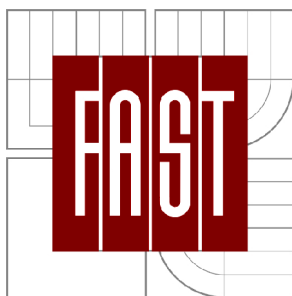


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT
A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

PASIVNÍ DOMY A ZÁŘIVÉ TOKY ENERGIE PASSIVE HOUSES AND RADIATIVE ENERGY FLUXES

DISERTAČNÍ PRÁCE
PhD THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RNDr. JAN HOLLAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.

BRNO 2009

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jan Hollan

Bytem: Lipová 19, 602 00 Brno

Narozen/a (datum a místo): 3. prosince 1955 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

se sídlem Veveří 331/95, 602 00 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

Prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Pasivní domy a zářivé toky energie

Vedoucí/ školitel VŠKP: Stanislav Št'astník

Ústav: Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů 5
- elektronické formě – počet exemplářů 1

* nehodící se škrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. ledna 2009

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Bibliografická citace VŠKP

HOLLAN, Jan. *Pasivní domy a zářivé toky energie: disertační práce*. Brno, 2009. 71 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí disertační práce doc. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc. URL <http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/okna_disertace.html>

Abstrakt

Významným krokem k porozumění izolačním vlastnostem domů je pochopení zářivých toků energie v interiérech, exteriérech a vztahu mezi nimi. Zářivé toky jsou podstatné zejména v případě oken. U nich lze docílit největších zlepšení, které je důležité pro další rozvoj a rozšíření standardu tzv. pasivních domů (takových, které pro vytápění i v mraze nepotřebují více než 10 W/(m²K) vztaženo na podlahu interiéru) a pro komfort bydlení vůbec, stejně jako pro ochranu klimatu (tedy pro ústup od užívání fosilních paliv).

Okna jsou „slabými“ místy moderních budov – u tradičních proto bývala okna malá. Teprve dvacet let existují technologie, které slabiny oken dokáží výrazně potlačit. V osmdesátých let dvacátého století vznikla technologie „low-e“ povrstvování polyesterových fólií (později i povrchu skel) čímž se podařilo téměř eliminovat vliv zářivého toku mezi povrchy skel. Doplňujícího zlepšení se docílilo užitím lépe izolujících plynných výplní oken (vzácných plynů argonu či kryptonu místo vzduchu). Ač ve třetím tisíciletí rychle expanduje trh s dobře tepelně izolujícími dvoj- a trojskly, jejich fyzikální vývoj téměř ustrnul, a velká zlepšení, pokud jde o zasklení, ani nelze očekávat. Výjimkou je jen vývoj sendvičů vakuových, s tenkými dutinami, u těch lze čekat významný průnik na trh až po roce 2010.

Nabízí se ale úprava doplnit okna pohyblivými málo průhlednými foliemi, které mají podobný účinek jako průhledná povrstvení a přinášejí i další výhody. Nejenže potlačí tepelné ztráty za dlouhých zimních nocí, ale umožňují i velmi účinnou regulaci tepelných zisků, a také regulaci prostupu světla.

Takové vrstvy se jsou na trhu coby tenké plastové fólie s vrstvou hliníku napařenou ve vakuu. Při promyšlené aplikaci (dvojice rolet vytvářející tři těsné vzduchové dutiny) jimi lze např. tepelné ztráty klasickými dvojitými okny snížit na jednu čtvrtinu, výrazně pod limit součinitele prostupu tepla $U = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, platný pro pasivní domy. Jejich použití je jedinou již nyní dostupnou možností, jak docílit příznivých fyzikálních vlastností (a „pasivního standardu“) i u střešních oken. Aplikaci levných fólií do dutiny oken jsem navrhl a fyzikálně zdůvodnil již v roce 1998, v této disertační práci podrobně popisují jejich funkci a demonstrují ji na praktických příkladech realizace. Rozebírám také radiometrické (termografické) metody, jimiž lze tepelné toky ve stavební praxi zjišťovat.

Klíčová slova

tepelné vlastnosti budov, okna, zářivé toky, infračervená radiometrie termografie, pohyblivé clony, emitance, emisivita, jasová teplota, měření tepelných toků, úspora energie na vytápění, pasivní domy

Abstract

To understand insulation properties of buildings, radiative energy fluxes indoors, outdoors and between these two environments are to be understood as well. Radiative fluxes are important in case of windows especially. The largest improvements are achievable just there. Such improvements are important for further development and proliferation of the passive house standard (demanding $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ at most for heating, relative to the area of habitable floor) and for living comfort in general, as well as for climate protection, i.e., for phasing out the use of fossil fuels.

Windows are weak points of modern buildings; because of that, traditional houses had small windows to be sustainable. Technologies to improve the poor properties of windows exist just some twenty years. Deposition of “low-e” thin layers onto polyester foils came into existence in the 80's, what resulted in almost eliminating the radiative transport between glass panes. Such layers are applied to glass surfaces now commonly. The other improvement consists in using noble gas fills in hermetic-sealed glass cavities (argon or krypton instead of air), to suppress heat conduction across the cavity. In the third millenium, the market with well insulating double or triple glazings is flourishing already, even in the Czech Republic. However, from the viewpoint of physic, their development seems to be finished, no large improvements can be expected. The only exception is development of evacuated glazings with very thin cavities, whose market penetration may start after 2010.

There is, however another pathway to improve windows: by including movable, just a bit transparent foils into windows. Such foils act similarly as the highly transparent “low-e” layers, but bring another advantages as well. Their primary goal is suppressing heat loss at night, but they offer a very effective tool to control solar heat gains and light as well.

Such layers are commercially available as very thin plastic foils with an aluminium layer deposited in vacuum chamber, and they are cheap. Applying them in a sophisticated way (using two roller shades and creating three air cavities which are airtight enough) enables achieving the passive house limit of composite thermal transmissivity $U \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ even for old double windows, reducing the heat loss through them to one fourth. Their application the only available way how to get roof windows with favourable physical properties (and obeying the passive house limit). I have proposed (and explained from the viewpoint of physics) such use of aluminised foils inside windows cavities in 1998 already. In this thesis I describe their function in detail and show real examples of their application. In addition, I discuss radiometric methods (thermography) by which heat fluxes can be measured in common civil engineering practice.

Keywords

heat protection of buildings, windows, radiative fluxes, infrared radiometry, thermography, movable blinds, emittance, emissivity, luminance temperature, measurement of heat fluxes, heat demand reduction, passive houses

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 30. ledna 2009

.....
podpis doktoranda

Poděkování

Děkuji svým laskavým mladším bývalým kolegům doktorandům za pomoc a shovívavost, zejména pak Jiřímu Zachovi za rady a ochotu při mých prvních krocích v termografii a Radkovi Steuerovi i za odbornou spolupráci. Organizátorkám a organizátorům vědeckých konferencí za trpělivost při vymáhání příspěvků. Svému školiteli Stanislavu Šťastníkovvi pak za všestrannou pomoc, pobízení, ochotu a plodné otázky, které mi otevřely nové obzory, i za rady ohledně textu disertační práce. Manželům Jiřímu a Jindřišce Svobodovým za dlouholeté diskuse o různých způsobech zlepšení dnešních stavebních technologií. Katedře fyziky Pedagogické fakulty za příležitost své práce elektronicky zpřístupňovat veřejnosti. Dík patří i všem dalším, kteří se na mne obraceli s dotazy z oboru stavební fyziky a materiálového inženýrství, nebo kteří mne pobízeli, abych svá zjištění popsal a publikoval. A pak ovšem mé rodině, na níž jsem konal své pokusy a která mi umožnila, abych se bádání v tomto oboru věnoval. Synovi Matějovi pak i za korektury starší verze rukopisu následujícího textu.

Obsah

1 Úvod	10
2 Fyzikální principy fungování průhledných tepelně izolujících vrstev	14
2.1 Prostup tepla neprodyšným souvrstvím (vedení, proudění, záření)	14
2.1.1 Součinitel prostupu tepla U	14
2.1.2 Na čem závisí „ u “	16
2.1.3 Konvekce podrobněji	22
2.1.4 Záření k obloze	25
2.1.5 „ U “ vícevrstvých zasklení	28
2.2 Vliv netěsností a jejich eliminace	34
3 Zjišťování tepelných toků termografií	38
3.1 Obrazy vytvářené termokamerami	38
3.2 Odhad tepelných toků z jasových teplot	41
3.2.1 Využití denního světla pro zjištění solárních vlastností oken	45
3.2.2 Konstrukce elektricky vyhřívané srovnávací plošky	45
4 Vytvoření těsných přepážek z foliových rolet	48
5 Ověření vlastností proměnných okenních souvrství	53
5.1 Emitance	53
5.1.1 Příklady měření směrových emitancí	58
5.1.2 Příklad měření transmitancí	59
5.2 Výpočty skutečných teplot	60
5.2.1 Vhodné zobrazování jasových teplot	60

5.3	Využití vypuklého zrcadla pro snímky velkých prostorových úhlů	62
5.4	Přepočet teplot na tepelné toky	64
6	Závěr	66
6.1	Shrnutí výsledků	66
6.2	Doporučení pro budoucnost	67
7	Glosář	70
	Literatura	80
	Seznam veličin	82
	Seznam obrázků	85
8	Příloha: barevné obrazy	86

Kapitola 1

Úvod

Pasivní domy a záření...? První myšlenka by mohla být, že na provoz budov by v ideálním případě mohlo stačit to záření, které na ně dopadá. Bohužel, ani pasivní domy tak za chladných zamračených zim fungovat nedokáží. Skutečnou funkci takových budov a příklady realizací popisuje např. brožura Pasivní dům II [34], kterou jsem editoval; v této disertaci se k takovým již „léta známým“ principům vracet pokud možno již nebudu. Ani k porovnávání pasivního standardu s normami atp., jak se vyvíjely a vyvíjejí, jak jsem popsál v textu [36], „Co je standardní dům?“. Z nich zde uvedu jen základní tabulku:

Nejvyšší přípustné měrné hodnoty pro pasivní dům	
normová tepelná ztráta	10 W/m ²
roční spotřeba na topení	15 kWh/m ² a
roční dodávka energie do domu	42 kWh/m ² a
primární energie kvůli tomu uvolněná	120 kWh/m ² a

Tabulka 1.1: Přehled celkových limitů, které platí pro pasivní domy. Jde o celkové spotřeby za jeden rok dělené obsahem podlahové plochy, konkrétně tzv. Treated Floor Area [34, str. 54]. Normová tepelná ztráta je tepelný tok z objektu za podmínek stanovených v normě (za tzv. návrhové teploty vnějšího vzduchu, činící podle ČSN 73 0540 pro většinu českých budov -13°C až -17°C).

Obě výše citované práce jsou snadno dostupné (a mnoho dalších výtečně napsaných, aktuálních informací o pasivních domech je k dispozici v [16], přímo od autora prvního pasivního domu Wolfganga Feista)—. Disertační práce se proto se soustředí na témata související, „méně viditelná“, jejichž vývoj je teprve na počátku. I tak se dotýká mnoha oblastí stavební praxe i způsobů užívání budov. V předložené práci jde o snížení zimního zářivého ochlazování a přitom zvýšení zářivých zisků, v létě pak o jejich potlačení. Dále se zabývá tím, jak záření využívat i ke zjištění fyzikálních vlastností budovy.

Zářivé toky energie jsou „hybatelem“ veškerých dějů ve vesmíru, tedy i na Zemi: koloběhu vody, kolísání teplot mezi dnem a nocí, ročních období atd. Nevyrovnanost bilance záření, které Země absorbuje, a toho, které vyzáří do vesmíru (tzv. radiační působení) vede k jejímu postupnému ohřívání nebo chladnutí, tedy změně průměrné teploty přízemního vzduchu,

půd a oceánů. V přírodních podmínkách jsou takové celoplanetární změny pozvolné, změny činí méně než desetinu kelvinu za sto let. V nynější době se ale vlivem rychlé změny složení ovzduší, působící výraznou změnu jeho tepelně-izolačních vlastností, mění řádově rychleji. Nyní už jde, až na hloubky oceánu, o dvě desetiny kelvinu za desetiletí.

V některých oblastech světa dosud lidé vystačí s tím, že ve svůj prospěch využívají nebo ovlivňují přírodní zářivé toky, přímo nebo nepřímo. Příkladem přímého využití je sušení na slunci, příkladem přímého ovlivnění je užití střechy jako denní ochrany interiéru před sluncem nebo noční ochrany před zářivým ochlazováním. Nepřímým využitím je zejména sklizeň a využití fytomasy, pastevectví, lov. Až do nástupu těžby fosilních paliv byly všechny lidské populace zásobovány výhradně zářením ze slunce (i prameny horkých vod existují jen díky tomu, že koloběh vody a působení živých organismů daly vzniknout geologické aktivitě a udržují ji; teplo vod ale pochází z nitra Země).

Nástup využívání fosilních paliv tento stav pro většinu lidstva zásadně změnil. Roční těžba fosilních paliv již několik století narůstá a toky energie uvolňované jejich spalováním se zdají být základní podmínkou pro fungování civilizace. Už dlouho lidé tuší, že fosilních paliv není neomezené množství. Dnes navíc víme, že jsme již překročili mez, kdy se planeta mohla se zoxidovaným fosilním uhlíkem vypořádat tak, aby se přitom její povrch radikálně nezměnil. Stabilní podnebné oblasti, vegetační pásy, ledové masy, hladina oceánů, zkrátka podmínky panující během holocénu, posledních deset tisíc let, kdy vznikly všechny civilizace, už jsou bohužel minulostí. Teď jde jen o to, vzdálit se od nich co nejméně, v zájmu ochrany lidstva i přírody, jakou známe.

Tento úkol má jen jedno východisko: zabrzdit růst spotřeby fosilních paliv, přejít naopak k poklesu jejich těžby, a následně i začít s procesem opačným, tedy vrácením uhlíku zpět do země. Bude-li období dnešních, neudržitelně vysokých koncentrací oxidu uhličitého v ovzduší kratší než půl století, může se podařit udržet aspoň zbytky horských ledovců, grónský i antarktický ledový štít, hladinu oceánů i zastavit růst acidity moří [22, 39]. Jde o úkol nesmírně těžký, vyžadující úsilí obdobně velké, jako bylo vynaloženo na druhou světovou válku – ovšem trvajícím ne pět let, ale mnoho desítek let. Podstatnou komponentou řešení je vystačit opět jen se slunečním zářením a jím umožněnými toky energie.

Je zajímavé uvědomit si, že současné globální oteplování je způsobeno tím, že Zemí absorbovaný solární příkon je o půl až jeden wattu na metr čtvereční zemského povrchu větší než zářivý výkon připadající na tutéž plochu a vyzařovaný zpět do vesmíru, viz [22, str. 226]. Mohlo by se zdát, že na takovém „malém“ narušení energetické bilance Země nezáleží, ale za deset let to znamená např. úhrnný zisk čtvrt miliardy joulů na metr čtvereční – tím by se např. půlkilometrová vrstva vody ohřála o desetinu kelvinu. To se také děje, většina tepelného přebytku se spotřebovává na prohřívání oceánů, viz např. [43, str. 7].

Porozumět zářivým tokům energie není zcela snadné. A to ani v případě záření viditelného, světla. Důvodem je, že velikost světelného toku téměř nevnímáme, oči se přizpůsobí intenzitě svého osvětlení. Porovnávají jen, kde je světla méně a kde více, tedy poměry jasů. Přitom se světelné toky mění mezi dnem a přírodní nocí v poměru jedna ku sto miliónům. Ty denní jsou tak velké, že ohřívají zem a skrze okna i interiéry budov. Alespoň polovina

tohoto tepla připadá právě na záření vlnových délek od $0,4 \mu m$ do $0,8 \mu m$, tedy na světlo. Druhá část pak na vlnové délky bezprostředně větší, označované jako krátkovlnné infračervené záření. (Nad atmosférou by tomu bylo jinak, na světelnou „oktávu“¹ připadá poněkud méně než polovina slunečního tepla, více energie je přenášeno delšími vlnovými délkami, tj. infračerveným zářením. Ultrafialová i infračervená složka je ale do značné míry pohlcena během průchodu ovzduším, takže na zemi už světelné vlnové délky energeticky převažují.)

Při jasné obloze uniká ale ze země skrze atmosféru do vesmíru zhruba takový tepelný (zářivý) tok, jako je příkon difúzního slunečního záření dopadajícího ve dne do stínu. Tím, že je zem zhruba dvacetkrát chladnější než fotosféra Slunce, jde o záření dvacetkrát větších vlnových délek. Můžeme mu říkat *pozemské* záření, v této práci ale obvykle užíváme název *dlouhovlnné*. (Opět platí, že na jednu oktávu, v tomto případě tedy od $8 \mu m$ do $16 \mu m$, připadá necelá polovina vyzařovaného toku energie.) Bilance dlouhovlnných zářivých toků vzhůru a dolů znamená typicky únik tepla ve výši necelého sta wattů na metr čtvereční.

Zářivé toky udržují díky oknům průměrnou teplotu v domech výrazně vyšší, než je průměrná teplota venku. To je dáno tím, že sklo se vůči těmto dvěma oborům vlnových délek – slunečnímu a pozemskému – chová zcela jinak. Pro sluneční je téměř úplně průhledné, pro zemské je zcela nepropustné. Dům s okny je tak „tepelnou pastí“. Aby se neohříval donekonečna, o to se „postarají“ až zdi a skla, které září do chladnějšího okolí a ohřívají vzduch. Jde-li o skla jednoduchá, jejich teplota je za bezvětří jednoduše uprostřed rozmezí mezi teplotou venku a uvnitř. Dvojitě zaskleným oknům vděčíme už více než sto let za domy, v nichž je po většinu roku příjemná teplota i bez umělého vytápění. Je pozoruhodné si uvědomit, o kolik je u nás tzv. topná sezóna kratší než ta část roku, kdy venku průměrná Celsiova teplota nedosahuje dvaceti stupňů (ta činí v teplých oblastech Česka asi 330 dní, na Českomoravské vrchovině až 350 dní, [56, str. 44]).² Dní, kdy průměrná teplota dvaceti stupňů dosáhne, bývalo i v teplých oblastech Česka donedávna za rok jen málo (až v roce 2003 jich bylo mnohem víc, devětkrát oproti průměru z minulého století).

Koncept pasivního domu se snaží období, kdy okna nestačí coby hlavní „otopná soustava“, co nejvíce zkrátit. Podstatnou technologií, která k tomu pomáhá, je užívání velmi dobře tepelně izolujících oken. Přesto i v pasivních domech únik tepla okny často dominuje (oproti úniku tepla vedením přes zdi a úniku větráním), zejména pokud jsou okna velkoryse dimenzovaná. Velkoryse dimenzování bývá žádoucí nejen kvůli zvýšení solárních tepelných zisků, ale i kvůli komfortu, lepšímu osvětlení pro práci, úsporám elektřiny na svícení [33, 40]. Při užití dnešních nejlepších technologií, vyvinutých koncem dvacátého století, uniká (trojitými) okny ven třikrát až čtyřikrát méně tepla než stejně velkými klasickými okny dvojitými. I nejlepší dnešní okna mívají ale na stinné straně domu tepelnou bilanci negativní. Zpravidla se proto volí malá, dimenzovaná jen v míře opravdu nutné pro osvětlení nebo pro výhled.

¹V akustice se oktávou označuje spektrální interval, jehož krajní frekvence jsou v poměru 1:2, obdobný termín lze užít i pro elektromagnetické vlnění.

²Používáme-li v případě teploty slovo stupeň, myslíme tím v kontinentální Evropě ve třetím tisíciletí vždy Celsiovu teplotní stupnici; pro vyjádření rozdílu teplot je vhodnější označení kelvin, jednotka stejně velká jako stupeň Celsia. V textu této práce se slovo stupeň ve svém druhém významu, úhlovém, nevysktuje.

Získat okna tepelně izolující ještě alespoň dvakrát lépe, než to dokáží technologie, které se již tržně uplatnily, je fyzikálně možné. Vedou k tomu dvě cesty. Jedna je používat evakuovaných okenních souvrství. Druhá je pak užívat pohyblivých odrazných vrstev, kterými se tepelné vlastnosti oken dají dle potřeby zejména v noci, ale někdy i ve dne, podstatně vylepšit.

Myšlenku použít v oknech dodatečné těsné vrstvy odrážející dlouhovlnné záření jsem formuloval koncem devadesátých let. Nejstarší zveřejněný text, kde to uvádím, je zřejmě [25] z jara 1999. Pokud vím, nikdo jiný se jí až dosud nezabýval. Může to být proto, že docílit těsnosti takových pohyblivých přepážek se zdálo nereálné. Ale možná je to jen proto, že zářivým tokům energie lidé, zabývající se stavebnictvím, nevěnují dost pozornosti.

V této disertaci popisují nejen takové realizace a výhody, které poskytují, ale také metody, jimiž lze zářivé toky energie a tepelně izolační vlastnosti budov studovat, jak pozorováním zvenčí budov tak i v interiérech. Jde vesměs o radiometrii dlouhovlnného infračerveného záření, běžněji označovanou jako termografii či měření infrateploměry.

Většina zde uvedených zjištění, metod a výsledků byla již publikována v časopisech a na odborných konferencích, všechny tyto texty jsou též zpřístupněny na internetu. V této disertaci se ale snažím je pojednat souborně, přehledněji. Text disertace obsahuje řadu hypertextových a křížových odkazů, které jsou funkční v jeho elektronické verzi, dostupné na http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/okna_disertace.html.³

³Během svého studia jsem dále vypracoval i metodu měření toků světelných, čili radiometrii v oboru viditelném, pomocí digitálních fotoaparátů. Zabýval jsem se osvětlováním (zejména venkovním) a vlivy umělého osvětlení na noční prostředí, přírodu a lidské zdraví. V oboru průhledných či průsvitných částí budov se tato témata nakonec setkávají, jde vesměs o zářivé toky. Jinou oblastí, kde jde o zářivé toky, je funkce a účinnost slunečních kolektorů; své poznatky z praxe i teoretické jsem vložil do publikace [54], jejíž české vydání jsem editoval a doplnil. Dalším oborem mé aktivity byla osvěta a poradenství v oboru pasivních budov vůbec, a dále též vývoj teorie a praxe tepelného izolování přírodními porézními materiály.

Kapitola 2

Fyzikální principy fungování průhledných tepelně izolujících vrstev

Hlavní funkcí takových vrstev, zpravidla oken, je poskytovat denní světlo, a výhled ven. Významnou další funkcí oken je ohřívání interiérů slunečním zářením. Hlavně díky této funkci je v budovách topné období mnohem kratší než doba, kdy je venku průměrná teplota alespoň 20 °C. V nejchladnějším období roku ale už bývá tepelná bilance oken méně příznivá, okna jsou tehdy slabými místy tepelného pláště budov. V této kapitole proto uvádím některé možnosti, jak jejich fyzikální vlastnosti zlepšit. V první části jde o stručný úvod do problematiky (odborníci jej mohou přeskočit), usnadňující chápání dalších částí kapitoly, věnujících se podrobnějším výpočtům.

2.1 Prostup tepla neprodyšným souvrstvím (vedení, proudění, záření)

2.1.1 Součinitel prostupu tepla U

Sousedí-li spolu dvě prostředí o různých, ale stálých teplotách, oddělaná neprodyšnou přepážkou (rozhraním), prochází touto přepážkou kladný tepelný tok od teplejšího prostředí ke studenějšímu. Velikost tepelného toku je úměrná obsahu (velikosti plochy) rozhraní a je závislá na rozdílu teplot, fyzikálních vlastnostech přepážky a její orientaci i na vlastnostech obou prostředí; ve stavebnictví jde obvykle o prostředí vyplněná vzduchem, totiž interiéru a exteriéru. Při rozdílech teplot nacházejících se v dostatečně malém intervalu je velikost tepelného toku přímo úměrná onomu teplotnímu rozdílu. Koeficient úměrnosti mezi tepelným tokem a součinem obsahu rozhraní a teplotního rozdílu obou prostředí se ve stavební literatuře nyní označuje symbolem U (ve starší literatuře se užívalo symbolu k). Je zřejmé, že jeho jednotkou je watt na metr čtvereční a kelvin (např. typickou hodnotou udávanou pro dvojitě okno je 2,5 W/(m²K)). Nazývá se např. *měrná tepelná prostupnost* nebo čas-

těži *součinitel prostupu tepla* (Wärmedurchgangskoeffizient, U-wert, thermal transmittance, composite thermal conductance, U-value).

Tato veličina je ve skutečnosti funkcí $U(T_m)$ střední teploty obou prostředí T_m , a to funkcí zvolna rostoucí, jak vlivem růstu tepelné vodivosti plynů s teplotou, tak vlivem většího vlivu sálání. Při velkém teplotním rozdílu kromě toho roste tepelný tok rychleji než přímo úměrně onomu rozdílu. Obojí dále ukážeme. Pro zvolený teplotní rozdíl t a malý interval kolem tohoto teplotního rozdílu je tak onen koeficient vlastně bodovou hodnotou funkce $U(T_m, t)$, čili funkce jak střední teploty, tak teplotního rozdílu t . Pro velký rozsah teplotních rozdílů se ale závislost tepelného toku na rozdílu teplot vyjadřuje lépe polynomem, kde hodnota U je jen koeficientem při první mocnině rozdílu teplot (viz např. praxe udávání i kvadratického členu u solárních kolektorů, [52]¹).

V textu této práce se s touto veličinou budeme potkávat tak často, že by bylo těžkopádné stále znovu uvádět její jednotku. Praktičtější je užívat bezrozměrnou veličinu, pouhé číslo, totiž číselnou hodnotu veličiny U vyjádřenou v základních jednotkách SI, tedy

$$\mathbf{u} = U / (1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})). \quad (2.1)$$

Tu bychom sice mohli označovat i jako $\{U\}$, byl by to ale zápis delší (o správném označování podobných bezrozměrných veličin viz [55, str. 15]). Pro lepší odlišení od předložky „u“ ji budu nadále, na rozdíl od ostatních veličin, označovat nejen kurzívou, ale i tučně.

V praxi, pro usnadnění komunikace a porovnávání vlastností souvrství z různých materiálů, se pro dané použití uvádí hodnota \mathbf{u} platná pro nějaké standardní podmínky – konkrétní teploty prostředí na obou stranách rozhraní, definované proudění na obou stranách rozhraní a zvolenou orientaci rozhraní (např. svislé rozhraní, jako u běžných oken a zdí).²

Fyzikálně jednoduchý případ souvrství dvojrozměrně (podél rozhraní) homogenního je nekonečná rovinná plocha. V praxi se této situaci může blížit například střed velké tabule dvojskla (tedy dvojice rovnoběžných skel s dutinou šířky osm až třicet milimetrů). Nebo střed rozměrné zdi bez oken. Reálná rozhraní ale nejsou homogenní, v každém případě mají okraje, za nimiž pokračuje např. rozhraní stejného typu, ale jiné orientace (příkladem jsou zdi stýkající se v rohu) nebo rozhraní jiného složení (přechod mezi zdí a oknem v ní). Pro každý takový případ lze ale stanovit nějakou hodnotu \mathbf{u} vztahenou na celý soubor daného typu, např. celého okna vč. rámu a způsobu zabudování do konstrukce jako „poruchy“ tepelných vlastností okolní zdi – tato veličina se u oken označuje jako U_W , viz Glosář.

¹Ze starších prací, které zkoumaly tepelné ztráty slunečních kolektorů, jsou odvozeny i formule užívané v normách pro výpočty tepelných ztrát dvojitými zaskleními různých náklonů [5, str. 47]; běžný plochý solární kolektor lze totiž uvažovat jako obdobu dvojitého okna, kde je interiérová okenní tabule nahrazena absorberem.

²Bohužel, jaké jsou to podmínky, se většinou výslovně neudává, nejvýše se odkazuje na kódové označení nějaké normy. Takové normy jsou pak závazným dokumentem pro výpočty ve stavebnictví nebo deklarují požadavky na výrobky. Ukazují, jakým způsobem zjistit (vypočítat) fyzikální veličinu, aby byl výsledek porovnatelný s výsledky pro jiné situace, pro jiné výrobky apod.

