Delta\theta_{s,sur}$	(temp. difference of surround panel)	K	18.014	-
$\Delta\theta_c$	(air temperature difference)	K	20.023	-
Φ_{in}	(input power to hot box)	W	67.964	-
Φ_{sur}	(surround panel heat flow)	W	1.447	(eq. 12)*
Φ_{edge}	(edge zone heat flow)	W	0.304	(eq. 10)*
q_{sp}	(heat flow density of specimen)	W/m ²	36.373	(eq. 11)*
F_{ci}	(convective fraction - warm side)	-	0.476	
F_{ce}	(convective fraction - cold side)	-	0.829	
$R_{s,tot}$	(total surface resistance)	m ² K/W	0.168	
θ_{ri}	(radiant temperature - warm side)	°C	19.210	(eq. A.3)*
θ_{re}	(radiant temperature - cold side)	°C	0.149	(eq. A.2)*
θ_{ni}	(environmental temp. - warm side)	°C	19.585	(eq. 7)*
θ_{ne}	(environmental temp. - cold side)	°C	0.006	(eq. 7)*
$\Delta\theta_n$	(environmental temp. difference)	K	19.579	-
U_m	(measured U-value)	W/m ² K	1.858	(eq. 13)*
ΔU_m	(uncertainty of the measurement)	W/m ² K	0.120	
$R_{(s,tot),st}$		W/m ² K	0,17	European value
U_{st}	(standardised U-value)	W/m²K	1,852	(eq. 14)*

* Reference is given to ISO 12567-1, version 2000-09-01