Je zřejmé, že ideální domy mají co nejmenší celkovou hodnotu u , tedy co nejlépe tepelně izolují.³

Disertace se ve své teoretické části soustřeďuje na tepelné toky „středem homogenního souvrství“, v experimentální části pak zmiňuje i odhady tepelných toků celým oknem jakožto „poruše“ ve zdi.

2.1.2 Na čem závisí „ u “

Součinitel prostupu tepla obecně závisí na tloušťce rozhraní, tedy onoho tepelně izolujícího souvrství oddělujícího obě prostředí, např. interier a exteriér domu. Jde-li o rozhraní tlusté, neprodyšné a tvořené některým z nejlépe tepelně izolujících materiálů (pěnový polystyrén, polyuretan), platí přibližně, že jeho měrná tepelná prostupnost je nepřímo úměrná jeho tloušťce. Takovou jednoduchou souvislost tloušťky a měrné tepelné prostupnosti ale rozhodně nenajdeme v případě okenního souvrství – jsou-li od sebe skla daleko dva centimetry nebo dvacet centimetrů, to se na hodnotě U moc neprojeví. Nenajdeme ji ani u jednoduchého zasklení – jeho tepelně izolační vlastnosti téměř nezávisí na tloušťce skla.

Je to dáno odlišnými mechanismy, jak probíhá tepelný tok různými vrstvami. Pokud vrstvou může cirkulovat plyn nebo se do dálky šířit záření, úměrnost mezi tepelným odporem vrstvy a její tloušťkou neplatí. A i tepelně výborně vodivá přepážka (plech, ale i sklo) klade prostupu tepla nezanedbatelný odpor, viz dále.

Vhodným prvním krokem k nalezení součinitele prostupu tepla přepážkou může být vyšetření přepážky samotné, totiž zjištění tzv. součinitele *přestupu* tepla h_{bar} z její jedné strany na druhou jako koeficientu úměrnosti mezi tepelným tokem a součinem obsahu přepážky a rozdílu teplot jejích povrchů. Teploty povrchů přepážky přitom obecně nejsou tytéž, jako teploty okolního prostředí. Pak platí, že v případě přepážky z materiálu, který je neprodyšný a neprostupný pro elektromagnetické záření, je podstatné jen tzv. *vedení tepla* oním materiálem. Pak platí

$$h_{\text{bar}} = \lambda/d, \quad (2.2)$$

kde λ je materiálová konstanta (s jednotkou watt na metr a kelvin) zvaná *měrná tepelná vodivost* a d je tloušťka oné izolační vrstvy, tvořící pevné rozhraní. Je-li rozhraní tvořeno postupně několika vrstvami neprodyšných materiálů, je možno počítat měrné tepelné odpory R vrstev; pro i -tou vrstvu je to

$$R_i = d_i/\lambda_i \quad (2.3)$$

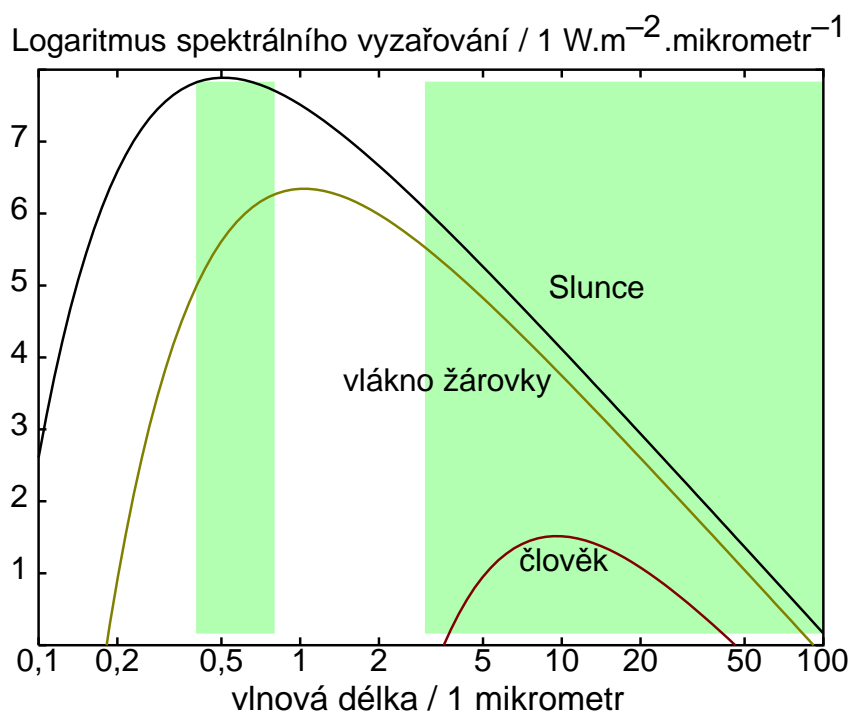
a výsledná měrná tepelná přestupnost (čili součinitel přestupu tepla) je převrácenou hodnotou součtu těchto odporů:

$$h_{\text{bar}} = \left(\sum R_i\right)^{-1}. \quad (2.4)$$

³V případě pasivních domů se běžně docílí toho, že vztaženo na vnější obsah domu, tedy na velikost ploch přímo sousedících s exteriérem (či zvláště na obsah zdí, střechy a podlahy, protože bývají různě konstruované a také na nich bývá jiný spád teplot) jsou hodnoty, počítané pro středy homogenních rozhraní, nakonec reprezentativní i pro dům jako celek – tj. lineární tepelné mosty (viz Glosář) vycházejí v součtu jako nulové, ba i mírně záporné [13].

Jak ale spočítat měrnou tepelnou prostupnost okna s jednoduchým sklem? Ze zkušenosti víme, že i takové starobylé zasklení poskytuje nemalou ochranu proti venkovnímu mrazu. Přitom ale sklo má malou tloušťku a je dobře tepelně vodivé. Ostatně nám zkušenost říká i to, že na tloušťce skla izolační vlastnosti okna valně nezávisí.

I sebetenčí sklo či plastová fólie poskytuje základní funkci, totiž znemožní proudění vzduchu zvenčí dovnitř, zajistí neprodyšnost rozhraní. Ale sklo poskytuje i druhou, méně zřejmou službu: je úplnou bariérou pro elektromagnetické záření vlnových délek nad tři mikrometry. Tedy pro ono záření, které vyzařujeme my sami i všechny věci okolo nás.⁴ Jde o *dlouhovlnné infračervené záření*, které budeme častěji označovat jen jako *dlouhovlnné záření*, v kontrastu se zářením krátkovlnným, slunečním.



Obrázek 2.1: „Planckovy křivky“ v logaritmickém zobrazení. Stínováním jsou odleva vyznačeny postupně oblasti ultrafialová, viditelná, infračervená krátkovlnná a dlouhovlnná.

Intenzita vyzařování velmi závisí na teplotě zářícího povrchu, konkrétně je úměrná čtvrté mocnině jeho absolutní teploty (tzv. Stefanův-Boltzmannův zákon):

$$E = e\sigma T^4, \quad (2.5)$$

kde e je tzv. emitance (viz Glosář) daného povrchu (pro sklo je to $e = 0,84$),

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4) \quad (2.6)$$

je Stefanova–Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota.

⁴K těm „věcem“ patří ve skutečnosti i samotné ovzduší, ale až jeho tlusté vrstvy – ovzduší je pro takové záření srovnatelně průhledné jako tzv. kouřmo pro světlo. Rozdíl je ovšem v tom, že záření nad $3 \mu\text{m}$ se ve vzduchu nerozptyluje, ale jen pohlcuje či vyzařuje a že se vzduch vůči němu chová jako „složité barevný“ filtr.

Jeden metr čtvereční skla o absolutní teplotě 300 K (27 °C) tak vyzařuje do poloprostoru výkon

$$E = 0,84 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 81 \cdot 10^8 \text{ W} \approx 386 \text{ W}, \quad (2.7)$$

obě strany skla dohromady pak vyzařují do obou poloprostorů dvojnásobek, téměř osm set wattů. Takovým výkonem se ale sklo neochlazuje, neb na ně dopadá záření zvenčí. Příkon dopadající na metr čtvereční jedné strany skla je obvykle jednoduše σT_{surr}^4 , tj. okolí (surroundings) bereme jako černý zářič o teplotě T_{surr} . Taková aproximace dobře platí např. pro místnost s vyrovnanou teplotou, v níž je okno jen „malou poruchou“ s nižší teplotou. Místnost lze tehdy považovat za dutinu, kde se uplatňují mnohonásobné odrazy, a tedy (pozorováno v otvoru, tj. okně) za realizaci černého tělesa (viz Glosář; jako černé těleso se proto uvažuje i v normách atp., viz např. [6, str. 16 a 53]). Platí i pro exteriérovou stranu skla, je-li v noci zataženo nízkou oblačností, takže teploty terénu a oblohy jsou blízké. Měrná (na metr čtvereční) zářivá bilance B jedné strany skla je pak

$$B = e\sigma(T^4 - T_{\text{surr}}^4), \quad (2.8)$$

protože emitance skla se pro dlouhovlnné záření na něj dopadající uplatní jako absorptance (sklo je pro takové záření nepropustné). Zářivá bilance skla je tak dána rozdílem čtvrtých mocnin teplot.

Než budeme probírat výpočty zářivé složky přestupu tepla podrobněji, ukažme si pro představu, o jak velké toky v praxi jde, jeden příklad. Pro realistické teploty skla $T = 283 \text{ K}$ a exteriéru $T_{\text{surr}} = 273 \text{ K}$ (čili bodu mrazu) lze rovnicí 2.8 psát jako

$$B = 0,84 \cdot 5,67 \cdot (64,1 - 55,5) \text{ W} \approx 41 \text{ W} \quad (2.9)$$

– tolik by činil výsledný zářivý tok tepla mezi sklem a exteriérem.

Aby mohl probíhat trvale, musí být sklo vyhříváno z interiéru. Vezměme teplotu interiéru jako 19 °C, vyjde nám pak bilance toku „ze skla dovnitř“ jako

$$B = 0,84 \cdot 5,670 \cdot (64,1 - 72,7) \text{ W} \approx -41 \text{ W}, \quad (2.10)$$

tj. teplota skla by se, pokud by neprobíhaly jiné toky než zářivé, neměnila. Šlo by o jeho ustálenou teplotu. Vidíme současně, že měrná hustota výsledného zářivého toku mezi povrchem skla a okolím činí zhruba 4 W/(m²K). Mezi interiérem a exteriérem je pak jedenkrát přerušovaný zářivý přenos, při jedné překážce tvořené sklem, právě poloviční, čili 2 W/(m²K).

Zářivý únik tepla z interiéru do exteriéru přerušovaný takovou tenkou přepážkou je zjevně úměrný emitanci přepážky. Lze jej snížit, snížíme-li emitanci přepážky. Půjde-li místo skla o tenkou aluminiovou fólii s emitancí (řekněme) desetinou, tedy $e = 0,084$, bude zářivý únik právě desetkrát nižší. Místo fólie aluminiové může jít o tenkou plastovou fólii s napařeným alumiinem. Idea užití takových přepážek stojí v základu mé disertační práce.

Tepelný tok z interiéru do exteriéru přes těsnou jednoduchou přepážku není ale tvořen jen tokem zářivým, tak by tomu bylo jen ve vakuu. Větší složku celkového toku tepla zprostředkovává v praxi vzduch na obou stranách přepážky. V případě záření jsme vliv vzduchu mohli zanedbat, neb je v tloušťkách metrových pro dlouhovlnné infračervené záření takřka

průhledný (viz 3.2 na str. 43 pro případ řádově větší tloušťky 100 m). Mohli bychom jej zanedbat i v případě vedení tepla (vzduch je přece velmi málo tepelně vodivý), ale to jen tehdy, kdyby neproudil.⁵ V případě oken ale vzduch kolem nich nestagnuje, vždy proudí. Jeho dobré tepelně-izolační vlastnosti se tak omezují na tenkou vrstvu kolem přepážky, kde je již proudění laminární, podél skla. Prouděním se pak teplo netransportuje ve směru kolmo na přepážku.

Jak tlustá je taková vrstva vzduchu, který se nepromíchává a neproudí směrem tepelného toku, je těžké v praxi přímo zjistit. Lze ji ale odhadnout nepřímou, z běžně udávaných hodnot U pro jednoduché zasklení. Pro bezvětrí se udává např. $U = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Na vedení tepla vzduchem těmito hraničními vrstvami podél obou stran skla tak připadá vše, co není zprostředkováno zářením, tedy $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Při zjednodušení, že by sklo mělo teplotu v polovině intervalu mezi interiérovou a exteriérovou, to znamená měrnou prostupnost každé z vrstviček vzduchu (nehledě na záření) právě dvojnásobnou, $6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Při měrné tepelné vodivosti vzduchu $\lambda = 0,025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ to znamená, že efektivní izolující tloušťka vzduchu je šest milimetrů na každé straně skla, celkově tedy asi 12 mm, čili asi jeden centimetr.

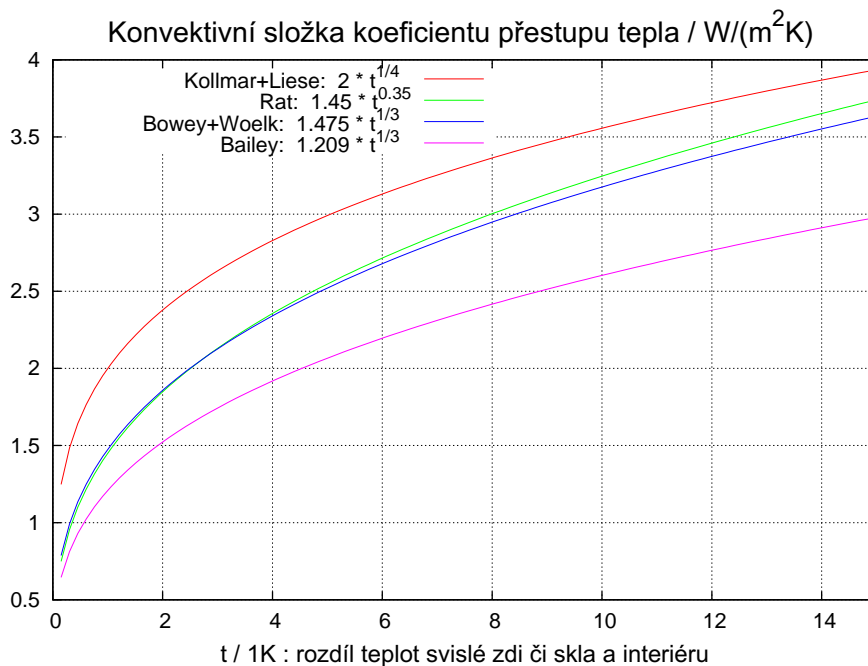
Jednoduchá těsná přepážka, např. zasklení, tedy tepelně izoluje tak, že zamezuje proudění vzduchu mezi interiérem a exteriérem, dělí zářivý přenos tepla na dva (tj. skutečně snižuje na polovinu) a i přes samovolnou konvekci vzduchu, která nutně probíhá na obou stranách skla (na interiérové straně v zimě dolů podél skla, čímž se teplo dostává z interiérového vzduchu do skla, na exteriérové nahoru, čímž se z něj teplo odvádí dál do exteriéru) poskytuje jeden centimetr jakoby nehybného vzduchu, který též tepelně izoluje.

Z toho lze pochopit, proč pomůže, je-li přepážek více než jedna. Každá z nich totiž poskytuje zhruba tentýž tepelný odpor. Okno se dvěma skly tak musí izolovat zhruba dvakrát lépe než jednoduché zasklení, čtyři skla opět dvakrát lépe než dvě skla (podrobněji viz sekci o vícevrstvých zaskleních).

Ve skutečnosti se izolační vlastnosti zlepšují ještě poněkud rychleji, neb proudění vzduchu v komorách mezi přepážkami je pomalejší než na interiérové straně souvrství (mohou tam chodit lidé, proudění záměrně vyvolávat konvektory), natož pak exteriérové straně (vítr), a efektivní tloušťka nepromíchávající se vrstvy vzduchu podél přepážky je vyšší. Dále pak tím, že samovolná konvekce se zrychluje s rostoucím teplotním spádem, viz obr. 2.2 (str. 20) – ale více přepážek znamená menší teplotní spád na každé z nich.

Z tohoto posledně uvedeného důvodu je také zřejmé, proč musí hodnota U mírně růst s rostoucím rozdílem teplot interiéru a exteriéru – nejenže se zrychluje konvekce podél skla, ale roste i množství přenášeného tepla na jednotku objemu „protekého“ vzduchu, a to úměrně teplotnímu spádu v blízkosti skla. Například pro neradiační složku součinitele přestupu tepla h_c za bezvětrí (zpravidla jen v interiéru) udávají různí autoři tyto hodnoty [49, str. 24]:

⁵Existují takové situace – např. vodorovná přepážka mezi teplým interiérem a chladným sklepem. Ta sice nebývá tenká, ale je možné tenkou přepážku přidat, totiž zavěsit pod strop sklepa. Více o tom viz [37] a v části Konvekce podrobněji.



Obrázek 2.2: Konvekce na interiérové straně

Proti této dominantní změně stojí mírné oslabení složky tepelného toku připadající na přenos zářivý. To zjistíme tak, že rozdíl čtvrtých mocnin teplot okolí a skla, jemuž je bilance zářivého toku tepla na danou stranu skla úměrná, vyjádříme pomocí rozdílu teplot $t = T_i - T_s$, teploty interiéru a skla:

$$T_i^4 - T_s^4 = T_i^4 - (T_i - t)^4 \quad (2.11)$$

$$= 4T_i^3t - 6T_i^2t^2 + 4T_it^3 - t^4 \quad (2.12)$$

$$= 4tT_i^3(1 - 1,5t/T_i + t/T_i^2 - 0,25t/T_i^3) \quad (2.13)$$

Podíl t/T_i je malý. Vezměme si (v praxi nereálný) případ, kdy je v interiéru teplota $T_i = 293$ K čili Celsiova teplota asi $\Theta_i = 20$ °C, venku je -20 °C, teplotu skla Θ_s berme pro jednoduchost jako 0 °C, tedy $t = 20$ K. Podíl t/T_i i tehdy činí necelých 0,07. Jeho druhou a třetí mocninu můžeme zanedbat oproti mocnině první a psát tedy

$$T_i^4 - T_s^4 \approx 4tT_i^3(1 - 1,5t/T_i). \quad (2.14)$$

Podíl bilance zářivého toku na jednotkovou plochu skla a rozdílu teplot t je tak výrazně závislý na teplotě prostředí, mnohem méně pak na rozdílu teplot skla a prostředí. Vezmeme-li náš extrémní případ, činil by na interiérové straně

$$B/t = 0,84 \cdot 4 \cdot 5,670 \cdot 10^{-8} \cdot 293^3 \cdot (1 - 0,10) \text{ W/(m}^2\text{K)} = 4,32 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (2.15)$$

a v případě řádově mnohem menšího rozdílu teplot by byl o desetinu větší, $4,79$ W/(m²K). Na exteriérové straně by zato činil (stále pro jednoduchost předpokládáme, že teplota skla je průměrem teplot uvnitř a vně) v našem extrémním případě jen $3,47$ W/(m²K), což je způsobeno tím, že teploty tam uvažujeme o 20 K nižší. V případě, že teplota exteriéru by se

blížila oněm 20 °C, by se ovšem zářivá složka koeficientu přestupu tepla blížila i tam hodnotě 4,8 W/(m²K). Ještě vyšších hodnot by pak dosahovala za letních veder. Zvláště vysokých hodnot pak docílí v případě zářivého tepelného toku z absorberu na sklo v kolektoru: obyčejný černě natřený absorber pracuje typicky na teplotě kolem 340 K a zářivá složka přestupu tepla na sklo je pak kolem 6 W/(m²K).

Rozdíl čtvrtých mocnin teplot lze vyjádřit i jinak, místo (zhruba stálé) teploty interiéru použít průměr teplot skla a interiéru. Pak

$$B/t \approx e \sigma 4 \left(\frac{T_i + T_s}{2} \right)^3. \quad (2.16)$$

Odhad, jak se zářivá složka mění s absolutní teplotou skla, je jednoduchý: vzhledem k tomu, že je úměrná její třetí mocnině, vede změna teploty o desetinu (tedy např. o 27 K od původních 273 K) ke změně zářivé složky měrného přestupu tepla o tři desetiny. To plyne z rozvoje

$$(T + t)^3 = T^3 + 3T^2t + 3Tt^2 + t^3 = T^3(1 + 3t/T + 3(t/T)^2 + (t/T)^3), \quad (2.17)$$

kde pro $t \ll T$ zanedbáme vyšší mocniny t/T než první.

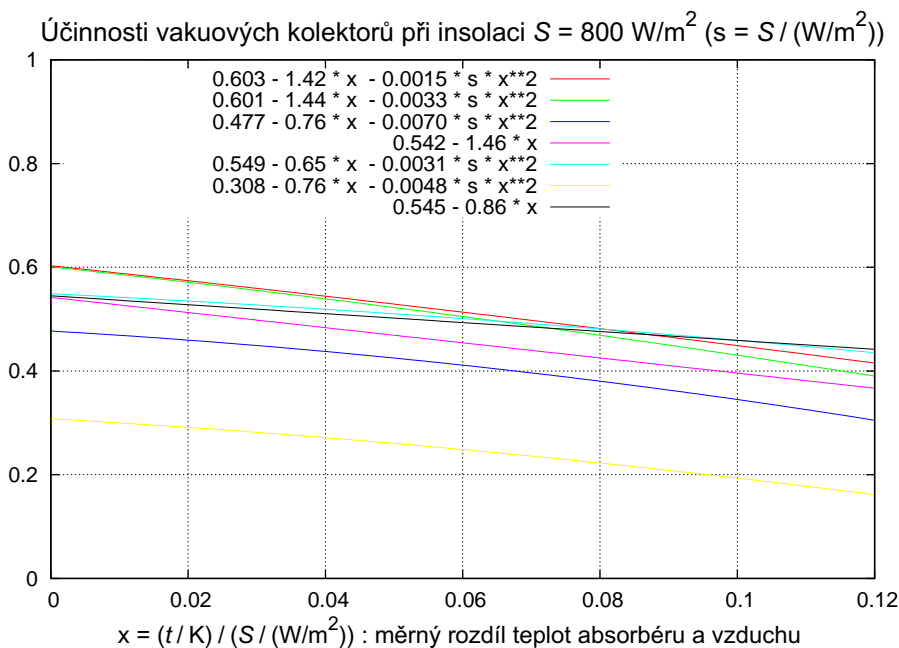
Jak již řečeno výše, mnohem větší změny zářivé složky tepelného toku lze docílit, pokud výrazně snížíme emitanci přepážky. U skel se toho docílí speciálním povrstvením, kovové vrstvy mají emitanci nízkou samy o sobě. Speciální povrstvení se užívá i u solárních absorberů. Ty nemohou zůstat čistě kovové, protože pak by nebyly dostatečně černé, odrážely by příliš mnoho slunečního záření. Mají být současně černé (v oboru slunečního záření) a „bílé“ (pro delší vlnové délky, aby se málo ochlazovaly vyzařováním. Je-li absorber umístěn ve vakuu, je (až na vedení okrajem kolektoru, kde je absorber napojen na neevakuované okolí, a ev. dalším uchycením absorberu) únik tepla z absorberu směrem do skla dán právě jen zářením. Přehled změřených hodnot pro takové kolektory poskytuje zkušebna v Rapperswilu [52]. Koeficienty u první mocniny $x = (t/K)/(s/W)$, kde s je hustota solárního zářivého toku dopadajícího na kolektor, jsou hodnoty u platné pro malý rozdíl teplot absorberu (jako analogie interiéru) a exteriéru. Dále se většina křivek ohýbá dolů, vlivem kvadratického členu teplotní závislosti ztrát kolektoru, viz obr. 2.3 (str. 22).

Celkově lze psát pro měrnou tepelnou prostupnost souvrství rovnicí obdobnou 2.4, s tím, že tepelné odpory krajních „vrstev“ popisují přestup tepla z pevné přepážky do okolního prostředí,

$$U = 1 / \left(\frac{1}{h_{\text{out}}} + \frac{1}{h_{\text{bar}}} + \frac{1}{h_{\text{int}}} \right), \quad (2.18)$$

kde h_{out} je koeficient přestupu tepla do exteriéru, braný např. jako $h_{\text{out}} = 23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})^6$, to odpovídá situaci za větru o velikosti rychlosti zhruba 5 m/s), $h_{\text{int}} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ pro přestup tepla ze skla do interiéru bez průvanu a h_{bar} je už materiálová vlastnost přepážky; např. pro jedno sklo tlusté 4 mm ji lze (při $\lambda = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) brát jako $h_{\text{bar}} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})/0,004 \text{ m} = 250 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – je zřejmé, že v tomto případě lze její převrácenou hodnotu v oné sumě

⁶viz [6, str. 53] uvádějící hodnotu užívanou v normě ISO/EN 10077-1



Obrázek 2.3: Zářivé ztráty vakuových kolektorů

měrných odporů zanedbat. Z toho vyplývá, že na tloušťce skla izolační vlastnosti okna téměř nezávisí.⁷

Při počítání odhadů U jsme užívali zjednodušující předpoklad, že celá přepážka má stejnou teplotu. Doopravdy to tak ale v praxi u oken není. Konvekci je v zimě vyhřívána z interiéru zejména horní strana skla, zatímco dolní strana, k níž proudí vzduch podél skla dolů, bude nutně studenější. Stejně se na tom podílí proudění na exteriérové straně, kdy je spodní strana chlazená zvenčí nejvíce, horní nejméně. U okna, které není až na vnějším líci zdi, k tomu přistupuje i skutečnost, že horní okraj skla není tolik vystaven studené noční obloze, méně se tedy ochlazuje zářením. Přesto odhad U , který jsme dostali, nebude daleko od skutečnosti. Na teplotě skla totiž příliš nezáleží, rozhodující jsou teploty interiéru a exteriéru.

2.1.3 Konvekce podrobněji

O konvekci jsme zatím uvedli jen tolik, že se zrychluje úměrně teplotnímu spádu a že tepelný tok roste rychleji než teplotní spád. Podstatná je ale také orientace přepážky. Jakkoliv je u oken nejběžnější orientace svislá, pro niž se vždy hodnoty U uvádějí, vyskytují se stále častěji i orientace jiné, typicky u oken střešních, jejichž exteriérová plocha je obrácena šikmo vzhůru k obloze. U takových zasklení nabývá U vyšších hodnot.⁸

⁷Když kromě tepelného toku „středem zasklení“ uvážíme i lineární tepelné mosty dané vedením tepla distančním rámečkem na okraji dvojskla nebo trojskla, je dokonce tepelně výhodnější v nich užívat skel tenčích, viz [20].

⁸Dobrý smysl mají orientace opačné, kdy je zasklení naopak nakloněno šikmo dolů, k zemi, jak to (v kombinaci s fotovoltaickými panely nakloněnými naopak šikmo nahoru) používá na jižní fasádě budova Ener-

Důvody jsou dva. Jedním z nich je tepelný vliv konvekce, probíraný v této sekci, dalším pak vliv záření probíraný v sekci další.

U svislého zasklení probíhá základní proudění podél skla: tam má vrstva vzduchu jinou teplotu a tedy i hustotu než okolní vzduch a tedy vlivem gravitace padá či naopak stoupá. Tepelný tok se odehrává jen těmi částmi proudění, kde se vzduch pohybuje jinak než podél rozhraní, čili vlastně jen vlivem okrajů konvektivních buněk, které jsou tehdy až na okrajích skla (vizualizaci takového proudění viz práci [69]). U střešních oken tomu v zimě může být jinak. Vezmeme-li případ dvojitého zasklení, pak se teplejší proud vzduchu může již dříve odtrhnout od spodního, teplejšího skla a pokračovat rovnou vzhůru k hornímu, chladnějšímu sklu. Konvektivní tok se tak projevuje jako značně tepelně účinný už při malém rozdílu teplot obou tabulí. U opačné orientace zasklení, kdy je teplejší tabule výše než tabule chladná, je naopak tepelný tok působený konvekcí potlačen. V extrémním případě, kdy by šlo o vodorovné okno nad sklepem či exteriérem, by konvekce neprobíhala vůbec a tepelný tok by byl dán jen zářením a vedením tepla. Jen tehdy jej lze počítat elementárně, bez odhadů vlivu konvekce opírajících se o empirii.

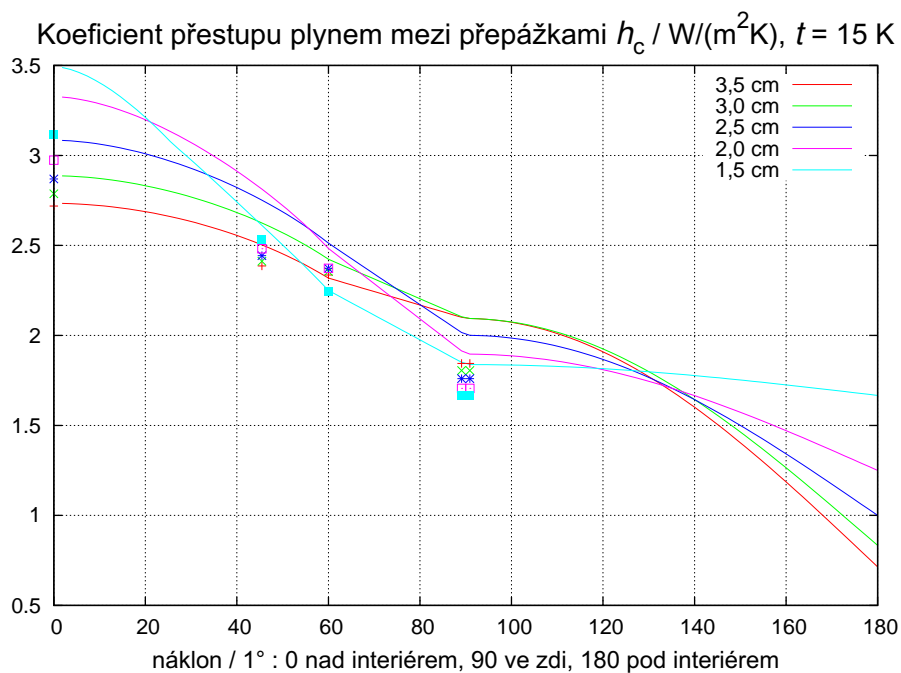
Příkladem je levné a účinné izolování stropu sklepa. Je-li pod stropem dostatek místa, lze jeden až (řekněme) tři decimetry pod něj nahnout pokovenou fólií. Zářivá složka koeficientu přestupu tepla z takové fólie do stropu bude při emitanci horní strany fólie $e = 0,17$ jen asi $h_r = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, složka připadající na vedení vzduchem bude nejvýše třetinová. Směrem dolů od fólie bude vedení vzduchem zanedbatelné (až na oblasti kolem zdí) a bude tak záležet hlavně na co nejnižší emitanci fólie – ta může na pokovené straně činit pouhá čtyři procenta (viz sekci Příklady měření...). Měrné odpory vůči přestupu tepla (první a poslední člen v sumě 2.18) budou tedy $1 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ nahoře a $5 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ dole, celkem tedy $6 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, převrácená hodnota pak $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, asi jako u dvaceti centimetrů pěnového polystyrénu. Materiálově to ale bude o řád levnější [37].

Vliv náklonu tenké rozlehlé dutiny (např. uvnitř dvojskla či trojskla) na složku tepelného toku, která je v ní zprostředkována plynnou náplní, ukazují grafy obr. 2.4 (str. 24) a 2.5. První je počítán dle vztahů uvedených v normách (jako ISO 15099) dle [6, str. 18-20]⁹ pro teplotní rozdíl mezi stěnami dutiny $t = 15 \text{ K}$ (to odpovídá zimní situaci při užití dvojskla, a je to též hodnota užívaná pro dvojsklo v normě ISO/EN 10077-1). Druhý pak pro $t = 5 \text{ K}$ (to by v zimě odpovídalo oknu obsahujícímu čtyři přepážky, nebo v teplejším období i dvojsklu). Je zřejmé, že při menším teplotním spádu je hodnota h_c , neradiační složka koeficientu přestupu tepla z jedné stěny dutiny na druhou, menší.

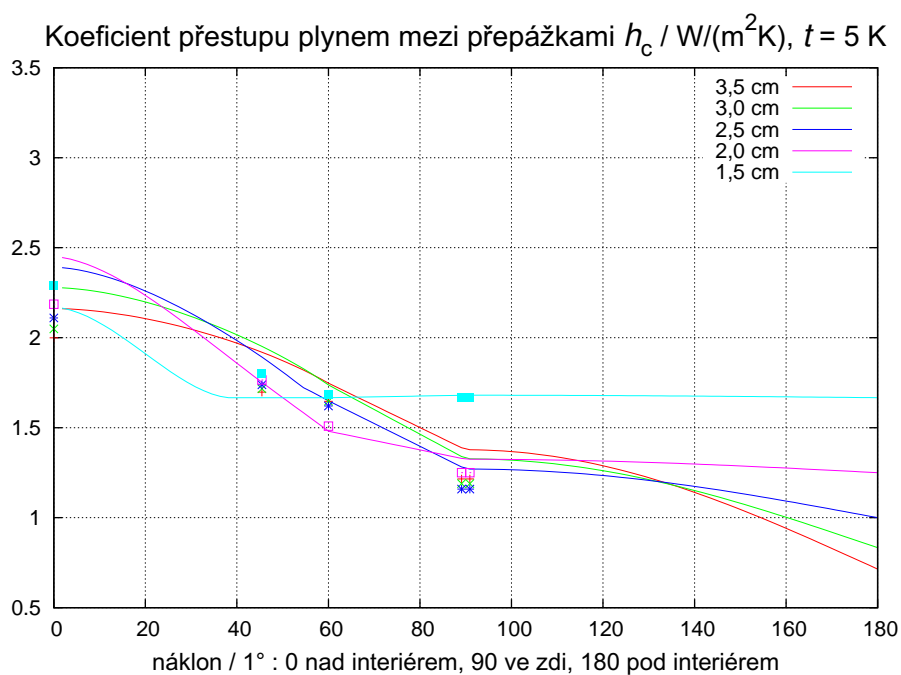
Grafy obr. 2.4 (str. 24) a 2.5 jsou nakreslené pro dutiny tlusté 1,5 cm až 3,5 cm při vzduchové náplni. Průběh křivek naznačuje, že užívané vztahy nejsou zřejmě zcela realistické. Body pro vodorovné zasklení, zasklení se sklonem 45° a svislé zasklení jsou počítány dle jednoduchých vztahů ISO/EN 10077-1. Samostatné body pro náklon 60° nejsou, na rozdíl od doporučení normy ISO 15099, použity pro interpolaci, neb pak by křivky byly nespojitě – nicméně jejich odchylka od křivek není velká. Norma užívá vztahy [68].

gyBase ve Vídni, viz <http://www.energybase.at>. Ty naopak izolují poněkud lépe než svisle orientovaná okna.

⁹Až na užití formulí pro náklon 60° pro interpolaci mezi náklony 60° a 90° .



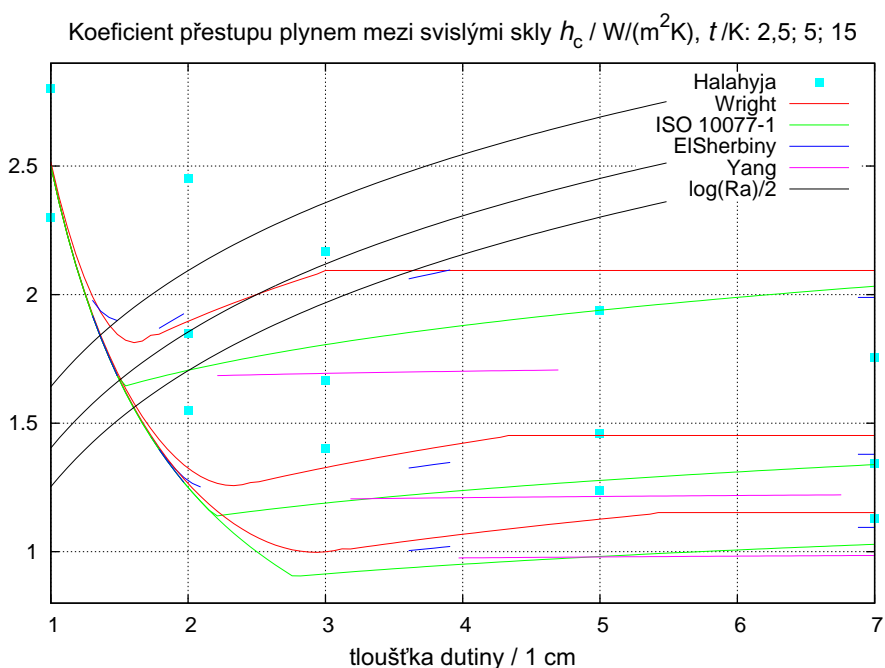
Obrázek 2.4: Transport tepla vzduchem v dutinách tloušťek 1,5 cm až 3,5 cm, $t = 15 K$



Obrázek 2.5: Transport tepla vzduchem (ev. jen kondukcí), $t = 5 K$, dle [6, str. 18-20]

Nedobrý souhlas dnes užívaných formulí pro výpočty tepelných vlastností střešních oken naznačují i měření laboratoře MoWitt [44], skutečný únik tepla byl větší.

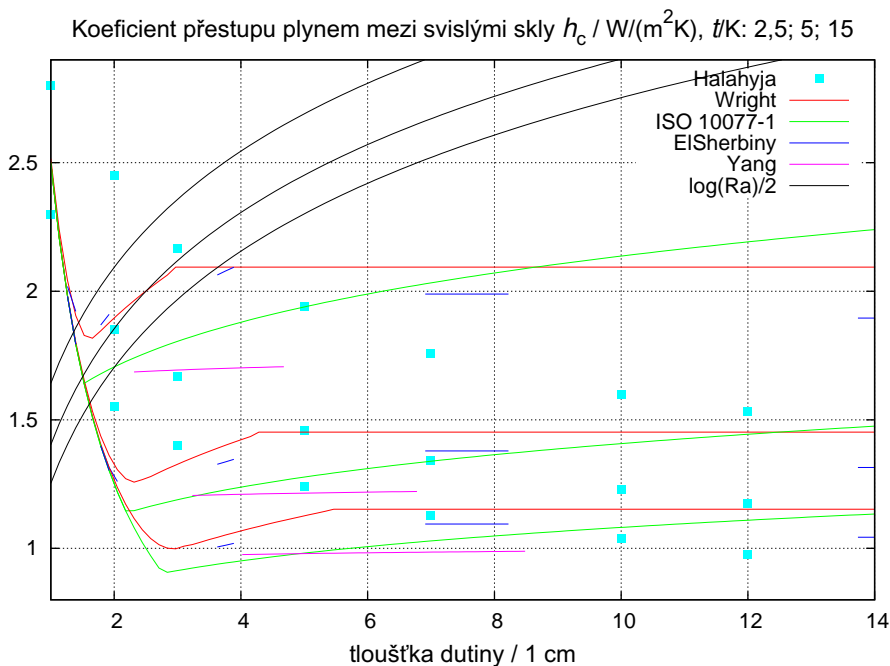
Základní experimentální údaje o neradiační složce tepelného toku v dutinách obdobných dvojsklům jsou uvedené v práci [12] z roku 1982, o níž se opírají všechny práce další. Pro dutiny s opačným náklonem (obdobných dvojsklům orientovaná k zemi) pak udává měřená data práce [11], ukazující, že už pro nevelké odchylky od svislé orientace je transport tepla v dutině vzduchem signifikantně menší, než udávají grafy dle normy (tj. dle [68]). Moderní práce shrnující poznatky v této oblasti (a přidávající vlastní počítačové modelování) je [70]. Její výsledky jsou pro svislé dutiny spolu se staršími údaji uvedeny v grafech obr. 2.6 (str. 25) a obr. 2.7 (str. 26) (ty se sice vztahují spíše k sekci o vícevrstvých zaskleních, poznatky o konvekci ale shrnuji už zde).



Obrázek 2.6: Neradiační složka přestupu tepla vzduchovými dutinami s izotermními stěnami, pro tři různé teplotní rozdíly (2,5 K, 5 K a 15 K – čím vyšší teplotní rozdíl t , tím větší přestup tepla). Stoupající křivky udávají Rayleighova čísla pro tyto tři případy (v práci se jimi jinde nezabývám, nicméně pro posuzování vlivu konvekce jsou to údaje základní). Realitou existence optimální tloušťky dutiny, např. necelých 2 cm pro $t = 15$ K, si nejsem jist, ale přinejmenším pro případ velkých t ji na základě dosavadních poznatků určitě nelze vyloučit. Příklad meziskelních dutin v oknech se kromě toho od situace zobrazené v grafu liší tím, že teplota horní a dolní části skla není stejná (viz např. [20]).

2.1.4 Záření k obloze

Druhý důvod vyššího tepelného toku střešními okny oproti oknům svislým spočívá ve skutečnosti, že pokud není mlha nebo velmi nízká hustá oblačnost, tak na střešní okno dopadá v noci mnohem méně záření než na okno svislé, natož pak okno nakloněné dolů. Zářívá na



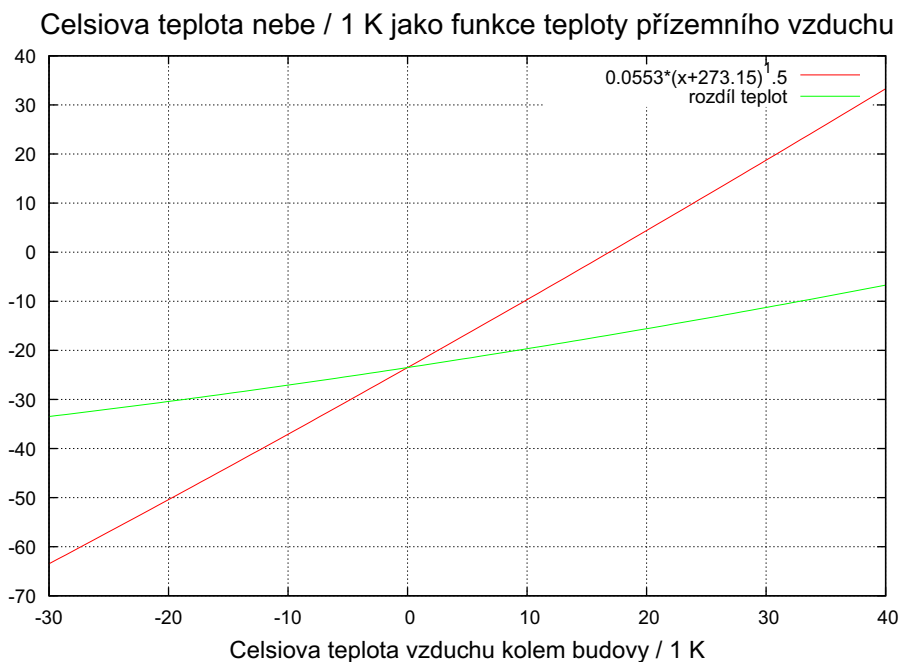
Obrázek 2.7: Neradiační složka přestupu tepla, i pro tlusté dutiny. Zdroje: Halahya [21, str. 64], Wright: [68], ISO 10077-1: [6], EISherbiny: [11], Yang: [70]. Nejstarší zdroj Halahya téměř jistě přeceňuje vliv konvekce u tenkých dutin, ISO 10077-1 a Wright naopak jej přeceňují naopak u tlouštěk nad 10 cm.

ně tehdy buď mraky z vyšších výšek, tedy chladnější než je přízemní vzduch (lze počítat s úbytkem teploty až o 1 K na každých 100 m výšky), nebo dokonce jen bezoblačný vzduch sám. V případě vodorovného střešního okna je efektivní teplota bezoblačného ovzduší zhruba o 20 K nižší než teplota přízemního vzduchu či pozemské krajiny, i u šikmých oken to může být běžně 15 K. Exteriéru tehdy nelze ani přibližně připsat jedinou teplotu, je nutno počítat s teplotami dvěma, jednou pro zářivý tok, druhou pro ochlazování vzduchem. Větší rozdíl mezi teplotou přízemního vzduchu a černou teplotou oblohy [24] je v dobách, kdy obsahuje vzduch méně vodní páry, tedy za mrazů. Vhodnou formuli pro odhad černé teploty jasné noční oblohy T_{sky} v závislosti na teplotě přízemního vzduchu T_{air} udává [49, str. 13] (citující starší prameny):

$$T_{sky} = 0,0553 \cdot T_{air}^{1,5} \quad (2.19)$$

Podrobnější informace o černé teplotě oblohy v různých úhlových výškách viz [3].

Jak velké je zářivé ochlazování, to bývá patrné po jasné noci z množství zkondenzované rosy nebo nasublimovaného jíní na plochách, které jsou zespodu tepelně izolovány. Ty se vyzařováním vzhůru ochladí až na rosný bod či bod ojínění a od dalšího chladnutí je chrání skupenské teplo přibývajících vrstvičky vody či ledu. Na jednoduchém zasklení to bývá vidět na solárních kolektorech. U budov se to z vnější strany stává na nejlepších trojitých zaskleních. Dlouhotrvající ranní ojínění střešních oken je nepříjemným průvodním jevem jejich dobrých tepelně-izolačních vlastností. Obrana je proti tomu jediná, pomíneme-li jejich záměrné vyhřívání, které by popíralo jejich účel: přidat nad ně na noc další vrstvu, která se ojíní místo nich. Mohlo by jít i o vrstvu průhlednou či dobře průsvitnou. Takovou by



Obrázek 2.8: Teplota oblohy a rozdíl oproti přízemní teplotě

se hodilo odsunout, teprve až by se tak stala tepelná bilance okna příznivější, čili zvýšení zářivého ochlazování by bylo vyrovnáno většími solárními zisky. Nebo až by bylo potřeba maximalizovat světelné zisky. Pokud by noční clona byla ale málo průsvitná, její odsunutí by mohlo být potřeba kvůli světlu už za svítání, ač by to ještě případně vedlo k mírnému ožinění zasklení.

Vnější noční clona nad střešním oknem může být i taková, že se zářivě ochlazuje jen málo a běžně se tedy neožíní. K tomu by její horní povrch musel mít nízkou emitanci, v praxi tedy být tvořený hliníkem. Absence jíní či rosy je jistě žádoucí pro zvýšení trvanlivost clony i např. jejímu snazšímu navíjení. Aluminiový povrch také dobře zabrání ev. letnímu přehřívání přímým sluncem, zejména pokud jsou k dispozici jiná okna, která interiér osvětlí jen rozptýleným zářením modré oblohy.

Mechanismus vnější clony by ev. mohl vykonávat ještě další příležitostnou funkci, totiž odhrnování sněhu ze střešních oken – jejich možné dlouhodobé zasněžení výrazně snižující denní osvětlenost interiéru je totiž dalším jevem, který s sebou dobře izolující zasklení přináší.

Alternativní pomocí proti rosení a ožinění, která ovšem sněh odstraňovat nedokáže, je užití vrstvy zajišťující nízkou emitanci vnější strany zasklení. Při použití tvrdé pyrolitické vrstvy lze dosáhnout emitanci 0,2, tedy snížení zářivého ochlazování alespoň čtyřikrát. Aby se pak sklo udrželo na teplotě okolního vzduchu, stačí, aby jím z interiéru procházelo 20 W/m^2 . To se za mrazů i u nejlepších dnešních střešních oken dnes stává. Takové vnější povrstvení by sice poněkud snížilo i jindy žádoucí solární zisky, pokud by se to ale vyrovnalo s úbytkem doby, kdy jsou beztak snižené rosou či jíním, mohlo by to přinést i tepelný prospěch.

U svislých oken s dobrým trojitým zasklením je orosení či ojinění běžné jen v poměrně otevřené krajině, vysoké koruny stromů v jejich blízkosti je potlačují, případně mu úplně zabrání. Omezením prostorového úhlu zaujímaného oblohou ovšem potlačí i denní světelné a obecně solární zisky. I zde je tedy lepší chránit je na noc pohyblivými vnějšími clonami, v tomto případě mohou stačit i široké vodorovné lamely či mírně skloněné lamely užší, užívané jindy např. pro potlačení oslnění či solárních zisků.

Ideální orientací pro omezení ojinění či orosení oken zvenčí je jejich náklon směrem dolů, aby zářivé ztráty z oken do nebe byly sníženy. Okna pak zářivě komunikují zejména s terénem. I v případě trojitého, výborně izolujícího zasklení by u nich nemělo docházet k orosení či ojinění téměř nikdy. Okna pak také lépe tepelně izolují. Na druhé straně je taková orientace oken méně vhodná pro instalování těsných foliových rolet (nemohou snadno přilehnout k těsnicí liště vlivem vyšší hustoty vzduchu v chladné kapse, viz kapitolu 4). U jižních oken nicméně poskytuje užitečnou ochranu proti letnímu přehřívání, jak uvádí např. [63, str. 159], aniž by významně snížila zimní solární zisky. To bylo hlavním důvodem pro její volbu u budovy EnergyBase, <http://www.energybase.at>.

Značná propustnost tenkých plastových fólií pro dlouhovlnné záření se pozoruhodně projeví tehdy, jsou-li v exteriéru použity místo skla. Pak se totiž mnohem méně ojiní.

2.1.5 „U“ vícevrstvých zasklení

Tok tepla z jedné skleněné tabule na druhou, rovnoběžnou, blízkou a stejně velkou se liší od toku z rozlehlého okolního prostředí na vnější plochu skla tím, že je nutné počítat nejen s odrazem od jedné plochy, kdy stačí brát okolí jako černé těleso nějaké teploty. U paralelních tabulí je nutné uvažovat mnohonásobné odrazy od obou ploch [26].

Pro dvě stejně velké rovnoběžné povrchy různých teplot T_1 a T_2 je plošná hustota emise z každého z nich $E_i = \sigma e_i T_i^4$ ($i \in \{1,2\}$) a plošná hustota absorbovaného příkonu je na ploše 1 (opačná plocha je 2)

$$A_1 = e_1 \left(E_2 \left(1 + r_1 r_2 + (r_1 r_2)^2 + \dots \right) + E_1 r_2 (1 + r_1 r_2 + \dots) \right) \quad (2.20)$$

$$= \frac{e_1 (E_2 + E_1 r_2)}{1 - r_1 r_2}, \quad (2.21)$$

kde $r_i = 1 - e_i$ je reflektance plochy nepropouštějící dlouhovlnné záření.

Podstatný je konečně rozdíl mezi výkonem a absorbovaným příkonem:

$$A_1 - E_1 = \frac{(1 - r_1)(E_2 + E_1 r_2)}{1 - r_1 r_2} - E_1 \quad (2.22)$$

$$= \frac{(1 - r_1)(E_2 + E_1 r_2) - E_1(1 - r_1 r_2)}{1 - r_1 r_2} \quad (2.23)$$

$$= \frac{(1 - r_1)E_2 - (1 - r_2)E_1}{1 - r_1 r_2} \quad (2.24)$$

$$= \sigma \frac{(1 - r_1)(1 - r_2)T_2^4 - (1 - r_2)(1 - r_1)T_1^4}{1 - r_1 r_2} \quad (2.25)$$

$$= \sigma \frac{(T_2^4 - T_1^4)e_1e_2}{1 - r_1r_2} \quad (2.26)$$

$$= \sigma \frac{(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1} . \quad (2.27)$$

Pro stejné emitance $e_1 = e_2 = e$ je tedy

$$A_1 - E_1 = \sigma(T_2^4 - T_1^4) \frac{e}{2 - e} . \quad (2.28)$$

Pro rozdíl teplot t , čili pro $T_2 = T + t/2$, $T_1 = T - t/2$ je rozdíl čtvrtých mocnin teplot

$$T_2^4 - T_1^4 = T^4 \frac{4t}{T} \left(1 + \left(\frac{t}{2T} \right)^2 \right) \quad (2.29)$$

a tedy

$$A_1 - E_1 = 4 \sigma T^3 t \left(1 + \left(\frac{t}{2T} \right)^2 \right) \frac{e}{2 - e} . \quad (2.30)$$

Pro dostatečně malý rozdíl teplot $t \ll T$ platí přibližně

$$A_1 - E_1 = 4 \sigma T^3 t \frac{e}{2 - e} . \quad (2.31)$$

Pro $T = 278$ K (střed mezi mínus deseti a plus dvaceti stupni) je to

$$A_1 - E_1 = 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 278^3 t \frac{e}{2 - e} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (2.32)$$

$$= 4,87 t \frac{e}{(2 - e)} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) . \quad (2.33)$$

Pro emitanci $e = 0,84$, jakou má sklo, je podíl

$$\frac{e}{(2 - e)} = 0,72 \quad (2.34)$$

a měrný zářivý přenos mezi skly je pak

$$A_1 - E_1 = 3,53 t \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) . \quad (2.35)$$

Komponenta U odpovídající zářivému toku je tak mezi nepovrstvenými skly poněkud menší než mezi sklem a rozlehlým okolím, a to o $(1 - 0,72)/0,84$ aneb o 14 %. Přesto je větší než komponenta připadající na transport tepla plynem. To lze snadno demonstrovat výpočtem, jakou tloušťku d by musela být vrstva vzduchu, aby měrná hustota konduktivního toku tepla skrze ni (λ/d) činila rovněž $3,53 t \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Při měrné tepelné vodivosti vzduchu $\lambda = 0,025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ to je zřejmě

$$d = \frac{0,025}{3,53} \text{ m} \quad (2.36)$$

čili sedm milimetrů. To je dobrá „vizualizace“, jak velký je měrný zářivý tok mezi dvěma skly: takový, jako vedením skrze 7 mm vzduchu nebo jako skrze 10 mm až 12 mm pěnového polystyrénu.

Další odlišnost je v tom, že konvektivní proudy probíhají podél obou skel, a to v opačném směru. Při malé tloušťce dutiny to vede k tomu, že je proudění pomalejší a průtok vzduchu menší, tepelný vliv konvekce se tak projeví až při větších rozdílech teplot. To ale nedává tenkým dutinám reálnou výhodu, neb se u nich už i bez konvekce významně uplatňuje vedení tepla vzduchem, viz výše uvedený příklad s extrémně tenkou 7mm dutinou. Tlustší dutiny tak izolují lépe, přičemž zvláště výrazné je to u malých spádů teplot. Problémem je, že spolehlivá měření pro dutiny tlustší než asi 24 mm zřejmě nejsou dostupně publikována a vztahy užívané pro výpočty se skutečně ohlížejí jen na běžná tuhá lepená hermetická souvrství, u nichž je tloušťka dutiny omezena mechanickým namáháním skel za extrémních teplot. Výsledky pro tlustší dutiny uvedené v grafech obr. 2.4 (str. 24) a 2.5 na konci sekce Konvekce podrobněji nelze proto brát za spolehlivé.

To lze demonstrovat na příkladu velmi tlustých dutin, za jaké můžeme považovat obvyklá stará zdvojená okna, v nichž jsou skla od sebe vzdálena jeden až tři decimetry. Pak je možné brát transport plynem za obdobu transportu z vnitřního skla do interiéru, pouze s tím rozdílem, že proudění mezi skly není poháněno žádnými jinými zdroji než rozdílností hustot vzduchu danou různými teplotami skel, zatímco v interiéru bývají radiátory, pohybují se tam lidé, vzduch může být poháněn ventilátory. Tepelný tok mezi skly zprostředkovaný vzduchem pak můžeme odhadnout dle grafu obr. 2.2 (str. 20). Je-li rozdíl teplot skel 15 K, pak lze teplotu vzduchu v dutině považovat za odchýlnou od teplot skel o $t = 7,5$ K. Tomu by odpovídaly nejspíše $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ konvektivní složky toku sklo-vzduch. Při daném teplotním spádu to znamená asi $23 \text{ W}/\text{m}^2$, a děleno celkovým spádem teplot mezi skly pak jen $1,53 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. To je méně než interval $(1,7; 2,1) \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, jak jej ukazuje obr. 2.4 (str. 24). S tím ve shodě jsou údaje ze starých stavebních tabulek, které hodnotily dvojitá okna jako lépe izolující než okna zdvojená a zejména než okna jednoduchá s dvojskly, viz např. [57, str. 18] udávající u pro postupně tlustší dutiny jako 2,5, 2,4 a 2,35 (před násobením nějakým číslem větším než jedna, užívaném pro stavební praxi).¹⁰

Rozeberme nyní dále případ vícevrstvých oken s tlustými dutinami. Jestliže pro jednu skleněnou přepážku dostáváme za bezvětří a nízké oblačnosti hodnotu $U_1 \approx 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ a tedy pro její převrácenou hodnotu, měrný tepelný odpor $R_1 = 0,2 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, pro dvojité okno z toho plyne odpor dvojnásobný, $R_2 = 0,4 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, čili $U_2 = 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Stejně bychom mohli postupovat dále, pro větší počet vrstev, pokud by ovšem byly jejich odstupy také tak velké – to v praxi nikdy nejsou. Existují nanejvýš instalace, kdy se do jednoho či obou rámu dvojitého okna přidalo další sklo, a to na opačnou stranu rámu, než bylo sklo původní. Typická vzdálenost obou skel v jednom rámu pak činí tři centimetry. Je už taková dutina příliš tenká, než abychom v ní mohli zanedbat vedení tepla vzduchem i bez přítomnosti konvekce? To záleží na teplotních rozdílech. Při těch maximálních, obvyklých za zimních nocí, to udělat můžeme. Jak je uvedeno již výše, sumu efektivních tloušťek vzduchu, uvažovaného jako neproudící prostředí podél skla, můžeme brát jako asi 12 mm. To je několikrát méně než 3 cm. Nebo jinak, běžná konvektivní složka h_c mezi dvěma

¹⁰U tlustých dvojitých oken se ovšem na mírně lepší tepelné izolaci podílí i skutečnost, že už nejde o dvě blízké paralelní skleněné vrstvy, kde zářivý přenos probíhá jen mezi nimi. Prostorový úhel zaujímaný protějším sklem je menší než 2π sr, zbytek je zaujíman dřevěnými rámy a bočními deskami, jejichž teploty jsou méně extrémní.

svislými skly činí $2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, zatímco 3 cm nehybného vzduchu by vedením propouštěly při $\lambda = 0,025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ jen $\lambda/0,03 \text{ m} \approx 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. I u dvojitých oken doplněných třetím nebo i čtvrtým sklem můžeme tedy stále uvažovat s měrným tepelným odporem přinášeným přítomností každé skleněné vrstvy na úrovni $0,2 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, tedy pro tři skla s $R_3 = 0,6 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, čili $U_3 = 1,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ a $R_4 = 0,8 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, čili $U_4 = 1,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Je patrné, že ani čtyři skla v původně dvojitém okně neposkytnou dobrou tepelnou izolaci, jakou umožňují dnešní lepší technologie. Před dvaceti lety ale bylo přidávání dalších skel prakticky jedinou snadnou možností, jak tepelné vlastnosti oken vylepšit. Také se občas používalo tam, kde bylo potřeba žádat zimní únik tepla z budovy snížit. Nevýhodou vyššího počtu skel jsou nižší solární světelné a tepelné zisky, může vadit i vyšší hmotnost oken.

Alternativou přidavných skleněných vrstev ve dvojitých oknech jsou přidavné tenké plastové vrstvy. Jako fólie nalepené na rámu okna skutečně snižují tepelné ztráty okny, přičemž úbytek zejména solárních tepelných zisků je menší než při užití skel. Nevýhodou tenkých fólií ale je, že jsou jen malou bariérou pro dlouhovlnné záření.¹¹ Rozdělují tak vzduch do více konvektivních buněk, ale dominantní složku tepelného toku, totiž, zářivou, potlačují málo. Autor používá přidavné fólie již mnoho let. Pokud jsou instalovány obě dvě, výsledek není ani tak dobrý, jako po přidání třetího skla. Považujeme-li je za zcela prostupné pro dlouhovlnné záření, pak jejich vliv můžeme aproximovat jako potlačení konvektivní složky toku mezi skly na čtvrtinu (místo jedné dutiny máme nyní dvě, každou zhruba s polovičním teplotním spádem) a konvektivní složky na vnitřní straně okna na zhruba na třetinu (na čtvrtinu to není proto, že teplotní spád mezi sklem a fólií bude větší než mezi fólií a interiérem). Pro tepelný tok ze skla do interiéru tak můžeme počítat s hodnotou měrného odporu $(1/(4,5 + 4/3) = 0,17) \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, mezi skly s hodnotou $(1/(4 + 2/4) = 0,2) \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ a zvenku např. za mírného větru s hodnotou $0,07 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Výsledná hodnota $U \approx 2,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ není nijak skvělá, stav bez fólií by totiž za stejného vnějšího koeficientu přestupu tepla vyšel jako $2,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Ve skutečnosti je ale zlepšení mírně větší, neb takové fólie pro dlouhovlnné záření mírnou překážkou přece jen jsou (viz konec sekce Příklady měření směrových emitancí). V praxi má přidání fólií ještě jednu výhodu, kromě snížení tepelných ztrát: teplota fólie na interiérové straně je natolik vysoká, že na ní ani v mrazech nekondenzuje voda. Nevýhoda běžných tenkých fólií je pak ta, že jejich životnost není větší než několik let (poškozuje je sluneční záření, i když je filtrované skly) a že se nedají čistit. Místo čištění se musí vyměnit.

¹¹Obdobný jev, totiž značná propustnost uhlovodíkových plastů pro dlouhovlnné záření, je i příčinou, proč pěnový polystyrén malých objemových hmotností izolují hůře než pěny s většími objemovými hmotnostmi. Přitom by tomu mělo být naopak, protože konduktance vzduchu je řádově menší než konduktance plastu. Zářivý tepelný tok skrze mikroskopické stěny buněk pěny lze ale potlačit přidáním nanočástic grafitu. Výsledný šedý či stříbřitý pěnový polystyren s objemovou hmotností $15 \text{ kg}/\text{m}^3$ pak izoluje lépe než bílý EPS s hustotou $30 \text{ kg}/\text{m}^3$. Podobného zlepšení lze dosáhnout u pěnového polyetylenu. Výroba „nedopovaného“ EPS pro tepelné izolování by měla co nejdříve skončit, jde o nezodpovědné plýtvání cenným materiálem. (Jediným zbylým argumentem pro něj je, že se ani v největších vedrech na stavbě nerozpálí sluncem; tmavý polystyrén lze ovšem v takových situacích buď zakrýt světlou fólií nebo světle natřít, pokud by teploty, kterých by jinak dosáhl, mohly způsobit problémy.) Rozšíření šedého EPS brání ale i nesmyslná tvrzení prodejců, že jeho úprava „odráží záření směrem ke zdroji“ – to u mírně poučených zákazníků vzbuzuje dojem, že jde o klamavou reklamu. Příklad, že mezi tepelně-izolačními pěnovými materiály jsou značné rozdíly, pokud jde o dlouhovlnnou transmisivitu, viz sekci Příklad měření transmitance.

Pro výrazné snížení tepelných ztrát je tak zjevně nezbytné potlačit přenos zářivý. Standardem pro pasivní domy jsou dnes zasklení trojitá, v nichž jsou dvě krajní skla opatřena na straně do okenní dutiny vrstvou nízké emitance, běžně klesající až k $e = 0,04$. Pak je většina tepelného toku už realizována ne zářením, ale právě jen plynou náplní dutiny. Orientačně: při emitanci jedné strany komory na úrovni 0,04 připadá na zářivý tok uvnitř komory jen $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Pokud by komora byla vyplněna vzduchem a měla tloušťku 2 cm, už na samotné vedení tepla bez existence konvekce by připadalo $0,025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})/0,02 \text{ m} \approx 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, téměř o řád více než na tok zářivý. Cesta k ještě lepší tepelné izolaci tak dále vyžaduje snížení tepelného toku realizovaného plynou náplní souvrství.

Zůstaňme ale ještě u materiálu přepážek. Známostou alternativou skla, která má výhodu, pokud jde o celkovou tloušťku a hmotnost zasklení, je užití dvou nepovrstvených skel, mezi nimiž je oboustranně povrstvená fólie [23]. Komplikací při užití takové fólie je potřeba jejího dokonalého vypnutí (nejde o potřebu fyzikální, ale vzhledovou či komerční), toho se docíluje jejím mírným smrštěním v peci, i nutnost užití méně dobře tepelně izolujících okrajových distančních rámečků (nerez místo plastů, z důvodů mechanických i vysokých teplot v peci; izolacniskla.cz, osobní sdělení). Jinou alternativou, s výhodou nižší hmotnosti a snížení rizika úniku plynné náplně mezi skly, je použití obyčejné plastové vrstvy mezi dvěma povrstvenými skly. Ta byla pro různé materiály zkoumána v [1] – jako perspektivní se ale jeví jen použití plexiskla. U fólií, které nejsou tuhé, je problémem jejich trvalé umístění uprostřed mezi skly spolu s trvalou vyhovující těsností po bocích a dolní či horní straně. Případně i s trvalou odolností proti slunečnímu záření. Žádoucí je rovněž antireflexní úprava, která je i u plastů v zásadě možná technologií sol-gel [59].

Průhledná fólie mezi dvěma skly, nebo lépe taková fólie instalovaná dvojitě (to může být snazší i mechanicky, užitím slepeného „rukávu“ napnutého na rámečku třeba nerezovém), ale jako další možná technologie pro budoucnost myslitelná je. To tehdy, bude-li výborně nejen odolná proti slunečnímu záření, ale také nebude absorbovat dlouhovlnné záření (tj. i její emitance bude blízka nule). Potlačení zářivého přenosu v celé komoře mezi skly zajistí pak už jediná vrstva nízké emitance. Rozdělení komory fólií na tři dutiny umožní řádově snížit i konvektivní tepelný tok. Třetinový teplotní spád na každé dutině oproti spádu mezi skly znamená, že konvekci bude možné úplně zanedbat. Při celkové tloušťce komory mezi skly rovné 3 cm by pak celý tepelný tok probíhal jen vedením a zářením. Spočítejme dosažitelné tepelné odpory: na zářivý přenos připadá při emitanci jedné strany komory na úrovni 0,04 jen $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, na vedení vzduchem ovšem mnohem více, oněch výše zmíněných $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Číselná hodnota měrného odporu celého souvrství je tedy např. $1/8 + 1/0,96 + 0,07 \approx 1,24$ a tedy $U = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Stejně jako u dnes již běžných dobrých dvojskel a trojskel, je zde většina tepelného toku způsobena vedením tepla plynou náplní dutin. Snížit tepelný tok je možné jen při užití plynů s menší tepelnou vodivostí než má vzduch. Nejvhodnější jsou tzv. vzácné plyny, tedy prvky osmé skupiny, jejichž molekuly jsou jen jednoatomové. Pohyb jejich molekul má jen tři stupně volnosti (tzv. translační, na pohyb v trojrozměrném prostoru), na rozdíl od dvouatomových plynů s pěti stupni volnosti (dva stupně navíc jsou dány změnou směru páru atomů, jsou to rotační stupně volnosti; další stupeň volnosti, na vibraci, se při malých tep-

vzduch	argon	krypton	xenon
25	17	8,7	5,3

Tabulka 2.1: Měrné tepelné vodivosti plynů / $\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ při 10°C

lotách neuplatní). Jejich kinetická energie při dané teplotě je tak menší a menší je proto i jejich specifické teplo na jednu molekulu (či na jednotku objemu), jemuž je tepelná vodivost úměrná. Ta je dále úměrná rychlosti molekul, která klesá s odmocninou z hmotnosti molekuly (kinetická energie molekuly je úměrná součinu hmotnosti a kvadrátu rychlosti). Vzácné plyny s molekulovou hmotností větší než vzduch tak izolují výrazně lépe než vzduch. V první řadě je to běžný argon, jehož je ve vzduchu celé jedno procento, tedy deset litrů v každém kubickém metru vzduchu. Téměř dvakrát lépe izoluje pak krypton a o další dvě pětiny lépe xenon (radon už pro stavební využití nepřichází v úvahu, neb je radioaktivní). V ideální situaci, kdy se neuplatňuje konvekce, nabízejí ty těžší vzácné plyny vynikající parametry okenních souvrství: např už pro krypton by na vedení tepla mezi skly připadlo při celkové tloušťce komory rovné 3 cm jen $(0,009/0,03 = 0,3) \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Dvojsklo se dvěma (hypotetickými...) vnitřními přepážkami z dlouhovlnně průhledné fólie by tak mohlo mít $U < 0,50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Cena plynové náplně (pokud by se s kryptonem pracovalo beze ztrát) by přitom byla jen tisíc korun na metr čtvereční – sice ne málo, pokud jde o cenu zasklení, ale nevelká oproti ceně celého okna. Při užití xenonu s konduktancí alespoň o třetinu nižší ($\lambda = 0,0053 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) by takové hypotetické souvrství mělo $U = 0,32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – ovšem při ceně náplně asi 300 eur za metr čtvereční.

Výše uvedené ideální hodnoty U pracují s hypotetickým případem neabsorbující fólie. Reálné fólie, které užívám, pohlcují v oboru $8 \mu\text{m}$ až $14 \mu\text{m}$ asi 10 % dopadajícího záření, propouštějí asi 82 % (viz konec sekce Emitance). Za předpokladu, že tyto hodnoty platí i pro ostatní vlnové délky dlouhovlnného záření, vychází při užití kryptonu v programu Window6 [67] hodnota méně ideální, $u = 0,7$. Pokud by ale dvě fóliové přepážky byly v dutině jejíž obě krajní skla by byla opatřena vrstvou velmi nízké emisivity, souvrství by dosahovalo $u = 0,4$.

Je potřeba poznamenat, že hermetická komora o tloušťce tří centimetrů je zřejmě blízko maximu, které lze při užití skel dosáhnout. To je způsobeno změnami teplot mezi zimou a létem, kdy se mění absolutní teplota plynové náplně až o deset procent. Stejně by se měnil i její objem, pokud by se k sobě mohla skla libovolně přibližovat. Dnešní technologie vytváření těsných dvojskel ale nepoužívá na okrajích tak měkké tmely, které by to umožňovaly. Distanční rámečky na okrajích dvojskel jsou tuhé. A souvrství se slepují za horka, takže po vychladnutí jsou i v teplém stavu obě skla uprostřed prohnutá směrem k sobě (větší prohnutí pak nastává za mrazů, viz druhé okno zleva na obr. 8.9 (str. 93), tím se izolační vlastnosti značně zhoršují). Pravděpodobný mechanický limit se odráží i v maximální nabízené tloušťce dutin pro trojskla, která činí 18 mm (mezi vnějšími skly je tedy celkem 36 mm argonové náplně).

Alternativa pružných distančních rámečků by umožňovala používat zasklení s argonovou náplní i s velkými tloušťkami dutin, které by s přidanými plastovými přepážkami poskytovaly výborné izolační vlastnosti. Současně by u ní bylo bezproblémové užívání tenčích skel, než

je nyní obvyklé. Rovněž i kombinování tlustého a tenkého skla, výhodné z hlediska akustické izolace; útlum zvuku kromě toho roste i s nárůstem tloušťky dutiny. Z pohledového hlediska i z hlediska zamezení zvláště silným „prasátkům“ by byla výhodná trvalá rovinnost skel (dvojskla či trojskla, v nichž je podtlak, fungují svou vnější plochou jako duté zrcadlo). Technologie zamezení difuzi by mohla být převzata z technologie vakuových izolačních skel (svařování hliníkové fólie se sklem a pak fólií vzájemně), viz [60], ale možná by stačila technologie z vakuových izolačních panelů [61], užívající plastové fólie s napařeným hliníkem, přičemž kontakt fólie se sklem by byl zajištěn jen lepením, ne svařováním. Tím by byl minimalizován i tepelný most na okraji zasklení. (Více o vakuových dvoj- a trojsklech viz [41] a [47].)

Neomezená celková tloušťka dutiny mezi krajními skly (ať již v lepeném souvrství s argonem nebo v souvrství montovaném či ve dvojitém okně, tj. s dutinami, v nichž je vzduch) dává možnost umístit do ní i přepážky pohyblivé, omezující průhled oknem ven, v chladném období na noc uzavírané. Takové přepážky mohou mít velmi nízkou emitanci a chovat se tudíž podobně jako skla s vrstvami nízké emitance. Pokud by šlo o přepážky těsné, tepelný odpor každé takové podskupiny povrch-plyn-povrch by dosahoval zhruba $0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$ při argonové náplni a $0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ při užití pouhého vzduchu.

Použití právě takových pohyblivých clon s nízkou emitancí navrhl autor již v roce 1998. Praktické realizace se jim dostalo ale až jako předmětu jeho činnosti během doktorského studia. Jejich umístěním do dvojitých oken a uzavíráním na noc byly skutečně dosaženy očekávané hodnoty $U = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ při aplikování jedné clony a $U = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ při aplikaci dvou clon.¹²

2.2 Vliv netěsností a jejich eliminace

Výše uvedené úvahy a změřené hodnoty se vesměs týkají přepážek těsných, zcela zabraňujících proudění vzduch mezi prostory, které rozdělují. Takovými jsou nejlepší okna (nejen ve standardu pro pasivní domy), a mohou jimi býti i okna stará, jsou-li správně utěsněná.

Dostatečně utěsnit lze totiž každé staré okno, využijí-li se k tomu moderní materiály. Ty mohou být typu pěn s uzavřenými póry (polyetylenové samolepicí pásky) nebo dutých profilů opatřených perem, které se vsunuje do vyfrézované drážky. Jediným problematickým místem, v němž je obtížné docílit dokonalé těsnosti, jsou rohy dvojkřídlých oken, kde se stýkají obě křídla se svým nepohyblivým rámem. K uspokojivé těsnosti se lze ale dostat i tam.

Za uspokojivou těsnost lze označit takovou, kde tepelný tok prouděním skrze netěsnosti činí zanedbatelnou část tepelného toku skrze přepážku, tj. řekněme nejvýše jedno procento.

¹²Obdobné clony by mohly snížit i tepelný tok skrze duté plastové okenní rámy, pokud by se do dutin vsunuly přepážky z aluminiové fólie s plastovými hranolky, které by přepážku držely uprostřed dutiny. U rámu s tlustými komorami by to mohly být i přepážky dvojitě, tvořené tenkými aluminiovými plechy s distančními plastovými hranolky jen na okrajích (tento návrh na potlačení zářivého toku v rámech se objevuje až zde, v textu disertace).

Vztaženo na metr čtvereční okenní plochy a horní limit pasivního standardu pro okna, který činí $U = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ [15], lze tedy za uspokojivou těsnost označit stav, kdy složka tepelného toku, která je jí způsobena, je $< 0,008 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Při měrném teple vzduchu $1,3 \text{ kJ}/(\text{m}^3\text{K})$ z toho vyplývá, že na jeden metr čtvereční okna musí mezi interiérem a exteriérem procházet méně vzduchu než 6 ml/s aneb 22 l/h . Podstatné je, aby to platilo i při silném větru nebo velkém rozdílu teplot, tedy např. při rozdílu tlaků až 50 Pa .

Je zjevné, že i vyšší než jednoprocenní příspěvek netěsnosti k celkové tepelnému toku okenní výplní může být stále ještě tolerovatelný, např. až příspěvek pětiprocenní. U běžných starých dvojitých oken by se pak taková, tepelně ještě tolerovatelná hranice blížila až $0,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$.

Jiná věc je, že i takové nevelké netěsnosti mohou činit problém, pokud vzduch odcházející z interiéru prochází škvírami, které jsou natolik studené, že na jejich povrchu kondenzuje vodní pára. Žádoucí proto je, aby okna byla těsná zcela.

Jiný typ netěsnosti se týká přepážek tvořených jiným materiálem než sklem pevně spojeným s rámem. Běžný je případ vnějších pohyblivých clon. Některé jsou naprosto netěsné, jen zčásti nebo úplně brání přímému záření ze skla do exteriéru, to bývá případ naklápěcích lamel. Jiné mohou být těsné poměrně dobře, a tak zcela zabránit také např. vydatnému ovívání skla přímým větrem. To je případ lamelových rolet. Nárůst tepelného odporu okna přidáním takové částečně prodyšné vnější přepážky je obtížné vypočítat. Pro zcela prodyšné přepážky se nicméně přibližné výpočty již v praxi dělají, s užitím experimentální verze známého programu Window [66]. Její výsledky poměrně dobře souhlasí i s měřením, viz [67]. Obecně lze vliv netěsné vnější pohyblivé clony změřit tak, že se porovná rozdíl teplot vnitřního skla a interiéru v obou konfiguracích, se clonou otevřenou a se clonou zavřenou. Praxe ukazuje, že uzavření okna vnější lamelovou roletou se vždy projeví dobře měřitelně, a tedy automatické zavírání vnějších rolet na noc by bylo v období, kdy se interiér přitápí, rozhodně žádoucí. Vnější naklápěcí lamelové systémy pak mírně tepelně pomáhají při jasné noční obloze – a jak již řečeno výše, zamezí orosení či ojinění skla (po jejich otevření ráno je pak okno hned plně průhledné).

Opačný případ je ještě běžnější, totiž zcela prodyšná přepážka na interiérové straně od zasklení. Může jít o clony s naklápěcími lamelami, ale i o záclony apod. I ty potlačí zářivý tok mezi sklem a interiérem, a v případě, že na bocích a alespoň na horním okraji přiléhají poměrně těsně ke zdi, tak potlačí i ohřev skla konvekcí. U špatně izolujících zasklení tím ovšem v zimě roste počet případů, kdy na interiérové straně zasklení kondenzuje vodní pára. Přesto se obecně noční aplikace vnitřních clon z tepelného hlediska doporučuje. Příkladně tím sníží pocit chladu z velkých okenních ploch, když zamezí přímému zářivému kontaktu mezi nimi a uživateli interiéru nebo jej sníží. Z tohoto pohledu se jako zvláště výhodná jeví aplikace vnitřní clony s nízkou emitancí. Mohlo by jít o lamelové clony z povrchově neupraveného hliníku – takové ale bohužel na trhu nejsou, zjevně vinou nevědomosti výrobců o existenci a výhodách povrchů s nízkou emitancí. Mohlo by jít i o clony (rolety) z pokovené fólie. Jejich výhodou je snadná ruční ovladatelnost, kvůli manipulaci není potřeba otvírat okna. Velký přínos pro snížení tepelného toku oknem ale většinou mít nemohou. To by musely vytvářet poměrně těsnou komoru, s minimalizovanou výměnou vzduchu. Na interiérové straně skla by

ale v takové komoře v zimě kondenzovala voda dosti běžně, proto takové interiérové aplikace autor doposud nikdy nedoporučoval.

Ve skutečnosti se jeví jejich aplikace vhodná v případě nejlepších zasklení dosahujících standardu pro pasivní domy. Přídavný tepelný odpor, který se tím dá docílit, je zhruba $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$, a pokud by původní zasklení mělo $U = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ čili $R = 1,7 \text{ m}^2\text{K/W}$, zlepšila by se hodnota souvrství s uzavřenou clonou na $U = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Při venkovní teplotě -10°C a interiérové o 30 K vyšší protéká souvrstvím tepelný tok zhruba $14 \text{ W}/\text{m}^2$. Teplota interiérové foliové vrstvy je tedy asi (uplatňuje se jen konvekce, kterou se předají nejvýše $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) o 3,5 K nižší než teplota interiéru, teplota skla pak o dalších 5,6 K nižší (přechod sklo-fólie má odpor asi $0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$). Celkem je tedy teplota skla o 9 K nižší než teplota interiéru, sklo má 11°C . Vzduch při této teplotě může obsahovat nejvýše 10 g vodní páry v metru krychlovém, při 20°C by to bylo 17,3 g. Na skle nebude voda kondenzovat, bude-li v interiéru s teplotou 20°C relativní vlhkost menší než 58 %. Relativní vlhkost 50 % je pak už naprosto bezpečná, i pokud jde o rohy zasklení. Za takto mrazivého počasí bývá vlhkost v dobře větraných pasivních domech málokdy vyšší.

Výše uvedené konstatování je nové doporučení, uvedené až v textu této disertační práce. Její autor se předtím podrobně zabýval jen alternativou vždy bezpečnou, totiž přepážkami uvnitř skleněného souvrství. Poznatky z ní vyplývající je ale možné u jejich interiérových obdob plně využít. Zůstávají u nich jen dva problémy: mechanický, vzhledem k možnému průvanu v místnosti, a možné vyššího zaprášení než v prostoru mezi skly. Naštěstí je u pasivních domů interiérový vzduch minimálně prašný, díky trvalému odvodu vzduchu a díky filtrování nasávaného vzduchu čerstvého.

Jednu možnost meziskelních plastových přepážek jsme zmínili již výše, totiž přepážek průhledných. To, že dostatečně malé netěsnosti kolem jejich okrajů v praxi už nevadí, a nevadí také, je-li nahoře netěsnost velká, ověřil tým v Lawrence Berkley Laboratory, [1]. Fixní plastové přepážky kromě toho mohou být napojeny na distanční rámeček trvale těsně pružným neprodyšným těsněním, např. z pěnové gumy odolné proti slunečnímu záření.

Jinou možnost, užití pohyblivých clon nízké emitance, zkoumal autor během svého doktorského studia. I v okamžiku psaní této disertační práce se zdá, že se tím dosud nikdo jiný nezabýval.

I zcela netěsná clona nízké emitance měla být poměrně účinná, pokud je umístěna mezi skly s vysokou emitancí, kde by jinak dominovala zářivá složka tepelného toku. Dostupnost takových lamelových clon by měla být snadná, stačilo by, aby k veliké nabídce hliníkových lamelových clon byla přidána jediná, totiž s povrchem nijak neupravovaným, ani nátěrem, ani eloxováním. Jelikož jsem ale takovou alternativu ani po letech dotazů na výstavách i u prodejců nenalezl, vyrobil jsem ji (nečekaně pracně) sám, polepením lamel aluminiovou fólií (alobalem). Tu jsem pak instaloval do dvojitého okna a termograficky měřil tepelný tok skrze takto upravené okno. K mému velkému překvapení se snížil ani ne o třetinu oproti stavu bez takové clony, a to i když byly lamely v co možná nejzavřenější orientaci [30]. Možné vysvětlení jsem našel jen takové, že přítomnost lamel mohla vést ke zvýšení účinnosti konvektivního transportu tepla, totiž rozdělení původní jediné konvektivní buňky na více

buněk, tedy zkrácení dráhy a doby, kterou musí vzduch během jednoho cyklu urazit od jednoho skla ke druhému. Mohlo jít i o jinou změnu konvekce v dutině mezi skly. Přepážka byla totiž značně netěsná a homogenitu dutiny, která jindy zajišťuje, že konvekce je tepelně nepříliš účinná, dosti narušovala. Jakkoliv by bylo žádoucí takové clony dále zkoumat, upustil jsem od toho, vzhledem k tomu, že jsem nebyl schopen získat hliníkové žaluzie s neupraveným povrchem a takových rozměrů, že bych je mohl instalovat do více oken. Experimentální verze programu Window6 udává pro takové žaluzie za předpokladu, že jejich emitance činí 0,10, zlepšení tepelné izolace při instalaci do dvojitého okna jako velmi značné, např. snížení u ze 2,7 na 1,4 při lamelách zcela na sebe doléhajících.

Mou snahou bylo získat clony prakticky těsné, z tenkých plastových fólií s napařenou vrstvou hliníku. To se skutečně podařilo, viz kapitola 4.

Kapitola 3

Zjišťování tepelných toků termografií

Tepelně-izolační vlastnosti různých zasklení i celých oken se buď počítají postupy naznačenými výše (obvykle programem [66]), nebo zjišťují ve specializovaných zkušebnách, měřením skutečných tepelných toků (viz např. i novou metodu [2]). Cílem mé práce bylo najít postup, jak je nepřímo zjišťovat pozorováním *in situ*, u skutečných oken v existujících budovách. To je významné pro kontrolu izolačních vlastností budovy (např. zdali odpovídají deklarovaným). Takřka nezbytné je to k tomu, aby bylo možné posuzovat vliv užívání mobilních komponent v oknech. A konečně i ke sledování případných změn izolačních schopností částí budovy během jejich stárnutí.

Termografií obecně rozumíme pořizování snímků v takovém oboru vlnových délek, aby se v zobrazované scéně projevilo vlastní vyzařování předmětů. Při teplotách běžných v interiérech a exteriérech, tedy rozsahu od 230 K do 310 K, jde o vlnové délky elektromagnetického záření nad $3 \mu m$ (obr. 2.1 (str. 17)) a prakticky též pod $100 \mu m$, neb delší vlny v jejich spektru přenášejí nejvýše jedno procento tepla. Sluneční záření naopak můžeme v tomto oboru zanedbat, naprostá většina jeho energie připadá na vlnové délky pod $3 \mu m$. Záření s vlnovými délkami nad touto hranicí budeme nazývat *dlohovlnné*, bylo by je ale možné nazývat též *pozemské*, *terrestrické*.

V noci jsou tepelné toky slunečního záření zanedbatelné, ale toky dlohovlnného záření se od toků denních zásadně neliší, v exteriéru jen mírně klesají, jak povrch země sáláním do vesmíru od večera do rána stydne. Ve dne se ovšem termografie musí vyhnout signálu ze slunečního záření, protože hustoty toků slunečního záření mohou být i větší než záření dlohovlnného. Sluneční signál se potlačuje užitím optiky (čoček) z polovodičů, které jsou propustné jen pro dlohovlnné záření. (Poznamenejme, že z dobré propustnosti polovodičů pro dlohovlnné záření plyne i to, že se samy málo ochlazují sáláním.)

3.1 Obrazy vytvářené termokamerami

Kamery, zcela obecně, zaznamenávají vybranou (spektrálně filtrovanou) oblast spektrálního zářivého toku, přicházejícího z jednotlivých míst snímané scény.

Kamery, zaznamenávající viditelné záření, tj. světlo, je registrují pomocí elementů, v nichž dopadající fotony buď způsobí chemické změny (barvivových zrn v emulzích), nebo způsobí fotoefekt, tj. uvolnění elektronu z valenčního do vodivostního pásu v polovodičové vrstvě. Tímto druhým způsobem pracuje dnes většina kamer. Většinou se v nich střídají políčka (pixely) citlivá na různé vlnové délky, takže až skupina minimálně tří pixelů poskytne informaci o jasů i barevném složení odpovídajícího místa snímané scény.

Fotoelektrické detektory ve skutečnosti neměří hustotu dopadající energie, ale jen hustotu fotonového toku. Je-li jejich spektrální citlivost omezena filtrem na úzkou oblast, lze tok fotonů na tok energie přepočítat. Trojice barevných filtrů (R, G, B) pak umožní přepočet téměř pro celou „oktávu“, kterou zaujímá viditelné záření, alespoň jde-li o záření s dostatečně hladkým spektrem.

V infračerveném oboru lze fotoefekt užívat také. S rostoucími vlnovými délkami ale příslušné polovodičové detektory vyžadují chlazení na stále nižší teplotu. Pro běžné terénní použití se takové (drahé) zobrazovací detektory nehodí. Odlišností infrakamer od těch, co registrují světlo, je i to, že nepracují v několika „barvách“ čili spektrálních filtrech současně. Snímek obsahuje jen informace „jednobarevné“: čili o filtrovaných zářích jednotlivých elementů scény jakožto integrálů součinů skutečných zářích a spektrální citlivosti kamery. Spektrální citlivost lze ovšem měnit výměnou filtrů v optickém systému kamery, takže složením tří snímků pořízených přes různé filtry lze nakonec docílit obdoby barevné fotografie. To se ostatně běžně užívá i pro snímání ve zcela jiných oborech spektra, kdy se např. v astronomii kombinují snímky rentgenové, ultrafialové a infračervené (pořízené ovšem různými kamerami).

Ve stavební praxi se začala uplatňovat až další generace kamer, s mnohem levnější technologií nevyžadující chlazení. Elementy detekčního pole jsou tvořeny materiály, které pohlcují daný obor infračerveného záření a buď na nich vzniká napětí při změně jejich teploty (pyroelektrické snímače), nebo je jejich rezistivita značně závislá na jejich teplotě, např. mění se až o 2 % při změně teploty o 1 K (prvek měnící svůj elektrický odpor dle teploty; pro elektrické měření teploty se používá nejběžněji termistor). Na rozdíl od fotoelektrických detektorů měří takové detektory úhrn dodané energie, tj. fotony kratších vlnových délek je ohřívají více než fotony nižších energií. V zásadě mohou být stejně citlivé pro veliký rozsah vlnových délek (zejména, jsou-li realizovány jako malý otvor ve velké dutině, tj. jako aproximace černého tělesa). Zaznamenávají prostě teplo dodané zářením. Podle této vlastnosti se nazývají bolometry¹ Nejběžnějšími bolometry jsou dnes tzv. infračervené teploměry, první bolometr byla dvojice platinových proužků, z nichž jeden (začerněný) byl vystaven záření nějakého intervalu vlnových délek slunečního spektra [64].

V kamerách je celá matice bolometrů, obdobně k matici CCD nebo CMOS u kamer pro viditelné záření. Vzhledem k jejich velmi malým rozměrům je označujeme jako mikrobolometry. Jsou-li vrstvičky zachycující infračervené záření velmi tenké, reagují dostatečně rychle na změny zářivého toku, a lze je užívat i v módu videokamery. Přehled fyziky a technologií matic mikrobolometrů (a návrh jejich nového typu) obsahuje disertace [45]. Z ní

¹Předpona bolo- je z řečtiny od slova pro vrhání, též paprsků, zde tedy vržených na detektor; vzpomeňme antické diskobolos nebo moderní označení bolid pro velmi jasný meteor.

také vyplývá, že matice mikrobolometrů musí být evakuovaná, jinak by teplotní rozdíl mezi termistorem a čipem, na nějž je připevněn a který naopak změny teploty termistoru potlačuje, zůstával vinou vedení tepla vrstvičkou vzduchu tloušťky řádově mikrometrů, oddělující termistor od čipu, trvale stěží měřitelný. Podobně evakuovaná jsou jistě i bolometrická čidla infrateploměrů (porušení vakua vede k jejich chybné funkci). To jsou ale vesměs údaje, které výrobci neudávají, publikované práce jsem k nim nenašel.

Termokamery měří tedy teplotu elementů vystavených záření, zpravidla přímo termistorů, a z ní počítají odhad hustoty zářivého toku, který na ně dopadá. Ve skutečnosti onen tok záření udržuje ne teplotu termistoru, ale jen její rozdíl od teploty okolí, které je s termistorem tepelně propojeno, tj. především místa podkladu (čipu) k němuž je ozařovaný element připevněn. Pokud jsou např. ve scéně, kterou kamera snímá, nezanedbatelné části (zobrazovaného prostorového úhlu) výrazně chladnější než kamera, pak se odpovídající oblasti čipu postupně též ochlazují, a postupně i celý vnitřek kamery, vystavený skrze svůj objektiv chladným místům scény. Aby teploty pixelů bylo možné přepočítat na intenzitu jejich ozáření, je nutné často „kalibrovat“, nechat na ně zářit jen předmět známé teploty, např. závěrku kamery (dobře tepelně vodivou „stěnu“ opatřenou též termistorem). V oboru kamer krátkovlnných se podobná operace označuje za pořízení temného snímku (darkframe). Pro kvalitní fotometrii a obecně radiometrii je to operace nezbytná, o její výsledky se opírá vyhodnocování ostatních snímků. U termokamer platí, že jen snímky pořízené vzápětí po takovém zkalibrování mohou ve všech bodech obrazu udávat skutečně intenzitu ozáření odpovídající záři jednotlivých prvků scény. Darkframy není potřeba dělat často, pokud se kamera užívá v téměř izotermním prostředí a není trvale namířena na předměty zářící jinak silně. Přesto se i tehdy teploty uvnitř kamery mohou zvolna měnit např. tím, že se kamera svým provozem zahřívá. Mnohem častější darkframy musí kamera pořizovat, přenesení se do prostředí výrazně chladnějšího nebo teplejšího. Přesný algoritmus, který při tom jednotlivé kamery používají, výrobci nezveřejňují. Kamery ani nemusí být schopny darkframe provést dle pokynu uživatele, taková bohužel byla i ta, s níž jsem pracoval. Užitečnost takových kamer pro kvantitativní práci je samozřejmě omezená. Mně nezbylo, než vždycky čekat, až kamera „cvakne“ a darkframe „se rozhodne“ provést. Teprve následující snímek nebo několik snímků šlo vyhodnotit.

Další komplikací je, že termokamery neudávají záře scény, ale jen odhad teplot scény. Ten počítají z registrovaného signálu úměrného záři prošlé jakýmsi „spektrálním filtrem“, daným optickou konstrukcí kamery (zobrazovacími čočkami, přední stěnou vakuové komory, případně i cíleně vloženým filtračním členem). Zaznamenávané pásmo bývá udáváno bez specifikování skutečného průběhu spektrální citlivosti kamery, např. jen jako „obor $8 \mu m - 14 \mu m$ “. Ten se v termografické praxi často označuje jako LWIR, tedy rovněž „dlouhovlnné infračervené záření“, protože ale tento český pojem ale v textu užíváme pro všechno záření nad $3 \mu m$, uvedené pásmo budeme označovat jen tímto anglickým akronymem.² Všechny delší vlnové délky až do milimetrového oboru se pak označují jako FIR (far infrared, daleké infrazáření) [65]. Je to zřejmě proto, že pro pozemskou termografickou praxi jsou nepod-

²Jako LWIR bývají označována i pásma mírně odlišná, např. $8 \mu m - 15 \mu m$, $8 \mu m - 12 \mu m$, $7 \mu m - 14 \mu m$ [65]. Mez $15 \mu m$ je pro termografickou praxi už nevhodně vysoká, výhodnější je naopak mez $13 \mu m$ či $12 \mu m$, pod níž už vzduch pohlcuje při vzdálenostech max. desítek metrů jen zanedbatelně.

statné, není pro ně k dispozici vhodná optika, a na jejich krátkovlnném konci, kolem $15 \mu\text{m}$ je ovzduší zvláště málo propustné, vlivem absorpce působené oxidem uhličitým.

Svůj přepoččet onoho zhruba LWIR signálu (omezíme-li se na kamery pro stavebnictví, pro vyšší teploty se používají i pásma v kratších vlnových délkách) na „teploty“ snímané scény komplikují kamery ještě dále tím, že umožňují nastavit předpokládanou emitanci scény. Od měřeného signálu tak odečítají předpokládanou složku, která vzniká jen odrazem na zobrazených předmětech, za nějakého předpokladu, co se vlastně v těch předmětech odráží. Běžný předpoklad je, že celé okolí má teplotu stejnou, jako má kamera. Tak to ale většinou není. Pro veškerou termografii jsem proto již v roce 2004 doporučil [28] v kamerách nastavit emitanci rovnou jedné. Snímek pak udává odhad skutečné fyzikální veličiny, totiž „jasové teploty“ (viz Glosář) scény. To jsou teploty, které by mělo absolutně černé těleso dávající právě takto velký signál na termistory kamery.

Jasové teploty lze přepočítávat na skutečné, víme-li, co se příslušných elementech scény odráží, jaké jsou dlouhovlnné optické vlastnosti zobrazovaných povrchů, a pokud možno, i jaký je průběh spektrální citlivosti kamery. Jen při jeho znalosti můžeme totiž spočítat či odhadnout alespoň to, jakou pásmovou emitanci máme přisoudit tomu či onomu předmětu. Emitance braná přes veškeré vlnové délky nemusí být stejná jako emitance v oboru LWIR.

Ukázkou, že jasová teplota indikovaná kamerou (v omezeném spektrálním okně) a skutečná černá teplota vypočítaná ze vzorce pro zář či radianci

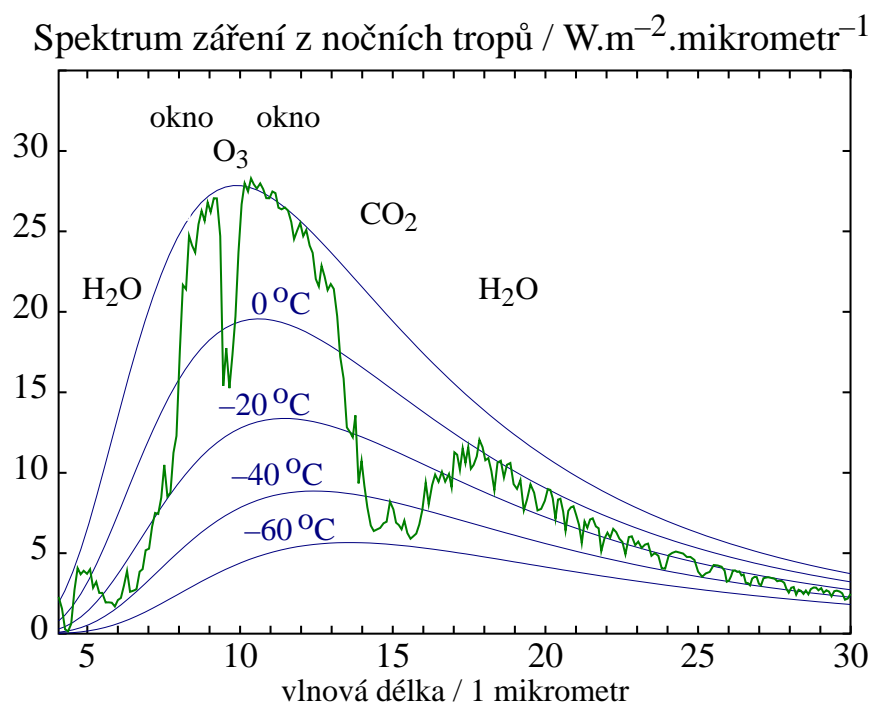
$$\text{Radiance} = \sigma T^4 / \pi \text{ sr} \quad (3.1)$$

mohou být velmi různé, je snímek jasné oblohy kolem zenitu. Ten běžně dopadne jako „bez signálu“, za limity možností kamery, tedy jako chladnější, než kamera dokáže zaznamenat (např. -50°C). Přitom skutečná černá teplota oblohy je i v zenitu málokdy více než o 25 K nižší než teplota terénu. Nesouhlas je snadné vysvětlit, právě v oboru LWIR je ovzduší velmi propustné pro záření a kamerou pak vlastně pozorujeme průhledné, málo sálající ovzduší a přes ně už jen opravdu studený vesmír (v noci s černou teplotou jen od 3 K do desítek kelvinů), viz obr. 3.1 (str. 42).

3.2 Odhad tepelných toků z jasových teplot

Jak patrně z předchozí kapitoly, tepelné toky jsou úměrné teplotním rozdílům. Termokamerou můžeme zjišťovat právě jen teplotní rozdíly. Na tepelné toky je můžeme přepočítat s využitím vztahů uvedených dříve. Předpokladem je, že známe velikost součinitele přestupu tepla ze zkoumané plochy do okolí – to bývá dobře splněno u rovinných ploch zdi v interiéru³ Za bezvětří (které můžeme ověřit např. dýmem) a oblohy zatažené nízkou oblačností to

³S využitím počítačového modelování proudění vzduchu a toků záření by bylo možné součinitel přestupu tepla zjistit i u rohů a koutů budovy, případně i u obdobných prvků kolem zabudovaného okna, ale to již přesahuje rámec této práce. Je zjevné, že v takových místech je součinitel přestupu tepla nižší, protože konvekce je tam potlačena a pro zářivý přenos není k dispozici plný poloprostor. To platí i v případě oken, které nejsou celé v rovině zdi. Termografie ale i tehdy může dát dobrý odhad horní meze možného tepelného toku – skutečnost bude vlivem menšího součinitele přestupu tepla v rozích a koutech jistě příznivější.



Záření Země do vesmíru je srovnáno s hladkými spektry záření černého tělesa o teplotě 20°C a méně. Jen ve dvou „oknech“ se uplatňuje záření rovnou s povrchu Země. V oblasti, kde absorbuje oxid uhličitý, do vesmíru září jen nejchladnější vrstva ovzduší.

Obrázek 3.1: Vyzařování Země do vesmíru v porovnání s černými tělesy (viz text str. 41)

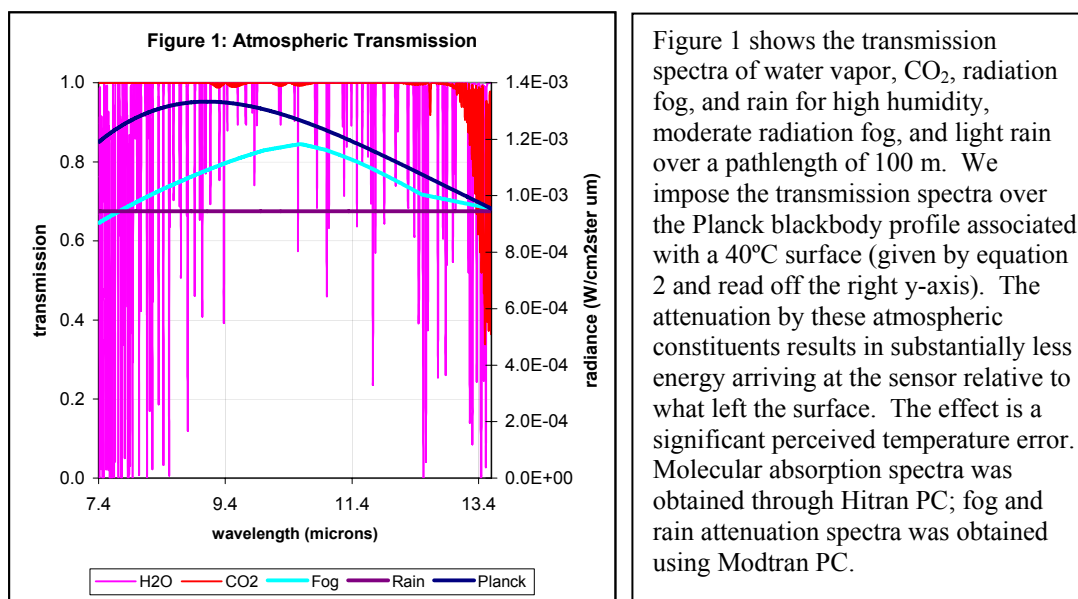
platí i v exteriéru. Je-li okolí chladnější než zkoumaná plocha, lze si při neznalosti součinitele přestupu tepla pomoci referenční vyhřívanou ploškou, jak dále popisují.

Pokud je mi známo, v případě staveb tak ale doposud nikdo běžně nečiní. Je možné, že většinu zájemců odradilo, že skutečné předměty nejsou absolutně černé, ale odráží se v nich okolí, a to i v oboru zaznamenávaném termokamerami. To působí velký problém např. tehdy, když snímáme budovu zespodu a odráží se v ní bezoblačná obloha, která má ve spektrálním oboru LWIR, jak jsme právě viděli, teplotu neměřitelně nízkou. Jednodušší situace nastává, když je těsně nad budovou nízká oblačnost s teplotou téměř stejnou, jako je teplota přízemního vzduchu. Ještě lepší může být mlha, pokud ovšem nesnímáme natolik zdálky, aby se projevilo i to, že záření budovy mlha absorbuje a přidává naopak záření své, viz obr. 3.2 (str. 43).1

Pro připomenutí: známe-li teplotu okolí (interiéru nebo exteriéru) a teplotu skla, můžeme tepelný tok skrze okno odhadnout tak, že rozdíl teplot vynásobíme očekávaným součinitelem přestupu tepla ze skla do okolí – v interiéru tedy např. $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (dle ISO 10077-1, viz [6, str. 53]), v exteriéru za bezvětří toutéž hodnotou, při větru pak hodnotou vyšší: neradiační komponenta součinitele přestupu tepla se udává na

$$h_c = a + b\{v\} \quad (3.2)$$

kde $\{v\}$ je velikost rychlosti větru dělená jedním metrem za sekundu a koeficienty a , b činí $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (dle ISO 15099, viz [6, str. 15]), případně $a = 2,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ a $b = 3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Obrázek 3.2: Transmittance ovzduší při pozorování skrze vrstvu tloušťky 100 m. Křivkami je znázorněn možný vliv mlhy a deště. Na pravé straně je škála spektrálních září pro černé těleso teploty 40 °C / ($10^{-4} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m})$) (převzato z [10]) (viz text str. 42)

([49, str. 11], kde jsou i další publikované údaje). Člen „a“ představuje přestup tepla vlivem konvekce vyvolané rozdílem teplot a nepochybně tak není konstantou, nýbrž rostoucí funkcí teplotního rozdílu, viz obr. 2.2 (str. 20) – odtud jistě plyne též rozdíl v publikovaných formulích (u členu b může jít o uvážení většího vlivu větru na některých částech budovy, tedy o horní hranici pro přestup tepla vzduchem). Pro termografické zkoumání tepelných toků to nicméně není zásadní, při potřebě vyšší spolehlivosti odhadů lze využít situací bezvětrných.

I tehdy ale zůstává nejisté, co máme považovat za teplotu okolí. Exteriér ani interiér nemusí být zcela izotermický, většinou nebývá. Pak je vhodné zjistit rovnovážnou teplotu, kterou by mělo sklo nevyhřívané ani neochlazované, umístěné poblíž zkoumaného okna. Nebo dokonce ne skutečnou teplotu, ale jen jasovou teplotu, jak ji zobrazuje termokamera. Stačí, že se ve zkoumané a referenční ploše odráží táž scéna, pokud možno o teplotě nepřilíš odlišné od teploty skla. Rozdíl indikovaných teplot okenního skla a referenční nevyhřívané plochy je příčinou tepelného toku skrze okno.

Referenční sklo má být okolnímu prostředí vystaveno jen jednostranně. Ideální by bylo jeho zadní stranu dokonale tepelně izolovat, což v praxi nejde, neboť dokonalé tepelné izolace neexistují. Nejlepším přiblížením k nim jsou vakuové izolační panely. Vakuové panely jsem neměl k dispozici, proto jsem užíval běžného pěnového polystyrénu tloušťky pět centimetrů. Na hranolky z tohoto materiálu jsem jednostranně lepil skleněné plošky, např. podložní sklíčka pro mikroskopování. Hranolek zavěšený blízko okna, nejlépe poblíž jeho rámu, poskytoval skleněnou plošku, která byla po ustálení teplot v tepelné rovnováze s interiérem. To proto, že tepelný odpor takové polystyrénové vrstvy byl desetinásobný oproti tepelnému od-

poru při přestupu tepla mezi sklem a okolím, navíc zadní strana hranolku nebyla v přímém kontaktu s oknem, ale opět jen se vzduchem v blízkosti okna, přičemž zářivý tok z okna na hranolek z EPS byl téměř eliminován užitím alobalu jako vrstvy odrážející dlouhovlnné infračervené záření. Tepelné rovnováhy s okolím dosáhla skleněná destička rychle, neb měla tloušťku jen jeden milimetr a tedy jen velmi malou tepelnou kapacitu.

V interiéru, pokud tam není průvan, použití několika takových srovnávacích plošek stačí, přestup tepla z okenního skla do interiéru je známý s postačující přesností. Několik plošek je vhodné použít proto, že v různých výškách nad podlahou panují obecně různé teploty, různé jsou i teploty okenního skla.

Referenční, zezadu tepelně izolovaná plocha může mít i několik druhů povrchu, nejjednodušší je, když sklo nepokrývá celý polystyrénový hranol. Pěnový polystyrén má odrazivost velmi malou a je dobrým referenčním povrchem pro omítku. Dalším možným doplňkem je nalepit na část skla papír zanedbatelné hmotnosti, čímž se daný kousek skla stane matný a méně odrazivý. Papírové nálepky na malé kousky skla lze použít i na okně samém, jak zvenku, tak i zevnitř. Zvenčí to může být zvláště užitečné tehdy, když se při snímkování nemůžeme vyhnout tomu, že se ve skle leskne velmi chladná obloha.

V exteriéru je v zimě možné použít i další referenční skleněnou plošku, totiž plošku vyhřívanou známým příkonem. Podaří-li se docílit toho, aby měla tutéž jasovou teplotu jako zkoumané okenní sklo, bude tepelný tok oknem znám velmi přesně. Tento postup lze použít zcela obecně, stačí aby zkoumaná plocha a referenční plochy měly na povrchu totožný dlouhovlnně neprostupný materiál.

Pro části obvodového pláště budovy, které izolují mnohem lépe než okna, je přesnost omezená tím, že nedokonalost izolace zadních stran nevyhřívaných referenčních plošek může být větším problémem. Užití vakuových izolačních panelů značných tloušťek (i 10 cm) by zde bylo zvláště vhodné.

Interiérová, ale zejména exteriérová měření tepelně izolačních vlastností oken není vhodné provádět ve dne, protože běžná skla se slunečním zářením zahřívají, a to v různé míře, dle obsahu železa a samozřejmě dle hustoty zářivého toku, který skrze ně prochází. Neprůsvitné části budov se slunečním zářením zahřívají rovněž, navíc mívají větší tepelnou kapacitu, takže jejich teplota za stmívání klesá pomaleji. Ideálním počasím pro měření tepelných toků jsou mrazivé dny s nízkou hustou inverzní oblačností, kdy je zářivý sluneční příkon skrze oblačnost malý a kolísání teplot vzduchu mezi dnem a nocí činí jen několik kelvinů. Tehdy lze měřit již brzy zvečera. Po slunném dni je vhodné počkat alespoň do půlnoci, zejména u masivního zdiva s velkou tepelnou kapacitou. Za jasných nocí je vhodné pořizovat snímky směrem šikmo dolů, aby se v oknech neodrážela chladnější obloha. Totéž je vhodné i v případě neprůsvitného pláště budovy; pokud není *velmi* hrbatý, tak i u něj platí, že při pohledu šikmo vzhůru je podíl odrazu oblohy větší. V dlouhovlnném oboru, při dvacetkrát větších vlnových délkách, než má světlo, mohou totiž i povrchy opticky zcela matné být zčásti zrcadlicí.

3.2.1 Využití denního světla pro zjištění solárních vlastností oken

Měření během dne může být někdy zajímavým doplněním měření nočního, a to v případě prosklených částí budovy. Lze tak totiž zhruba zjistit koeficient prostupu slunečního tepla do interiéru, tedy podíl krátkovlnného příkonu na vnější plochu okna a příkonu, který se dostává do interiéru. Běžně se označuje symbolem g .

Jednu část prostupu, totiž prošlé krátkovlnné záření, změříme zhruba luxmetrem. Ještě lepší může být použit fotovoltaický článek, jehož citlivost neklesá pro červené a blízké infračervené záření, jako to s využitím kalibrace luxmetrem činím již od léta 2006 kontinuálně na hvězdárně v Brně na Kraví hoře, viz [31]. Prošlý podíl slunečního (přímého a rozptýleného) záření je dán podílem údajů změřených na exteriérové a interiérové straně zasklení. Zvláště snadno se zjistí u oken, které lze otevírat.

Druhou část tvoří teplo, které je do interiéru předáváno vnitřním sklem, solárně ohřátým. Tam je úkol zřejmý, stačí znát rozdíl teplot skla a srovnávací izolované skleněné plošky v noci a pak znovu ve dne. Ze zvýšené teploty skla ve dne je snadné spočítat, jakou změnu tepelného toku skrze sklo sluneční záření způsobilo. Zvláště snadné je to za zatažených zimních dní s minimálním kolísáním teplot vzduchu mezi dnem a nocí, tehdy je ale „solární signál“ slabý, zvýšení teploty skla nevelké a výsledná nejistota této složky prostupu tepla značná. Vyšší přesnost dá výpočet s poledním přímým sluncem a uvážením jiné teploty vzduchu než v noci, pokud už známe nebo můžeme snadno předpokládat hodnotu U , kterou zasklení má. To i proto, že tehdy platí velmi dobře úměra, že sto tisíc luxů měřených v exteriéru odpovídá tisíci wattů na metr čtvereční.

Mnohem jednodušší je zjištění druhého parametru zasklení, totiž jeho propustnosti pro světlo. To je přímo podíl údajů luxmetru pro okno zavřené a otevřené. Je možné jej zjistit pro přímé sluneční záření při různých úhlech jeho dopadu na okno, i pro záření ze zatažené oblohy.

3.2.2 Konstrukce elektricky vyhřívané srovnávací plošky

Myšlenka dosti přesného stanovení tepelných toků dle termografie či měření infrateploměrem z chladné strany souvrství pomocí elektricky vyhřívané srovnávací plošky je nabíledni. Pak totiž přepočtení rozdílů teplot na tepelný tok metrem čtverečním není závislý na znalosti koeficientu přestupu tepla ze zkoumané plochy do okolního prostředí. Jsou sice situace, kdy onen koeficient i v exteriéru dobře známe (úplné bezvětří, které lze ověřit např. stoupajícím praménkem dýmu), ale takové nepanují stále. Měření z exteriérové strany má navíc výhodu, že se tak dá zkoumat velká část budovy naráz, např. celá jedna fasáda.

Za elektricky vyhřívanou plošku jsem zvolil podložní sklíčko pro mikroskopování, na jehož jednu stranu jsem pomocí dvoustranné lepicí pásky připevnil labyrint odporového drátku se sponem asi 2 mm. Sklíčko má tloušťku 1 mm, šířku 2,5 cm a výšku 7,5 cm. Jeho obsah je tedy jen 0,002 m². I pro extrémní případ jednoduchého okna a rozdílu teplot mezi interiérem a exteriérem 30 K stačí tak pro jeho vyhřívání necelého půl wattu, aby mělo tutéž teplotu

jako zkoumané okno. Podmínkou ovšem je, že tepelný tok ze sklíčka jde jen na jednu stranu, do exteriéru. Tepelný tok na opačnou stranu (ke zkoumané budově) by měl být nulový.

Toho lze docílit tepelnou kompenzací. Tu jsem provedl tak, že sklíčko je položené na tepelně izolační podložce z pěnového polystyrénu, tlustého pouhý jeden centimetr. Podložka je ale vložená do krabičky z měděného plechu tloušťky 0,75 mm. Ta má šířku 6 cm a výšku 8 cm, jedna její polovina je shora zavřená. Krabička je rovněž elektricky vyhřívána přilepeným odporovým drátem, nezávisle na vyhřívání sklíčka. Pro kontrolu, že měděný plech má tutéž teplotu jako sklíčko, a že tak ze sklíčka směrem dozadu neprobíhá žádný tepelný tok, slouží poloviční víčko krabičky, na němž je přilepené další podložní sklíčko sloužící jako porovnávací. Jedno sklíčko je tedy vyhříváno měřeným příkonem (stačí měřit napětí a stejnosměrný proud) a druhé jen kompenzačním měděným plechem. Pokud se vyhřívání kompenzačního plechu vyreguluje tak, že obě sklíčka mají tytéž jasové teploty, je to situace, že celý topný příkon do samostatně vyhříváno sklíčka je konvekcí a zářením odváděn do okolního prostoru. Měděná krabička je kromě toho obalena další vrstvou pěnového polystyrénu tloušťky alespoň jeden centimetr, a dohromady pak hliníkovou fólií. Ta kryje i většinu porovnávacího sklíčka přilepeného na plechu. Teplotní spády v měděném plechu jsou tak velmi malé a úplnost tepelné kompenzace sklíčka s měřeným příkonem je dobrá. Celé zařízení viz obr. 3.3 (str. 46).



Obrázek 3.3: Elektricky vyhříváná skleněná ploška je na obrázku vlevo. Nahoře je polepená papírem, aby posloužila i pro porovnání s nelesklými předměty, jako jsou dřevěné rámy oken. Sousední skleněná ploška je zčásti překrytá alobalem a slouží jen na ověření správné tepelné kompenzace. Napětí na odporovém vinutí pod samostatně vyhříváným sklem a proud vinutím se měří dvojicí multimetrů. (viz text str. 46)

K elektrickému vyhřívání postačuje dvojice akumulátorů typu AA, celkový příkon se reguluje reostatem, rozdělení do obou větví potenciometrem. Alternativou by bylo jako zdroj použít nabíječku připojenou na síť, aby ani v mrazivém exteriéru vyhřívací příkon během doby samovolně neklesal (pokud by nabíječka poskytovala konstantní napětí a proud, jejichž velikosti by bylo možné lze spolehlivě měřit), nebo akumulátory nabíječkou podporované.

Docílit totožné teploty elektricky vyhříváné skleněné plošky a zkoumaného zasklení není nutné. Stačí, aby teploty byly ustálené. Měrný tepelný tok (připadající na jednotku plochy) lze brát jednoduše jako přímou úměrný rozdíl teploty skla vyhříváno a referenčního, zezadu tepelně izolovaného. Konstanta úměrnosti je při malém rozdílu mezi teplotami vy-

hřívaných skel pro obě tato skla stejná. K výsledkům se lze proto dobrat jednoduchou lineární interpolací či extrapolací.

Kapitola 4

Vytvoření těsných přepážek z foliových rolet

Cílem mé práce bylo rozdělit vzduchovou dutinu meziskelního prostoru mobilními přepážkami s nízkými emitancemi tak, aby okna jimi opatřená skutečně dosáhla teoreticky očekávaných vlastností. To spočívalo zejména v tom, najít technologii, která by zajišťovala praktickou těsnost takto doplněných překážek, a to i po mnohonásobně opakované manipulaci s nimi. Technologie k tomu potřebná se ukázala jako jednoduchá. V této kapitole ji popisuji.

Clony jsem vytvořil jako obdobu běžných látkových rolet. Na standardní dutou dřevěnou hřídel s vnitřním šroubovicovou pružinou poskytující navíjení jsem jen místo látky nalepil tenkou pokovenou plastovou fólii. Fólie by měla být rovná, hladká, jen odvinutá z velké role, takovou jsem ale na trhu nenašel. Zvolil jsem proto materiál, který je běžně k dostání, v postačujících formátech. Šlo o fólii užívanou jako záchranný prostředek v případě úrazů, např. horolezci. Lze ji koupit poskládanou do malého balíčku v ceně sta korun, po rozbalení má rozměry např. 140 cm × 220 cm.¹

Pak bylo potřeba instalovat běžný roletový mechanismus, tj. na boční desky okenního rámu připevnit standardní kovové koncovky a pak do nich navinutou roletu zasunout. V mém případě bylo dále nutné vyřazení pákového mechanismu otevírání vnějšího ventilačního okénka (jeho zachování by narušilo těsnost roletové přepážky).

První instalace se ukázala jako nedostatečně těsná, viz obr. 8.11 (str. 95) a obr. 8.12 (str. 96). To odpovídalo očekávání. Dalším zásahem do dvojitého okna proto bylo doplnění dřevěných lišt na obě krajní desky pevného okenního rámu. Tloušťku lišty jsem původně zvolil 17 mm. Jen v těch místech, kde by překážela otevíření vnějších křídel okna dokořán (v daných oknech se vnější křídla otevírala dovnitř, u nejstarších typů oken to je opačně) jsem musel šířku lišt zmenšit až na 12 mm. Viz obr. 8.3 (str. 88).

¹Stopy po poskládání poněkud ztěžují práci při rozměřování a nalepování, a pak také omezují hladkost navíjení. Nicméně to není vada podstatná.

Poslední etapou bylo vytváření spodního těsnění. Rozvinutá roleta se dole opírá o spodní desku ve dvojitěm okně prostřednictvím velmi měkkého pružného profilu, alternativně pomocí měkké pružné chlopně. V prvním případě jsem slepil jsem dva pruhy samolepicí pásky lepem k sobě, přičemž jedna páska byla asi o dva centimetry širší než druhá. Zbylé lepidlo okraje jsem přilepil na dolní tyč rolety tak, že pod tyčí vznikla z pásek plastová poddajná trubice. Drobná netěsnost pak přibyla jen uprostřed, kde je na tyč přivázána ovládací šňůra, podobné drobné netěsnosti zůstaly na obou koncích tyče. Jak se ukázalo, byly již tak malé, že tepelné vlastnosti okna prakticky neovlivnily, viz obr. 8.13 (str. 97). Roleta je napnutá vahou své dolní tyče.²

Fólie se o lišty opírá díky vyšší hustotě chladného vzduchu ve vnější kapse, kterou vytváří, oproti vzduchu v kapse vnitřní, tedy na straně od rolety směrem k interiéru. Už při rozdílu teplot vzduchu v obou kapsách na úrovni pouhých $t = 3 \text{ K}$ je tlakový rozdíl Δp dostatečný, dosahující už jeden metr pod horním okrajem kapsy hodnoty $0,1 \text{ Pa}$ ($\Delta p = \rho g h t / T$, kde ρ je hustota vzduchu při jeho průměrné absolutní teplotě T , g je tíhové zrychlení a h je hloubka pod horním okrajem rolety) – dostatečný je díky tomu, že fólie rolety je extrémně tenká, takže přiléhá k bočním lištám i díky velmi malému popudu. Naopak při extrémním rozdílu teplot, který může dosáhnout (u jediné foliové přepážky ve dvojitěm okně) až 20 K , může v úrovni $1,5 \text{ m}$ pod horním okrajem kapsy tlakový rozdíl dosáhnout hodnoty desetinásobné, tedy až 1 Pa , což při největších šířkách oken (i dva metry) vyžaduje, aby roleta byla dostatečně napnutá, jinak se na okrajích z lišt vysmekne.³ Termografická pozorování a měření prokázala, že je snadné dosáhnout tak dobré těsnosti, že se proudění kolem dolních rohů rolety již neprojevuje, viz obr. 8.13 (str. 97) (i když dolní rohy u pohyblivé clony úplně utěsnit nejde). Škvíra na horním okraji clony, která tam vzniká nad navíjecí tyčí, pak už nevadí, týká se nejvýše několika promile výšky okna a geometricky je tedy bezvýznamná. K zabránění konvektivní výměně vzduchu mezi oběma dutinami stačí, že přepážka je těsná na bocích a dole. Toto zjištění je ve shodě s pokusy v Lawrence Berkley Laboratory, [1].

Ručně ovládané rolety s navíjecí pružinou mají nevýhodu v tom, že pro manipulaci s nimi je potřeba otevřít vnitřní křídla dvojitěho okna. To lze zřejmě každodenně zvládat, pokud je takové okno jedno, ale už méně pohodlné je obsluhovat každý večer a každé ráno podobných oken tři a více. Ranní otevírání kromě toho vede k orosení vnějšího skla, neb to je v takové soustavě zvláště chladné. Zjednodušit by to bylo možné provlečením ovládací šňůry skrze pevný rám okna až do interiéru. Problém s průnikem interiérového vzduchu do meziskelního

²Jako ne úplně snadné se ukázalo seřízení koncovky rolety tak, aby ji ve spuštěném stavu udržovaly západky navíjecího mechanismu ve vhodné výšce nad dolním okrajem okenního rámu. Pro další instalaci jsem proto zvolil přístup jiný, totiž fixaci rolety v zavřeném stavu ne pomocí západek, ale pomocí zaklesnutí do vytvarovaných dolních konců bočních lišt. Takové řešení vyžaduje, aby obsluha byla poučená a pozorná: při otevírání rolety je potřeba její šňůru dobře přidržovat, aby roleta nevyhlédla rychle vzhůru. Místo vahou dolní tyče je v tomto případě roleta napnutá pružností svého navíjecího mechanismu, který vahu dolní tyče nemusí překonávat – ta zde stačí lehká dřevěná, jen zaklesnutá do bočních lišt. Vzhledem k tomu, že pro masovou aplikaci pohyblivých pokovených foliových rolet je potřeba, aby byly automaticky zavírány a otvírány elektricky, takové řešení se u nich používat nebude.

³To lze zajistit dostatečně těžkou dolní tyčí rolety. Já jsem užíval hliníkové trubky o průměru 12 mm s tloušťkou stěny 1 mm , do nichž jsem vkládal ocelové kulatiny takového průměru, až k vysmeknutí nedocházelo.

prostoru by asi byl řešitelný. Nicméně i obcházení oken a ruční manipulace se všemi roletami, večer i ráno, je nemalou bariérou pro širší uplatnění takové technologie. Nemluvě o dnech, kdy není nikdo přítomen – i v těch by v zimním období měla být okna ve dne „otevřená“ solárním ziskům a v noci „zavřená“ úniku tepla ven. Jediným trvale udržitelným řešením, které může být aplikováno kdekoliv, je automatické večerní zavírání a ranní otvírání rolet elektrickým pohonem.

Takové řešení na trhu je. Bohužel, v době mých doktorských studií bylo těžkopádné a nepřiměřeně drahé. Levné navíjení levných, úplně tenkých fólií nikdo nenabízel. Navíjení masivních lamelových rolet či těžkých látkových rolet ale na trhu bylo, za cenu čtyř tisíc korun za jeden mechanismus, plus další náklady na dálkové ovládání. Dar jedné z takových firem umožnil vytvořit demonstrační zařízení, které jsem vystavil na první české konferenci o pasivních domech v roce 2005 [29].



Obrázek 4.1: Model okna s elektricky navíjenou foliovou roletou

Jiné firmy nabízejí pod názvem ISO-Roll elektricky ovládané foliové rolety dokonce do těsných dvojskel s argonovou náplní – za ceny ne menší, bez možnosti užít fólii s nízkou emitancí. Garantují ale životnost více než pět let a užívají strukturované dvojité fólie s napařeným alumiinem uvnitř. Bohužel natolik tlusté, že emitance výrazně stoupne. Roleta se instaluje do dutiny tlusté 24 mm. Fólie se ale odvíjí příliš blízko podél jednoho ze skel, nedělí dutinu přibližně na poloviny. Tepelný vliv takové foliové rolety je v noci zbytečně malý, izolační schopnosti zasklení zvětší poměrně málo. Při vzduchové náplni udává výrobce zlepšení u z hodnoty 1,7 na 1,3 [17, 18]. Trh pro taková zařízení není na poli snížení nočního úniku tepla, ale jen na snížení insolace do interiéru. Systémy foliových rolet jsou integrovány především do dvojskel ve střeších hal, případně do dvojskel ve stěnách orientovaných do azimutů kolem východu a západu. Na systému ISO-Roll je sympatické, že nabízí jak rolety „gravitační“, kdy je roleta napnuta vahou své spodní tyče, tak i „antigravitační“, kdy se naopak odvíjí z hřídele umístěné dole směrem vzhůru.

Kombinace rolet odvíjených zespodu a shora je tou správnou pro řízení osvětlení. Ev. škvíru, vytvořenou dvojicí rolet, lze dle denní doby a užití místnosti posouvat do různých výšek okna a tím eliminovat oslnění i optimalizovat rozložení světla v místnosti v letním

období. V zimě je z hlediska nočního utěsnění každé z takových přepážek lhostejné, zdali je přepážka těsná nahoře či dole. Podstatné je jen, že je současně těsná na bocích. V dutinách vyplněných vzácným plynem to je možné realizovat obdobně, jako jsem to dělal u dvojitých oken. Jen se místo listů použijí např. L-profilů připevněné k distančním rámečkům oddělujícím krajní skla dutiny.

Tržní uplatnění takových foliových rolet v dutinách vyplněných argonem skýtá reálnou naději, že je možné vyvinout mechanismy užívající tenčích hřidelů a fólií, u nichž se dbá na co nejnižší emitanci. A ovšem levných, malých motorků, které jimi manipulují. Obdobných, jaké se užívají v miliónech exemplářů např. pro vysouvání zásuvek DVD mechanik u stolních počítačů. Pak může být v dutině mezi skly umístěno rolet i několik, dvě, tři, ba i čtyři – dle tloušťky dutiny, která je k dispozici. Fólie sama má cenu zanedbatelnou a i navíjecí zařízení může být jistě také levné. Trojice rolet ve starém dvojitěm okně sníží jeho hodnotu u pod 0,5: okno je rozdělené na čtyři dutiny, v každé z nich činí při emitanci alespoň jedné strany dutiny $e = 0,1 h_r \leq 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ a $Vhc \leq 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ čili $\{1/h\} > 0,5$, $1/4(1/h) < 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Foliové rolety mají uplatnění nejen pro zvýšení izolace proti úniku tepla z budovy, ale i pro regulaci jejího osvětlení. Fólie, které jsem užíval, propouštějí jedno až tři procenta světla a světlo téměř nerozptylují. Jsou tedy dobře průhledné, tvoří jen účinný šedý filtr. I přes dvojici takových rolet je ráno výhled ven, lze rozeznat svítání a den. Pro optimální regulaci osvětlení místnosti v horkém období, ale i pro takové účely, jako je dnes obvyklé zatemňování pro výuku s využitím dataprojektoru nebo pro spánek, není-li venku dost tma, je obecně možné a vhodné kombinovat fólie s průhlednostmi od jednoho procenta až do deseti procent. I u těch průhlednějších lze totiž očekávat, že jsou stále ještě velmi dobře odrazivé pro dlouhovlnné záření (analogií jsou zrcadla radarů tvořená sítěmi – jsou-li otvory nezaplňené elektricky vodivou vrstvou výrazně menší než vlnová délka, na odrazivosti se neprojeví).

Je možné, že výrobci začnou nabízet skupinu foliových rolet ve dvojsklech plněných argonem nebo kryptonem. Alternativou nezávislou na výrobcích dvojskel je aplikace roletových soustav do oken užívajících kombinace dvojskla s argonem či kryptonem a dalšího vnějšího skla odděleného tlustou vzduchovou vrstvou. To je také konfigurace vhodná pro zvukovou izolaci. Nabízí ji řada výrobců oken, např. firma Interpane pod názvem Edition 4 [42]. Ve vzduchové dutině běžně užívají různé clony, jak typu plisé tak lamelové. Není žádný technický problém, aby tam užívali clony foliové, trojnásobné až pětinasobné. Celkový tepelný odpor takového okna se trojicí rolet může pak dosáhnout hodnoty $3 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ až $6 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (tak vysoké hodnoty už vycházejí ze situace, že významný konvektivní tepelný tok se neodehrává na žádném rozhraní kromě exteriérového). Horní z těchto hranic už dosahuje dolní meze pro měrný tepelný odpor vnějších stěn pasivních domů. Při dosažení této hranice se zcela uvolňují ruce architektům, protože mohou používat skleněné výplně místo neprůsvitných zdí téměř kdekoliv, aniž by byl snížen komfort v interiéru nebo narostla potřeba vytápění. A aniž by mohly vzniknout problémy se solárním přehříváním budovy nebo oslněním při pobytu v budově.

Závěrem poznámka k orientaci fólií: je-li pokovená jen jedna strana (jak je obvyklé), měla by být orientována k exteriéru. Tak se na vrstvu plastu dostane jen velmi malá část slunečního záření, což by mělo zajistit dlouholetou životnost fólie.

Kapitola 5

Ověření vlastností proměnných okenních souvrství

5.1 Emitance

Podstatným parametrem foliové přepážky je její dostatečně nízká emitance, a to na obou stranách. Napařená vrstva alumina má nízkou emitanci nepochybně, rozhodně menší než 0,1. Nicméně fólie s jednostranně napařenou hliníkovou vrstvou by z druhé strany mohla mít emitanci vyšší, vinou absorpce v polymeru, ze kterého je vyrobena. Naštěstí většina polymerů v dlouhovlnném oboru málo pohlcuje, a je-li fólie velmi tenká, na zvýšení emitance se to nemusí projevit nijak drasticky.

Emitanci lze snadno a rychle měřit jen v tom oboru, ve kterém pracuje daný infrateplocíměr nebo termokamera, tedy obvykle v oboru od osmi do čtrnácti mikrometrů aneb LWIR. Postup, jak to dělat, jsem podrobně uvedl v práci [28]. Princip je v ten, že se měří jasová teplota T_{lum} povrchu, v němž se odrazí předmět (okolí) výrazně jiné teploty. Pokud by emitance povrchu byla nulová (a odrazivost tedy jednotková, má-li povrch v daném spektrálním pásmu nulovou průhlednost), byla by jasová teplota měřeného obrazu předmětu táž jako jasová teplota onoho předmětu přímo. Měření je velmi jednoduché, pokud je zkoumaný povrch lesklý. Tehdy v něm obraz předmětu přímo vidíme (vizuálně, nebo alespoň termograficky) a podle toho pozorujeme právě toto místo pod správným úhlem. Složitější je to u povrchů matných, ty je nutné přenést do pokud možno izotermního prostředí dostatečně odlišné teploty a dbát přitom na to, aby samy svou teplotu změnilo co nejméně (mimo okamžik měření mají být tedy tepelně izolované a nejlépe nanesené na dobře vodivém masivním kovovém předmětu) [71, str. 4].

Pro teploty málo odchylné od bodu mrazu jsem v [28] navrhl užít vztahu

$$T_{\text{lum}}^5 = eT_{\text{object}}^5 + (1 - e)T_{\text{surr}}^5, \quad (5.1)$$

odkud vyplývá

$$e = (T_{\text{lum}}^5 - T_{\text{surr}}^5) / (T_{\text{object}}^5 - T_{\text{surr}}^5), \quad (5.2)$$

příčemž objektem je zde ona fólie a okolím ta scéna, která se ve fólii odráží. Za teplotu okolí T_{surr} je na místě považovat jasovou teplotu okolí – tu, kterou by teploměr či kamera ukázaly, pokud by se namířily přímo na ně. Teplota objektu T_{object} je jeho skutečnou teplotou, zjištěnou či zajištěnou jinými metodami. Pátá mocnina ve vztahu vystupuje proto, že intenzita vyzařování v maximum Planckovy křivky roste s pátou mocninou absolutní teploty. Má tak jinou, strmější teplotní závislost než obsah plochy pod celou křivkou, který roste se čtvrtou mocninou teploty.

Aproximace pátou mocninou teploty, platná pro maximum Planckovy křivky, ale není pro interval LWIR dobrá pro vyšší teploty. Nad $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ je dokonce lepší aproximace čtvrtou mocninou. To ukazuje přímá integrace Planckovy křivky v tomto oboru. Jako velmi dobrá se ukázala kvadratická aproximace vzniklá proložením závislosti tohoto určitého integrálu na teplotě

$$E_{\text{LWIR}}/(\text{W}/\text{m}^2) = 110,12 + 2,002\theta + 0,0119\theta^2, \quad (5.3)$$

kde θ je číselná hodnota Celsiovy teploty, tedy $\Theta/^{\circ}\text{C}$. Odchytky v oblasti od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ nepřesahují jedno promile.

Lze předpokládat, že takový nebo velmi podobný přepoččet užívá i vlastní software kamery. Pak jasová teplota θ_{lum} , kterou ukazuje, je dána tímtéž vztahem (jen připisujeme index *lum* a pro pro další přehlednost značíme $a = 110,12$, $b = 2,002$, $c = 0,0119$),

$$E_{\text{LWIR}}/(\text{W}/\text{m}^2) = a + b\theta_{\text{lum}} + c\theta_{\text{lum}}^2. \quad (5.4)$$

Pro šedé těleso pak zřejmě platí

$$a + b\theta_{\text{lum}} + c\theta_{\text{lum}}^2 = e_{\text{LWIR}}(a + b\theta_{\text{obj}} + c\theta_{\text{obj}}^2) + (1 - e_{\text{LWIR}})(a + b\theta_{\text{surr}} + c\theta_{\text{surr}}^2) \quad (5.5)$$

a pro *pásmovou emitanci* e_{LWIR} v oboru LWIR pak (hned krátíme koeficientem u první mocniny teploty a zavádíme $q = b/c = 0,006$)

$$e_{\text{LWIR}} = \frac{\theta_{\text{lum}} - \theta_{\text{surr}} + q(\theta_{\text{lum}}^2 - \theta_{\text{surr}}^2)}{\theta_{\text{obj}} - \theta_{\text{surr}} + q(\theta_{\text{obj}}^2 - \theta_{\text{surr}}^2)}. \quad (5.6)$$

Kamera nesnímá jistě s jednotkovou citlivostí právě jen v oboru LWIR a s nulovou jinde. Je proto potřeba vyšetřit i případy poněkud jiného oboru citlivosti. Pro obor $9\text{ }\mu\text{m} - 13\text{ }\mu\text{m}$ vychází koeficient u kvadratického členu mírně menší, jen $q = 0,0055$, pro obor širší, na krátkovlnném konci vybočující z LWIR, $7\text{ }\mu\text{m} - 14\text{ }\mu\text{m}$, by to bylo $0,0069$ (v tomto nejširším pásmu je už kvadratická aproximace na okrajích intervalu horší). To jsou v praxi dostatečně malé odchylky. Podstatné je jen kvadratický člen úplně nezanedbat.

Termokamera, s níž jsem pracoval, má udaný obor citlivosti $7,5\text{ }\mu\text{m} - 13\text{ }\mu\text{m}$. Pro ten dává integrace Planckovy křivky v tomto okně a následné proložení parabolou v oboru $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (pro dolní mez $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ už parabola nestačí) koeficient u kvadratického členu $q = 0,007$ místo $0,006$.

Emitance lze měřit tak, že se ve zkoumaných površích odráží okolí značně odlišné teploty. Tím může být např. hladina vroucí vody. Jinou, zimní možností je okno otevřené do

mrazivého exteriéru. Nebo otevřená dvířka vyhrátých kamen. U nich už nestačí polynomiální aproximace, je nutno počítat přímo hustotu toku energie v daném spektrálním pásmu. Pro tento účel jsem vytvořil program `lwir.pas`, který ji vypočítá pro zadanou teplotu a příp. i pro jiné okraje intervalu než je 8000 nm a 14000 nm (ty lze na příkazovém řádku uvést jako dva další parametry) [38].

Jako ideální zařízení k měření LWIR emitance při běžných teplotách se mi osvědčila nádoba s hrubozrnným sněhem. Ten po umístění do pokojové teploty začne tát. Jeho hrubozrnnost zajišťuje velmi členitý povrch, který díky vícenásobným odrazům vede k emitanci velmi blízké jedné. Přímé měření infrateploměrem či termokamerou také skutečně nulu Celsia s odchylkami nepřevyšujícími desetinu kelvinu udává. Je pak snadné umisťovat nad nádobu různé odrazné plochy a z boku či zespodu měřit jejich jasové teploty. Podobně lze měřit i transmisivity nepokovených fólií (pozorováním shora).

Jsou situace, kdy emitance není nutné počítat, ale přímo zkoušet nastavit na kameře či teploměru, až nakonec bude udávaná teplota souhlasit se skutečnou teplotou tělesa. Kamera v ustáleném izotermickém prostředí snímající plechovou konvici s vroucí vodou je právě takovým případem. Shoda či neshoda takto zjištěné emitance s tou, která byla spočítána výše uvedeným způsobem pro pásmo LWIR, může naznačit, že se pásmo zaznamenávané kamerou svým průběhem spektrální citlivosti či dokonce svým rozsahem liší od pásma LWIR.

Emitance v oboru zobrazovaném termokamerou má i bezprostřední praktickou důležitost, daný obor se totiž shoduje s oblastí spektra, v níž ovzduší pohlcuje jen velmi málo. Je to tedy táž oblast, která je zodpovědná za noční zářivé ochlazování povrchů staveb. Kamery sice nedokáží měřit tak nízké jasové teploty, jaké odpovídají bezoblačné obloze v okolí nadhlavníku, ale zato lze pomocí jasného nebe snadno porovnávat různé povrchy, pokud jde o jejich odrazivost v tomto LWIR oboru. Mají-li odrazivost vysokou, jejich jasová teplota je na otevřeném prostranství pod jasným nebem velmi nízká, až neměřitelná. (V noci to u takových materiálů vede k tomu, že se jen málo ochlazují vyzařováním.)

Pro lesklé povrchy měříme infrateploměry i kamerami jejich směrové pásmové emitance. Měření lze opakovat pro různé úhly dopadu, z toho potom můžeme odhadovat i emitance celkové. Nebo můžeme užít vztahů dle [51], platného ne pro emitance pásmové, ale úplné čili bolometrické, vystupující ve Stefanově-Boltzmannově zákoně, a to pro hladké homogenní vzorky – jde tedy současně o emisivity jako vlastnosti daných materiálů:

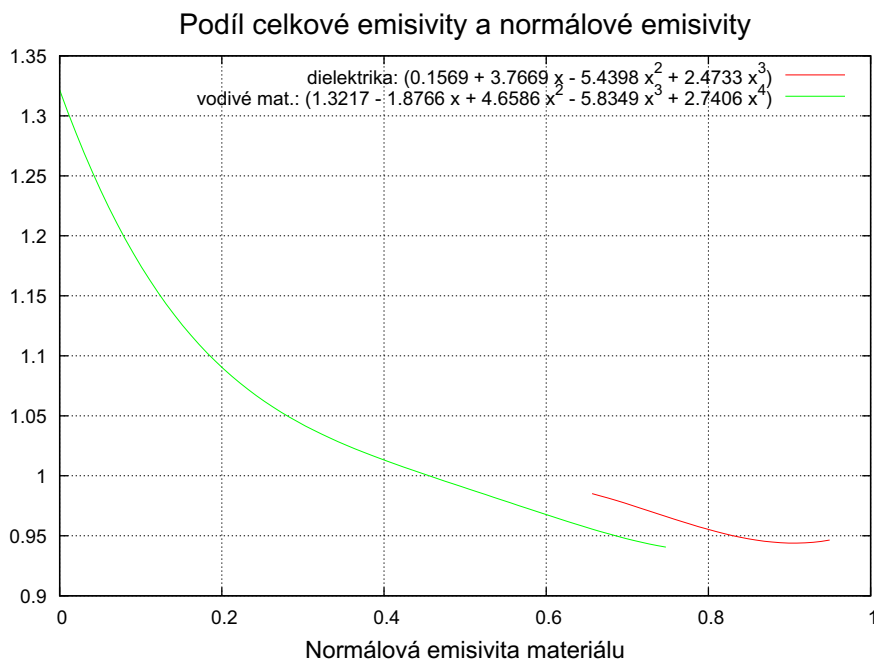
$$e = e_n(0,1569 + 3,7669e_n - 5,4398e_n^2 + 2,4733e_n^3) \quad (5.7)$$

je platný pro dielektrika s obvyklým rozsahem normálových emisivit v rozmezí od 0,65 do 0,98. (pro sklo tak ale vychází emisivita o pět promile větší) a

$$e = e_n(1,3217 - 1,8766e_n + 4,6586e_n^2 - 5,8349e_n^3 + 2,7406e_n^4) \quad (5.8)$$

platí pro kovy a polovodiče i pokud jsou aplikovány jako vrstvy na skle. Graficky viz obr. 5.1 (str. 56).

V případě opačné strany fólie, než je ta pokovená, je ale spolehlivě užít nemůžeme, jde o velmi heterogenní souvrství.



Obrázek 5.1: Přepočtení normálové bolometrické emisivity na celkovou dle [51]. (viz text str. 55)

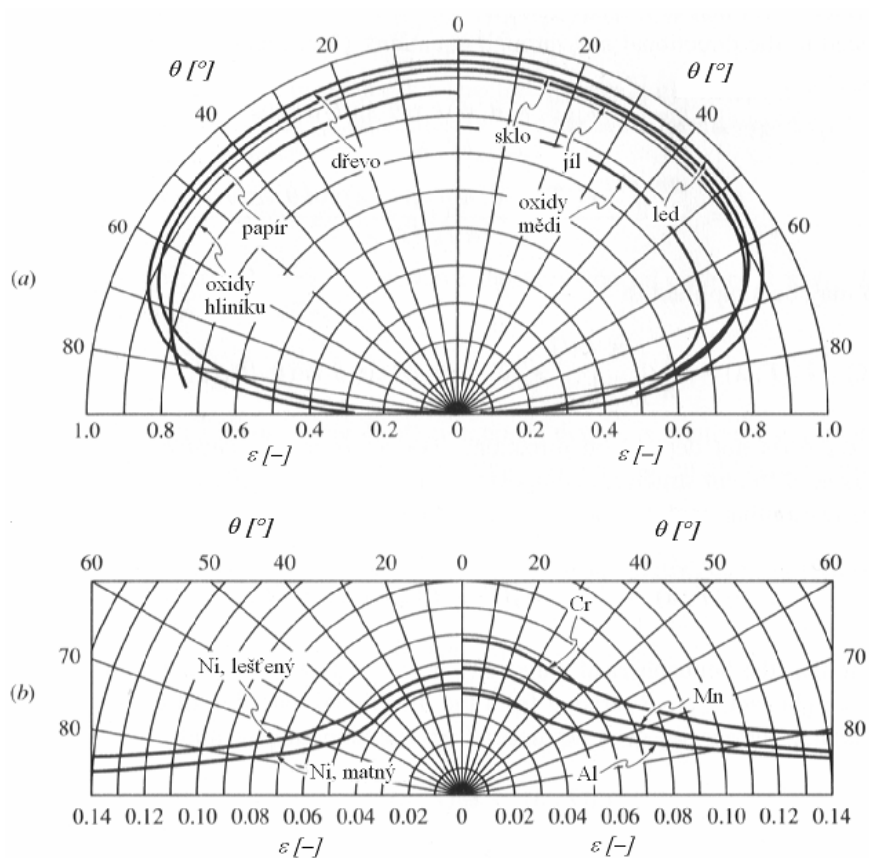
Pro tepelné toky s výjimkou těch do jasné oblohy je důležitá právě emitance bolometrická, tedy podíl hustoty vyzařovaného tepelného toku k té, kterou by vyzařovalo černé těleso. Její přímé měření je stěží přesně a rychle možné, přibližné měření lze provést pomocí teplotního čidla umístěného v ohnisku parabolického zrcadla. Tempo nárůstu teploty čidla po namíření přístroje na zkoumaný předmět je úměrné rozdílu černých teplot čidla a předmětu, viz [27]. Přesné měření lze realizovat jen kalorimetricky ve vakuu. Takto změřený údaj by měl být k dispozici ke všem materiálům pro stavebnictví, o něž je na trhu zájem právě pro jejich nízkou emitanci.

Většina materiálů je naštěstí v dlouhovlnném oboru přibližně šedá, tj. pásmové emitance změřené infrateploměrem nebo termokamerou lze považovat za blízké emitancím celkovým.

Úhlovou závislost bolometrických směrových emitancí uvádí [53, str. 50] dle [48], viz obr. 5.2 (str. 57).

Emitance lze většinou odhadnout i na pohled. Nekovově vyhlížející materiály mají totiž emitanci vždy kolem 0,9, výjimkou jsou jen speciální vrstvy na sklech či solárních absorbech. Lesklé kovové povrchy ji pak mají vždy kolem 0,1. Nejisté jsou pouze emitance sendvičů, kdy je lesklá kovová vrstva krytá vrstvou plastu. Jde-li o plast velmi tenký (pod deset mikrometrů), jeho transmitance může být blízká jedné a emitanci nemusí zásadně zvyšovat.

Tlustší plastový povrch ale volivají výrobci různých „radiačních bariér“, možná aby předešli jejich viditelnému poškození při neopatrné manipulaci. Funkce bariér je tak velmi poškozena, emitance rostou až přes 0,3. Toho si výrobci asi ani nejsou vědomi, možná proto, že jim připadá, že dobrý vzhled bariéry (jakoby alobalová vrstva) je dobrou garancí toho, že má výtečné vlastnosti i v oboru vlnových délek dvacetkrát vyšších. Požadavek na uvá-



Obrázek 5.2: Směrové emitance pro dielektrika a kovy, obr. z [48] upravil R. Steuer [53, str. 50]. Symbolem Θ je zde vyznačen odklon od normály.

dění normálové i celkové bolometrické emitance je u výrobků, které se za radiační bariéry prohlašují, zvláště naléhavý.

Ještě více zavádějící jsou deklarace výrobců bílých nátěrů, že snižují tepelné ztráty budov odražením dlouhovlnného záření. Takový nátěr neexistuje. Nekovové nátěry mohou být bílé vždy jen v oboru solárním, ne dlouhovlnném. V tom jsou téměř stejně tmavé jako jiná dielektrika. Spolehlivý důkaz ovšem nepodá jen měření jejich LWIR odrazivosti infrateploměrem nebo snímek termokamerou, k důkazu je potřeba měřit skutečné zářivé ochlazování předmětu pokrytého takovou vrstvou, jako je to demonstrováno v [53]. To lze termograficky také realizovat: pokud by měl nátěr celkovou emitanci opravdu nižší než jiné materiály, i když emitance v oboru LWIR by byla vysoká, pak by předmět jím natřený chladl po přenesení z teplého prostředí do chladného (např. pod noční oblohu) pomaleji než jinak stejný předmět s jiným dielektrickým povrchem. To by se projevilo na menších změnách jeho jasové LWIR teploty (tu je pro okamžik měření vhodné zvýšit tím, že se na chvíli potlačí odraz oblohy). (Absenci jakéhokoliv rozdílu oproti jiným bílým nátěrům pro produkt ThermoShield našla práce [72].)

5.1.1 Příklady měření směrových emitancí

Hlavním materiálem pro mou práci byla pokovená fólie se světelnou propustností kolem tří procent. Poskládaná fólie v balíčku má tloušťku 5,4 mm, balíček má další rozměry 8 cm x 12 cm. Rozložená fólie má mít 140 cm × 220 cm. Balíček má tedy asi tři sta vrstev, tloušťka fólie je tedy 14 μm až 15 μm .

Dlouhovlnné vlastnosti fólie jsem měřil pomocí infrateploměru Raynger MX, výrobku firmy Raytek s udaným oborem citlivosti 8 μm až 14 μm , tedy právě LWIR. Je to nejstarší infračervený přístroj našeho ústavu; v době měření indikoval velmi přesně teplotu mrznoucí vody (s tolerancí 0,1 K), a s tolerancí do 0,5 K i teploty pokojové, měřené rtuťovým teploměrem s rozlišením setiny kelvinu. Nikoliv však už teplotu varu vody, tam udával 88 °C, a to i v konfiguracích, kdy se jednalo prakticky o černé těleso. Tím ale nejsou příliš ovlivněna měření nevelkých teplotních rozdílů kolem bodu mrazu.

S použitím extrémně silného zářiče (dvířek otevřených rozpálených kamen) jsem změřil i transmisivitu pokovené fólie: není přesně nulová, činí ale jen jedno promile a lze ji pro stavební účely zanedbat. Pro měření transmitance jsem fólii napnul na rámeček z lepenky. Podobně jsem měřil i reflektance (doplňky emitance do jedničky), tam ale i s jinak připraveným vzorkem, fólií nalepenou různými stranami na dřevěný hranol, kvůli její alespoň mírné teplotní stabilizaci. S použitím dlouhovlnného „pohledu“ do mrazivé mlhy s teplotou kolem 4 °C skrze otevřené okno vyšly emitance fólie jako 0,03 a 0,17. Emitance pokovené lepicí pásky pak jako 0,20.

K rychlému počítání jsem napsal program b2e.pas, jehož parametry zadávané na příkazovém řádku jsou číselné hodnoty Celsiových teplot: jasové vzorku θ_{lum} , θ_{surr} okolí, které se v něm odráží, a skutečné vzorku θ_{obj} . Program počítá dle vztahu 5.6 a je k dispozici na [38]. Např. pro měření s užitím misky se sněhem v prostředí s teplotou 18 °C jsem zadal „b2e 0,6

0 18“ a výsledkem byl odhad směrové pásmové emitance 0,030 (pro úhel dopadu menší než 30°). Jiná měření, kdy měl odraz sněhu ve fólii jasovou teplotu o decikelvin odlišnou, pak indikují LWIR směrové emitance od 0,025 do 0,035. Opačná strana fólie dávala jasové teploty 3,4 °C až 4,1 °C, tomu odpovídají emitance 0,17 až 0,16. Pokovená lepicí páska (jasová teplota byla 4,8 °C) má emitanci až 0,25.

Měřil jsem i vlastnosti průhledné fólie, kterou doma léta užíváme na mírné zlepšení starých dvojítkých oken. Její propustnost pro LWIR záření se ukázala jako 0,82 při úhlu dopadu zhruba 45°, odrazivost jako 6 % až 8 %, pohltivost a tedy i emisivita je tudíž asi 0,11. Fólie má tloušťku 25 μm . LWIR záření absorbuje na jednotku tloušťky zřejmě poněkud méně než materiál zkoumané fólie pokovené.

Významným zkoumaným povrchem bylo kovové zrcadlo (viz dále sekci „Rybí oko“), které užívám pro termografické zobrazování velkých prostorových úhlů. Pro ně vyšla jasová teplota odrazu tajícího sněhu jako 1,0 °C při teplotě zrcadla 18,5 °C. LWIR emitance jeho povrchu (téměř normálová) je tedy 0,05 (přesněji $0,049 \pm 0,005$).

5.1.2 Příklad měření transmitancí

Pro ilustraci pozn. 6 na str. 31 jsem orientačně změřil transmitance několika vzorků pěnových tepelně izolačních materiálů tloušťky 4 mm, týmž infrateploměrem, tedy v oboru LWIR. Nejde o hodnoty reprezentativní pro celý obor dlouhovlnného záření, rozhodující pro konduktanci daných materiálů. Dokumentují ale dobře, že zářivý tok je uvnitř tepelně izolačních pěn nezanedbatelný.

vzorek	t / K	transmitance
EPS15	10	12 %
EPS30	3,5	4 %
XPS	2	2 %
PVC	1,5	1,6 %
gEPS20	1	1 %

Tabulka 5.1: Transmitance vzorků tl. 4 mm v oboru LWIR dle orientačního měření infrateploměrem Raynger MX2. Zdroj záření v pozadí měl jasovou teplotu 90 °C, vzorky 19 °C. Tabulka uvádí zvýšení jasové teploty vzorku t vlivem průchodu záření vzorkem a z něj vypočítanou transmitanci. Další vzorek EPS o objemové hmotnosti 15 kg/m^3 s dvojnásobnou tloušťkou měl LWIR transmitanci 2 %, mírně větší než 0,12², což dokazuje, že se EPS vůči průchodu LWIR záření nechová jako šedé těleso. Zajímavé je i to, že vzorek šedého polystyrénu gEPS20 měl také zhruba poloviční LWIR reflektanci oproti bílým EPS, nanočástice grafitu tedy zvyšují jeho emitanci. Vzorek pěnového PVC měl objemovou hmotnost asi 40 kg/m^3

5.2 Výpočty skutečných teplot

Nastavením emisivity uvažované teploměrem či kamerou na jedničku a užitím upravené rovnice 5.5 pro šedé těleso (kde pro obor LWIR je $b = 2,002$, $c = 0,0119$) dostáváme, při vynechání indexu LWIR u pásmové emitance a po zavedení $q = b/c = 0,006$,

$$\theta_{\text{lum}} + q\theta_{\text{lum}}^2 = e(\theta_{\text{obj}} + q\theta_{\text{obj}}^2) + (1 - e)(\theta_{\text{surr}} + q\theta_{\text{surr}}^2), \quad (5.9)$$

$$\theta_{\text{obj}} + q\theta_{\text{obj}}^2 = (\theta_{\text{lum}} + q\theta_{\text{lum}}^2 - (1 - e)(\theta_{\text{surr}} + q\theta_{\text{surr}}^2))/e, \quad (5.10)$$

takže pro získání teploty objektu je potřeba řešit kvadratickou rovnici. Protože ale je kvadratický člen malý, tak v případě, že jasová teplota objektu se liší jen málo od zrcadleného okolí a emitance je vysoká, je možné jej vynechat a počítat lineárně, přinejmenším pro hrubý odhad:

$$\theta_{\text{obj}} \approx (\theta_{\text{lum}} + (1 - e)(\theta_{\text{surr}}))/e. \quad (5.11)$$

Pokud se i vypočítaná teplota objektu liší málo od obou výchozích, je odchylka od přesnějšího odhadu jistě malá. K rychlému přesnému počítání (tj. řešení rovnice 5.10) jsem napsal program `b2r.pas`, jehož parametry zadávané na příkazovém řádku jsou θ_{lum} (číselná hodnota jasové Celsiovy teploty vzorku), θ_{surr} (okolí, které se v něm odráží) a směrová emitance. Program je k dispozici na [38]. Dalším parametrem programu může být jiná hodnota q (např. 0,007 vhodná pro obor $7,5 \mu\text{m}$ až $13 \mu\text{m}$). Pro teploty mimo interval, v němž platí kvadratická aproximace, program počítá přímo integrál Planckovy funkce v daném spektrálním oboru.

U zrcadlově odrážejících objektů je vidět, jaké okolí se v nich odráží, a jasovou LWIR teplotu tohoto okolí lze přímo změřit namířením kamery či teploměru na ně. U objektů, které jsou v oboru LWIR matné (předměty matné vizuálně mohou být na dvacetinásobné vlnové délce zcela lesklé, stačí např., že nerovnosti jejich povrchu jsou menší než $2 \mu\text{m}$) je situace snadná jen tehdy, pokud je celý poloprostor, jež se v nich odráží, izotermický. Pokud takový není (to je případ, kdy je vystaven bezoblačné obloze i pozemské krajině současně), lze teplotu, kterou by bylo potřeba připsat okolí, zjistit jinak. Jednou z možností je užít povrchu podobně „matného“, avšak s vysokou reflektancí, např. pomačkaného alobalu snímaného rozostřeně. Lépe je užít pomocného objektu se zcela stejným povrchem, u nějž teplotu měříme kontaktně. Místo kontaktního měření lze objekt natočit tak, aby byl na chvíli vystaven jen okolí izotermickému. Další možnost je zastínit část zkoumaného objektu tak, aby se v něm obloha neodrážela (např. nahradit oblohu kovovým povrchem, ve kterém se odráží pozemská krajina), a z tohoto měření spočítat skutečnou teplotu objektu. Po odstranění zastínění a dalším měření je pak snadné dopočítat jasovou teplotu složitějšího okolí a tu používat pro další měření.

5.2.1 Vhodné zobrazování jasových teplot

Pro kvantitativní vyhodnocení scén je žádoucí mít možnost takového zobrazení, v němž lze teploty přímo „vidět“, tedy říci, jaká jasová LWIR teplota odpovídá tomu kterému bodu

snímku. To vyžaduje použití diskretní škály barev, kdy je na první pohled zřejmé, kterému místu teplotní stupnice daná barva odpovídá. Obecně nemusí jít o barvy, ale jen o stupně šedi, těch lze ale na první pohled správně rozlišit a přiřadit ke zvolené škále jen nevelký počet, škála tak může mít stěží více než osm různých šedí. Použití diskretní posloupnosti barev dává možnost rozlišit více než deset různých teplot.

Pro přehlednost snímku je ale vhodná naopak škála spojitá, a to šedá. Snímek pak připomíná nebarevnou fotografii.

Ideální by bylo, kdyby data uložená kamerou byla v nějakém dokumentovaném formátu, který by bylo možné převádět na jiné formáty a automaticky vyhodnocovat a zobrazovat různými programy. U kamery našeho ústavu, FLIR ThermaCam E3, to bohužel možné nebylo; je dokonce možné, že to dosud nejde u žádné z kamer.

Počet uživatelů a jejich tlak zřejmě není natolik velký, aby pro výrobce bylo výhodné svá data zpřístupnit. Výhodnější je zřejmě, když si udržují své zákazníky tím, že když se už s kamerami a softwarem jedné firmy naučí pracovat, tak u něj prostě zůstanou, jiný software na staré snímky použít nemohou. Jen kupují nové verze softwaru a nové modely kamer. Nadějí pro nápravu by mohlo být zavedení dokumentovaného formátu termografických dat, jak diskutuje [9] – nicméně i tato snaha vyústila zatím jen k dalšímu proprietárnímu softwaru.

Situace u krátkovlnných kamer (fotoaparátů) ale zase tak úplně jiná není: i zde jsou surová data (RAW) uložena často v nedokumentovaném formátu a výrobce vede své zákazníky k tomu, aby pracovali s jeho proprietárním softwarem. RAW formáty našťastí nejsou konstruovány tak, aby je nebylo možné rozluštit, a tak se našel programátor, který to pro původní formát firmy Canon vyřešil a během let přidal stovky dalších kamer [8]. To mi umožnilo ve světelném oboru se surovými daty pracovat, využívat je pro plnohodnotnou fotometrii. Vyvinul jsem k tomu program `raw2lum` („raw to luminance“, tedy převod dat na jas scény) [35] a vyhodnotil tak stovky snímků z nejrůznějších míst, viz např. [32].

Osvědčilo se mi přitom kódování jasů barvami obvykle tak, aby bylo možné v každém dekadickém řádu rozlišit pět logaritmických úrovní. Po sobě následující stupně tedy označují jasy, které jsou v poměru páté odmocniny z deseti aneb 1,585. V rámci jednoho řádu se užívá táž barva, jen různě světlá, mění se tedy jen koeficient před zvolenou lineární kombinací složek R, G, B. Viz obr. 8.4 (str. 88).

Obdobnou stupnici lze implementovat i do softwaru ThermaCam Reporter 2000 pro kameru FLIR, neb stupnice (palety) jsou obyčejné textové soubory, v programu stačí zadat jejich název. Stupnici jsem vytvořil programem `palette4.pas`, adaptovaným z `raw2lum`. Místo pěti stupňů jasu v jedné barevné kombinaci využívá pro ještě lepší přehlednost stupně jen čtyři. Barevných kombinací je celkem 13. Podobně, malinkým programem `gray.pas`, jsem vytvořil spojitou šedou škálu. Programy i palety jsou uvedeny na adrese [38]. Typické použití takové palety je pro rozsah právě oněch 13 K, nejmenší dílek tehdy odpovídá čtvrtině kelvinu. Jemnější stupnice už nepřidává lepší rozlišení, jen se více projevuje šum signálu kamery.

Dalším nástrojem, potřebným pro zobrazení, je šablona stránky pro program Reporter. V ní lze nastavit paletu, která se bude pro snímky používat, stejně jako rozsah a způsob

zobracení teplot. Program bohužel neumožňuje tentýž snímek na stránce automaticky zopakovat v několika zobrazeních. Pro přehlednost je ale žádoucí mít tam daný snímek alespoň ve dvou základních zobrazeních, totiž v onom kvantitativním, s diskrétními, spolehlivě rozlišitelnými stupni barevné škály a s lineární stupnicí teplot, a v zobrazení spojitým šedém, s neudanou teplotní stupnicí – tu si stanovuje program sám tak, aby snímek získal co největší kontrast. Takových šablon jsem několik vytvořil, jsou spolu s paletami dostupné v [38]. Při zkoumání obývaných budov jsou potřeba šablony v zásadě jen dvě. Jedna pro snímky interiérové, zobrazující teploty, které se vyskytují tam, tj. pokojové a mírně nižší (užíval jsem rozsah od $10,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), druhá pro snímky exteriérové – pro mírný mráz se hodil rozsah teplot od $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotní rozsah je v obou případech 13 K, každé Celsiově teplotě ($/1\text{ K}$) z tohoto intervalu zaokrouhlené na celé číslo tak odpovídá jedna barva ve čtyřech jasech (jasové stupínky jsou po čtvrtkách kelvinů).

Pro nejrychlejší nahrání sady snímků do programu, umožňující pak jejich pohodlné prohlížení, slouží šablony s příponou a5, kde jsou snímky zobrazené jen jednou. Je snadné vytvořit takové sady dvě, jednu s barevnou lineární stupnicí a jednu s nelineárním šedým zobrazením.

Pro studium tepelných toků je výhodnou funkcí programu Reporter možnost zjistit průměrnou jasovou teplotu pro vybraný obdélník. Ten může typicky reprezentovat i celé okno vč. rámu a rozdílných teplot v různých výškách zasklení. Z této teploty a jejího rozdílu oproti teplotě referenční nevyhřívané plošky pak lze dobře odhadnout velikost tepelného toku oknem.

Program Reporter funguje jen pod komerčním systémem Microsoft Windows; pokud je v systému nainstalován též další komerční program Adobe Acrobat, je možné soubor snímků natažený do programu Reporter s užitím vhodné šablony uložit jako pdf a pak již normálně používat. Před uložením je možné v programu Reporter přidat na každou stránku nějaké komentáře. Výsledná pdf, formátu A4 či A5, je pak už snadné používat, zařazovat do jiných dokumentů apod. Viz obr. 8.5 (str. 89), obr. 8.6 (str. 90), obr. 8.7 (str. 91).

5.3 Využití vypuklého zrcadla pro snímky velkých prostorových úhlů

Termografické kamery zobrazují jen nevelké zorné pole, což je zcela adekvátní při zkoumání detailů. V interiérech je ale často potřeba mít informaci i o celkovém rozložení teplot, např. pro možnost zvolit nějakou teplotu jako reprezentativní pro celý interiér.

K tomuto účelu jsem užil vypuklé lesklé kovové zrcadlo, v němž se zobrazuje celý poloprostor. Je to obdoba toho, jak se např. fotografovala jedním snímkem celá obloha už v dobách, kdy nebyly běžné čočkové objektivy typu fish-eye. V LWIR oboru takové čočkové objektivy dosud nejsou, jistě i vinou neexistence tak široké škály optických materiálů, jako je k dispozici ve světelné doméně.

Zatímco ve světelné doméně není snadné mít trvanlivé kovové zrcadlo s vysokou reflektancí, v LWIR doméně to snadné je, kovy tam odrážejí většinou výborně. Já jsem použil pochromované těleso pomocného automobilového reflektoru. Je připevněno na lati délky 4 dm, kamera se na opačný konec fixuje „stativovým šroubem“, její objektiv je od zrcadla vzdálen 3,5 dm. Optická osa zrcadla nemíří na kameru, ale asi 30° nad ni, takže odraz kamery je až na okraji zrcadla (konkrétně, v místě jeho upevnění). V zrcadle se zobrazuje téměř celý poloprostor. Reflektanci zrcadla v LWIR oboru jsem změřil pomocí infrateploměru Raynger MX2 od firmy Raytek, výsledkem je hodnota 0,951(5).

Je tak možné např. pořídit snímek celého stropu s většinou stěn, nebo i téměř celé místnosti naráz (z jejího kouta). Jakékoliv nehomogenity v rozložení jasových teplot jsou ihned viditelné. Snímání je nepohodlné jen v tom ohledu, že fotograf se musí snažit být mimo zorné pole zobrazované zrcadlem, viz obr. 8.8 (str. 92).

Snímání přes zrcadlo znamená další zkreslení zobrazení teplot oproti teplotám skutečným. Je to ale zkreslení nevelké, v praxi akceptovatelné. Pokud jde o teplotní rozdíly, zrcadlo takové odrazivosti je zmenší o čtyři až osm procent. Pro pohodlný výpočet opravených jasových teplot jsem připravil další malý program, b2s.pas, který je vč. přeložené verze opět k dispozici v adresáři [38]. Vztahy pro výpočet dostáváme jednoduchou úpravou rovnice 5.11, zpravidla ale stačí i lineární přiblížení

$$\theta_{\text{surr}} \approx (\theta_{\text{lum}} - e\theta_{\text{obj}})/(1 - e), \quad (5.12)$$

kde jsme pro konzistenci zrcadlo označili za objekt a zrcadlený povrch za okolí.

Příkladem zobrazení týchž ploch přímo a přes zrcadlo jsou obr. 8.6 (str. 90) a obr. 8.9 (str. 93), na snímku přes zrcadlo je velké okno přibližně uprostřed. Rozdíl jasové teploty obrazu okna a sousední zdi je při snímání přes zrcadlo asi 1,8 K, na přímém snímku spíše 2,0 K.

Nevím o tom, že by takový levný a přitom velmi užitečný optický prvek pro FLIR kamery použil přede mnou už někdo jiný, i když je jeho použití nasnadě. Podstatné přitom je, že na přesné geometrii zrcadla nezáleží. Ve viditelném oboru jsou sice obrázky pořízené „nepravidelným“ zrcadlem pokřivené, jejich jasy tím ale nejsou ovlivněny – jas a jeho obdoby v libovolných spektrálních oborech jsou invariantní vůči geometrii zobrazení. Vliv má jen to, pokud se mění odrazivost či propustnost optických prvků užívaných pro zobrazování.

Při termografickém průzkumu interiéru (ale i exteriéru, pokud se např. od zkoumané fasády nelze dostatečně vzdálit) je vhodné začít právě pohledem přes vypuklé zrcadlo. Případné anomálie, které se na něm objeví, je pak možné zkoumat detailněji přímým snímáním. Stejného zrcadla lze užít i pro snímek obyčejným fotoaparát, pro usnadnění orientace v termosnímku.

Vzhledem k tomu, že proprietární program Reporter nepočítá se snímáním přes zrcadlo, nenabízí převrácení snímku kolem vswislé osy. Orientace v zrcadlově převráceném obrazu je tak dosti ztížená, viz obr. 8.9 (str. 93) a obr. 8.10 (str. 94).

Kromě vypuklého zrcadla s malým poloměrem křivosti, zobrazujícího téměř celý poloprostor, by bylo vhodné užívat i zrcadla méně zakřiveného, které by zorné pole termokamery

zvětšovalo jen dvakrát až třikrát. Tím by bylo možné pořizovat stále ještě poměrně detailní záběry, ale zachycující už např. celá okna i v místnostech, kde není možné se od zkoumaných objektů příliš vzdálit. Bylo by to mnohem levnější řešení než pořídit ke kameře několik objektivů, a v termografické praxi též mnohokrát rychlejší (při užívání kovového zrcadla stačí kameru pootáčet mezi záběrem na zrcadlo a záběrem přímým, což je záležitost několika sekund).

5.4 Přepočet teplot na tepelné toky

Z vypočítaných skutečných teplot různých ploch, např. zkoumaného skla v okně a srovnávací skleněné plošky skrze kterou je tepelný tok blízký nule, lze vždy odhadovat hustotu tepelného toku skrze zkoumanou plochu do okolí či z okolí. Odhad její zářivé složky je jednoduchý, odhad složky konvektivní je méně jistý.

V interiéru můžeme zpravidla uvažovat součinitel přestupu tepla jako $h_{\text{int}} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (u hladkých svislých ploch, ne v rozích a koutech), tepelný tok jednotkovou plochou se pak zjistí násobením rozdílem teplot zkoumané a referenční plochy. Pro velmi malé teplotní rozdíly a absenci dalších zdrojů pohybu vzduchu v interiéru to může být i méně, v krajním případě i pouhých $6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ¹. Na interiérové, teplejší straně přepážky se takový odhad dá zpřesnit nanejvýš porovnáním s jinou přepážkou se známou hodnotou u , známe-li i efektivní teplotu exteriéru. Podmínkou věrohodného odhadu tepelného toku je, že panuje ustálený stav, tj. tepelné toky jsou stálé. To vyžaduje poměrně stálé vnitřní i vnější teploty, ty jsou naštěstí v zimních inverzních situacích (stratus nízko nad krajinou) běžné. V případě oken je déledobá ustálenost teplot méně zásadní, neb hmotnost zasklení je poměrně malá a ustálený stav vzniká už během hodin. Jen je potřeba měřit za šera nebo v noci, neb sklo se významně ohřívá též slunečním zářením (nejde-li o nepovrstvené sklo s nízkým obsahem železa). V každém případě, i při obecně ne zcela známých aktuálních hodnotách u , platí, že tepelné toky jsou zhruba úměrné teplotním rozdílům, až na postupně rostoucí vliv konvekce při rostoucích teplotních spádech. Podíly hodnot u pro okna, dveře a zdi lze tak udat poměrně přesně.

To ale platí jen tehdy, když je interiér dosti izotermický. Hlavní problém činí vždy topná tělesa, typicky teplé radiátory pod okny. Pro získání spolehlivých odhadů hodnoty u je žádoucí je včas vypnout.

Jde-li o plochu, kde se na tepelném toku konvekce nepodílí, jako je strop chladného nevětraného sklepa pod teplou místností, zůstává už jen složka zářivá, tedy pouhé $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. To je ale už současně případ měření toku do chladnějšího prostředí, podobně jako v zimním exteriéru. Tam je sice konvekce zvláště nejistá, ale pro zjištění absolutních hodnot toků stačí k nevyhříváním referenčním ploškám přidat jednu či více ploch s dobře definovaným elektrickým vyhříváním, viz obr. 3.3 (str. 46) a obr. 8.2 (str. 87). Vzhledem k tomu, že i malý vítr

¹Norma ČSN EN ISO 13788 uvádí pro zdi dokonce i jen $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, ale tak nízký koeficient přestupu tepla se užívá jen pro bezpečnější výpočty rizika kondenzace

způsobí větší konvekci než teplotní rozdíly, jsou v exteriéru tepelné toky teplotním rozdílem, v případě stejně exponovaných ploch ze stejného materiálu, velmi přesně přímo úměrné.

Příklad vývoje foliové clony a měření tepelných toků oknem ukazuje závěrečná série barevných termografických obrazů v příloze. Na obr. 8.11 (str. 95) je termosnímek vnější zdi s oknem, stropu a dvou vnitřních zdí, pořízený přes vypuklé zrcadlo. Samotné zkoumané okno je na dalším obr. 8.12 (str. 96). Dutina dvojitého okna je rozdělená fóliovou roletou na dvě části zhruba stejné tloušťky, roleta ale dosud není doplněna bočními těsnícími lištami. Vliv proudění netěsnostmi na jejích okrajích je, zejména v zobrazení s barevnou škálou, velmi nápadný, vnitřní okenní skla jsou v dolních vnějších rozích jeho vlivem až o 3 K chladnější než středy skel. Další obr. 8.13 (str. 97) je pořízen až další den večer, po doplnění bočních dřevěných lišt, o něž se folie opírá díky vyššímu tlaku ve vnější části rozdělené okenní dutiny. Je patrné, že ani netěsnosti na dolním okraji rolety nemají zásadní vliv. Okno jako celek má průměrnou teplotu jen jen o 2,1 K nižší než srovnávací neochlazované skleněné plošky (ploška zavěšená uprostřed okna je zobrazená žlutě, ploška u horního okraje okna má i modré oblasti, neb její zobrazená jasová teplota je na hranici 17,5 °C). Teplota interiéru byla ale ještě přibližně o dalších 0,3 K vyšší. Odhad hustotě tepelného toku z interiéru do okna činí tedy 18,5 W/m². Venkovní teplota byla přitom kolem -1 °C. Koeficient prostupu tepla oknem lze tak odhadnout na nejvýše $U = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Poznamenejme ale, že šlo o případ bezvětří, oblohy zatažené nízkou oblačností a exteriérovou teplotu vyšší, než předpokládá norma.

Další dva snímky, obr. 8.14 (str. 98) a obr. 8.15 (str. 99) ukazují detaily středů dvou oken s referenčními tepelně izolovanými skleněnými ploškami poblíž středů snímků. První z nich je zobrazuje běžné dvojitě okno, druhý ono výše zkoumané okno s dostatečně těsnou foliovou roletou uvnitř okenní dutiny. Díky roletě je rozdíl jasových teplot referenčních plošek a zasklení právě poloviční. Momentální hodnotu pro obyčejné dvojitě okno tak lze odhadnout na výjimečně příznivých $U = 2,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Poslední barevná tabule obr. 8.16 (str. 100) ukazuje situaci o měsíc později, když byla do okna přidána ještě roleta druhá. Okno pak již izolovalo výrazně lépe než okolní zeď. Snímky jsou pořízen zvenčí, okno je v prvním patře, kvantitativní vyhodnocení je zkomplikováno skutečností, že se ve skle odráží výrazně chladnější obloha (zkoumání by bylo vhodnější provést za přítomnosti nízké oblačnosti). Okno ale v každém případě izoluje výrazně lépe než okolní cihlová zeď tloušťky 0,5 m. Velmi dobře je patrný vliv konvekce kolem všech vstev dvojitého okna, který vede k teplotám v jeho horní části vyšším až o 2 K. Průměr jasových teplot okna je asi o 1,7 K vyšší než teploty referenčních ploch vlevo od něj (skla a EPS). Vzhledem k panujícím bezvětří je možné i z tohoto jediného snímku odhadnout hustotu tepelného toku oknem z interiéru na 14 W/m² a tedy (rozdíl teplot exteriéru a interiéru bereme jako 21 K) na $U = 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \pm 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Interiérová měření naznačila spíše hodnotu $U = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Kapitola 6

Závěr

6.1 Shrnutí výsledků

Idea velmi snížit zářivou složku tepelného toku vzduchovými dutinami užitím dodatečných přepážek s nízkou emitancí není nová. Nutně k ní musel dojít každý, kdo se nad mechanismy přestupu tepla zamyslel – není proto divu, že je popsána a doporučena např. v důkladné učebnici Halahyja a kol. [21, str. 66-68]. Ta zdůrazňuje i nutnost, aby kolem takové přepážky nemohl cirkulovat vzduch. Nové je jen to, že jsem takové přepážky, jako rolety z tenké fólie s napařeným hliníkem do oken skutečně nainstaloval, docílil jejich praktické těsnosti, ověřil, že jejich tepelné vlastnosti odpovídají teorii (uvedená učebnice udává pro dostatečně tlustou vzduchovou dutinu, jejíž jedna strana má emitanci typickou pro hliník, $R = 0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$) a léta je za zimních nocí používal, podobně i někteří mí příbuzní.

Nový je též popis metod, jak pomocí infrateploměrů a termokamer dojít k dobrým odhadům velikostí tepelných toků užitím správných přepočtů pro danou oblast Planckovy křivky (a jednoduchý software k tomu na adrese [38]) a užitím speciálních technických pomůcek. Pomůckami jsou především referenční plošky z téhož materiálu, jakým je tvořen povrch zkoumaných částí budovy, avšak zezadu dobře tepelně izolované, takže jimi neprotéká významný tepelný tok. Další pomůckou je elektricky vyhřívaná ploška, u níž lze hustotu tepelného toku jí protékající snadno regulovat a měřit, pouze měřením dodávaného elektrického příkonu. Poslední pomůckou je vypuklé zrcadlo, umožňující pořídit snímek téměř celé místnosti současně. Tato pomůcka je vhodná i pro běžnou, jen kvalitativní termografickou diagnostiku budov.

Disertační práce sama obsahuje ještě tři myšlenky, které nebyly obsaženy v předchozích pracích. Jde o vnější clonění nejlépe izolujících střešních oken proti ojnění či i pro odhrovnání sněhu (zasklení tepelně hůře izolující takový problém neměla...), viz str. 26, užití foliových rolet na vnitřní straně pasivních trojitých oken (str. 36 a doporučení umístit do vzduchových dutin plastových okenních rámců dělicí přepážky z tenkého hliníkového plechu (dole na str. 34).

6.2 Doporučení pro budoucnost

Budovy jsou doposud většinou chápány jako zařízení nesložitá, ne moc konstrukčně odlišná od těch, které si lidé staví už po tisíciletí. Přitom různá technika, která se v nich užívá, je čím dál složitější, vybavená elektronikou a někdy i automaticky pohyblivými částmi poháněnými pomocí elektrických motorků. Mnohem automatictější se staly i automobily. K nim, ale i ke mnohem levnějším „spotřebičům“ se přidávají rozsáhlé návody k použití (ostatně to vyžaduje i zákon). K budovám, které jsou řádově nákladnější, ale nic takového k dispozici nebývá. Přitom právě na kvalitě a důmyslném užívání budov záleží do značné míry kvalita našeho života.auta a drobnější předměty se často obměňují, zahazují, skoro by se řeklo, že je zbytečné na tu chvíli, co nám slouží, snažit se je naučit dobře používat. Budovy nám slouží desítky let, a více generacím i po staletí. Prostředky, úsilí a um jim věnované jsou jistě oprávněnější a rozumnější než u předmětů efemérní povahy.

I v budovách se dnes vyskytují důmyslné technologie. Bývá to u systémů vytápění a chlazení, kdy „tepelně děravá“ budova, v zimě bez vytápění rychle chladnoucí, má být udržována příjemná i při proměnném počtu lidí uvnitř, proměnném oslunění a využití. Tam se motory, automatizačními prvky, servomotory, termostatickými ventily atd. nešetří. Přitom se tím kompenzují nevalné tepelné vlastnosti budovy jen nedokonale. Nadto jde o techniku nevelké životnosti.

Už první realizované pasivní domy ukázaly, že tuto tzv. tepelnou techniku lze v budovách velmi redukovat. Adjektivum *pasivní* zde znamená, že běžný aktivní topný systém s čerpadly a regulací u nich není vůbec potřeba. V zimě stačí ev. v jednom místě dle potřeby občas přihřívát čerstvý pasivně¹ předeřhátý vzduch, který domem tak jako tak v zimě proudí. Pod dobrým trojitým oknem v nich není potřeba žádný „radiátor“ či jak se moderněji říká, konvektor (vlastně je to „radiokonvektor“, ohřívá nás zářením i konvekcí...).

Hojné používání soustav foliových pokovených rolet by mohlo vlastnosti starých, nových i nově rekonstruovaných domů výrazně zlepšit. Umožnit užívání větších prosklených ploch bez jakékoliv ztráty komfortu, naopak s jeho ziskem. A také další snížení potřeby umělého vytápění. K rozmachu takových aktivních prvků v budovách je ale potřeba přivést na trh lehké, levné, elektricky poháněné a počítačové řízené rolety. Takové, které bude možné přidat do starých oken nebo k nim, do nových oken se vzduchovou komorou, vložit do nově lepených skleněných souvrství. Těžké rolety jsou nutně dosti drahé, u lehkých k tomu není žádný důvod. V počítačích se komponenty poháněné malými, trvanlivými elektromotorky užívají běžně a stojí čím dál méně. Už dnes nemůže být technicky složité docílit toho, aby se dům večer „ukládal ke spánku“ a ráno opět „budil“. Aby se zaclonil, pokud by se jinak slunečním zářením pronikajícím okny přehřál. Ostatně se to tak již v nejlepších kancelářských budovách

¹Předeřev se děje protiproudým předavačem tepla, eventuálně předtím i z zemním kolektorem. Mechanické větrání (viz např. [19]) je v pasivních domech pro komfort, zkušenosti uživatelů s ním jsou velmi pozitivní, viz např. [4, 7]. Zvláště komfortní jsou pasivní domy za letních veder, kdy do nich vedro zvenčí neproniká ani větráním, a pokud mají zemní tepelný kolektor, tak se dokonce větráním chladí – při takovém provozu se protiproudý předavač tepla obchází.

děje (viz např. www.energybase.at), jen se k tomu používají vnější žaluzie, což je řešení dražší.

K tomu patří i další, složitější věci, jako okna a dveře, která se za horkých letních dní na noc otevírají dokořán a ráno zase zavírají, jak venku začne být tepleji než uvnitř. Masivní, v noci pasivně vychlazená budova s výborně izolujícími zdmi a s automaticky cloněnými okny nepotřebuje žádné umělé elektrické chlazení. Takové, jaké se dnes montuje po tisících do špatně izolujících budov a působí letní hroucení rozvodných sítí.

Na boomu elektrického chlazení budov se velmi podílí i moderní užití skla v architektuře. Sklo je výborná věc, jen musí být doplněno clonami, které se opravdu užívají. To věděli lidé odedávna a pořizovali si venkovní okenice nebo těžké interiérové závěsy. Dnešní technologie nabízejí řešení jiná, mnohem účinnější, nenáročná na obsluhu. Znamenají samozřejmě velkou změnu vzhledu budov, jak ve dne, tak i v noci, jak zvenčí, tak i zevnitř. U automobilů se změnám nikdo nebrání, často ne ani u nábytku apod. U budov naproti tomu často vítězí názor, že mají vypadat jako před sto lety. Ale jejich funkce není ta, aby se dobře vyjímaly na pohlednici. Mají nám umožňovat dobrý život bez závislosti na fosilních palivech. Jiná cesta k tomu, než co nejvíce využít slunce, nejspíš² neexistuje.

Doufejme, že se z „kosmicky“ vypadajících budov stane nová, účelná móda. Že deset mikrometrů plastu s nanometry hliníku poslouží jako „nové krajkové záclony“ (viz více [40]). Je pravděpodobné, že by na interiérové straně mohly zahrnovat i barevné vzory, aniž by se tím významně zhoršila jejich tepelné funkce. Těším se, že se takové měnlivé architektury, maximálně účinně zacházející se světlem a teplem, a nakonec snad i „nefosilních“ měst a vesnic dožijí.

Rozvoj užívání elektrických roletových systémů je šancí pro záchranu miliónů krásných starých dvojítkých oken. Dnes se při opravách budov většinou vybourají a nahradí okny jednoduchými, jejichž dvojskla sice izolují lépe než dvě skla starého okna, ale to už většinou neplatí o rámech a o tepelném mostu v místě navázání okna na okolní zeď. Alternativní oprava, kdy se nahradí jednoduchá skla dvojskly, je mnohem méně běžná.³ Široká vzduchová dutina uvnitř dvojitého okna je ale ideální pro umístění systému alespoň tří rolet s dostatečnými odstupy. Podmínkou pro jejich aplikaci je jen velmi dobré utěsnění vnitřních křídel oken (jejich netěsnost bývá často hlavním důvodem pro náhradu dvojitého okna jednoduchým). To je možné téměř vždy, rychlou aplikací neprodyšných pěnových samolepicích těsnění nebo časově náročnějším vyfrézováním drážek a instalací profilových těsnění ze silikonové gumy.

²Jako fyzik sledující desítky let vývoj v oboru zdrojů tepla a elektřiny odhaduji, že se komerčně použitelné a trvale udržitelné jaderné zdroje vyvinout nepodaří. Výjimkou by se mohly stát štěpné reaktory tzv. čtvrté generace, pokud se ani při řádovém zvýšení účinnosti využívání energie nepodaří v hustě obydlených oblastech vystačit s přírodními toky energie a pokud takové reaktory někdo vyvíjet začne.

³Komplikací, ač vždy řešitelnou, bývá to, že dvojsklo je mnohem tlustší než původní jednoduché sklo. Naději pro renovaci starých oken je užívání vakuových dvojskel s tloušťkou jen 6 mm, mnohem lépe izolujících, viz [47, 60, 41]; v té nejlepší kvalitě by se na trhu měly objevit už v roce 2010. Jejich užití ve dvojítkých oknech je kromě toho ideální i pro izolaci zvukovou.

Předložená disertace řadu témat jen otevírá. Nejde jen o základní námět, přivést na trh systémy elektricky poháněných levných pokovených foliových rolet, které jsou např. i podmínkou nejen splnění pasivního limitu pro střešní okna, ale vlastně i pro to, aby v létě neznamenal ztrátu komfortu. Jde i o praktické rozšíření termografie tím způsobem, že se publikují snímky s barevně kódovanými jasovými teplotami (doplněné šedým zobrazením), které umožní snadné kvantitativní vyhodnocení scén i těm, kteří nemají či neumí ovládat proprietární software výrobců kamer. K tomu budou mít k dispozici jednoduché výpočetní nástroje. Sám jsem takových dat pořídil řadu, na vyhodnocení dosud čekají. Pro přesnější vyhodnocování by se hodily tabulky skutečných pásmových směrových emitancí různých povrchů, zjištěné metodami, které jsem zde popsal – to je téma např. pro bakalářské práce. Ve stavební praxi by mělo velmi pomoci snímkování prostřednictvím vypuklého zrcadla, které jsem zavedl. Rád zájemcům o takové činnosti pomohu dalšími radami, které se už do této disertace nedostaly.

Kapitola 7

Glosář

Část vysvětlení je zde převzata z publikace [34].

ϵ , **Emisivita** je vlastnost materiálu, měřená jako emitance vzorku, který je dostatečně tlustý, aby byl pro dané záření kompletně neprůchodný, a má opticky hladký povrch [62]. To je i případ tabulového skla, u nějž lze pak pojmy emisivita a emitance zaměňovat.

e , **emitance** je poměr zářivého toku emitovaného z plochy vzorku k toku, který by vydávala stejně velká plocha černého zářiče téže teploty [62]. Jde tedy o vlastnost tělesa.

Jak plyne z definice emitance, má jít o celkový emitovaný tok, tj. o integrál toků z jednotlivých elementů povrchu vzorku vyzářených do poloprostorů vně daných elementů. Pro nekonvexní vzorek je nutno proložit jeho povrch konvexní plochou. Nicméně, taková korektní interpretace (pak lze pro upřesnění mluvit o celkové či bolometrické poloprostorové emitanci, stručně snad úhrnné emitanci) bývá často nahrazována udáváním poměrů září v nějakém směru, často kolmém k povrchu vzorku (tzv. normálového), případně i integrálů spektrálních toků přes nějaký spektrální filtr. Právě tuto veličinu, totiž integrál spektrální záře přes nějaký (většinou nepublikovaný) spektrální filtr totiž registrují infrateploměry a termokamery. Pro vzorky s hodně hrubým povrchem (s nerovnostmi výrazně většími, než je vlnová délka záření) může být normálová bolometrická emitance dosti podobná hodnotě (úhrnné) emitance, pro vzorky s povrchem opticky hladkým to tak obecně není – *směrová emitance* v normálovém směru se liší od emitancí ve směrech od normály velmi vzdálených. To je i případ povrchu skleněných tabulí, fólií atd. U těch platí, že i v dlouhovlnném infračerveném oboru jsou lesklejší (odrazivější, s nižší směrovou emisivitou), pozorujeme-li je hodně zešikma, podobně jako je tomu ve viditelném oboru pro sklo, vodní hladinu atd.

Podíl celkové emisivity a normálové emisivity lze ale přibližně vyjádřit vztahy 5.7 a 5.8 (str. 55). Pro tabulové sklo udává [50] hodnotu e_n jako 0,893 a e jako 0,839. Novější práce [46] udává $e_n = 0,900$ a $e/e_n = 0,936$, tj. $e = 0,84$. Příklad spolehlivého měření emisivity viz [58].

g , podíl prostupu slunečního tepla – bezrozměrná veličina označující, jaký podíl slunečního tepla projde do interiéru z veškerého slunečního záření, které dopadne na plochu skla. Veličina je závislá zejména na podílu železa obsaženého ve skle, dále na počtu a tloušťce skel, na vrstvách nízké emisivity a jejich umístění v souvrství.

λ [W/(m·K)], součinitel tepelné vodivosti – charakteristika materiálu – tepelný tok jednotkovou plochou materiálu o tloušťce jeden metr při jednotkovém rozdílu teplot na jejich opačných stranách. Čím je nižší, tím jsou tepelně izolační vlastnosti materiálu lepší.

U [W/(m²K)], součinitel prostupu tepla (dříve označovaný k) – charakteristika konstrukce – tepelný tok jednotkovou plochou daného souvrství při jednotkovém rozdílu teplot na jeho opačných stranách. Nižší součinitel znamená lépe izolující souvrství. V případě oken se veličina uvádí s indexy **g** , **f** a **w** – míní se tím charakteristika zasklení (daleko od jeho okrajů, g jako glass), rámu (umístěných v hypotetickém tepelně nevodivém okolí, f jako frame) a konečně celého okna (w jako window) tak, jak alternuje okolní ”obyčejnou” stěnu – hodnota U_w pak závisí na tom, jak velké je zasklení (u menšího bude vyšší vinou tepelného mostu na okraji skleněného souvrství i geometrického tepelného mostu kolem rámu okna) a jak navazuje na okolní tepelnou izolaci. Velmi pomůže, když ta přesahuje alespoň přes většinu nepohyblivé části rámu (v zásadě může těsněním přecházet až na samotné zasklení).

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + L_g \psi_g + L_z \psi_z}{A_g + A_f} \quad (7.1)$$

kde A_g je obsah (velikost plochy) viditelné části zasklení, A_f je obsah části okenního otvoru připadající na rám, L_g je délka viditelného obvodu zasklení, ψ_g je lineární činitel prostupu tepla styku rám/zasklení (zahrnující vliv distančního rámečku u dvojskel a trojskel), L_z je délka styku rámu s okolní zdí, ψ_z je lineární činitel prostupu tepla styku rám/zed' (dle [14]).

Označení „součinitel“ nenaznačuje, že se tato veličina vztahuje k jednotkovému obsahu rozhraní. Alternativní označení *měrná tepelná prostupnost* to svým prvním adjektivem činí a slovem prostupnost pak naznačuje, že jde o tok tepla dělený rozdílem teplot.

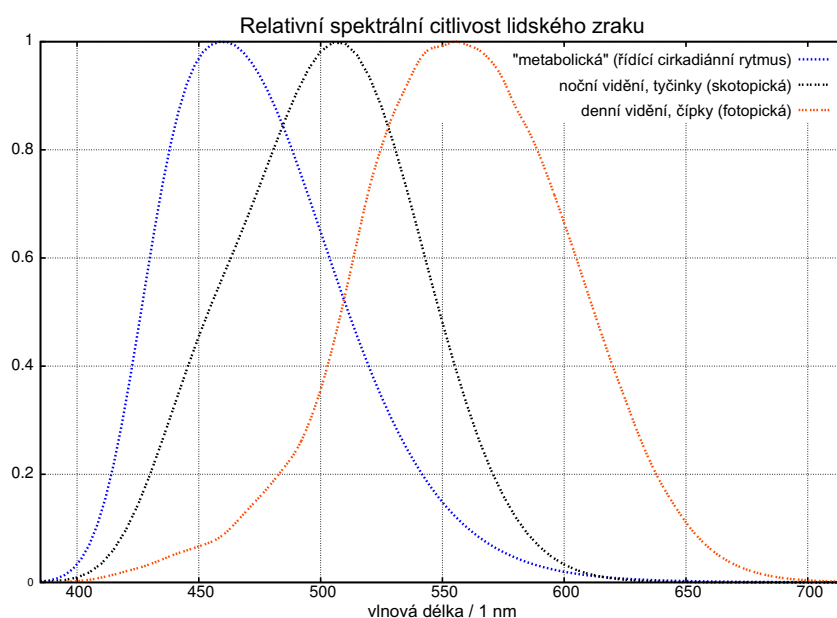
u , číselná hodnota součinitele prostupu tepla = $U / (1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}))$. Je to tedy hodnota veličiny U vyjádřené v základních jednotkách SI. Její používání je vhodné tehdy, když by opakované uvádění jednotek činilo text (mluvený či psaný) hůře srozumitelným. V praktické technické komunikaci se skutečně jednotky vynechávají. To je v pořádku jen tehdy, pokud jde o pouhé číslo. Takové lze zavést obecně ke každé veličině, pokud se vydělí odpovídající jednotkou.

Černé těleso je v praxi jakýkoliv malý otvor do velké dutiny. Pokud má povrch uvnitř oné dutiny celý jedinou teplotu, pak je to i černá teplota onoho malého otvoru, černého tělesa. Nevelký únik záření z dutiny oním otvorem vede k tomu, že záření je v termodynamické rovnováze s povrchem dutiny. Užívá se též delší název, *absolutně černé těleso* –

tím lze naznačit, že nejde jen o obor viditelného světla, ale o celý rozsah vlnových délek elektromagnetického záření

Černá teplota je teplota, jakou by mělo černé těleso, které by vydávalo tutéž zář, jako do místa pozorování přichází se sledované scény. Zář je přitom veličina vyjadřovaná ve watttech na metr čtvereční a steradián.

Jasová teplota je teplota, jakou by mělo černé těleso, jehož záření by *po průchodu nějakým spektrálním filtrem* poskytovalo tutéž zář, jaká byla skutečně změřena. Název jasová teplota je ilustrativní, vzhledem k tomu, že jas, jako veličina odpovídající spektrální citlivosti lidského zraku ve dne (čili při hojnosti světla), se též počítá jako integrál spektrální záře a „filtru“, čili spektrální citlivosti zraku. Zrakem tak můžeme porovnávat jasové teploty v oboru vlnových délek kolem půl mikrometru.



Obrázek 7.1: Spektrální citlivosti lidského zraku

Dlouhovlnné záření je v této disertaci označení elektromagnetického záření s vlnovými délkami většími než $3 \mu\text{m}$. Tepelný význam má v oboru pozemských teplot jen do vlnových délek kratších než stovky mikrometrů. Na interval $3 \mu\text{m} - 200 \mu\text{m}$ připadá více než 99 % toku energie vyzařovaného předměty s teplotami pod 150°C .

je v této disertaci označení elektromagnetického záření s vlnovými délkami menšími než $3 \mu\text{m}$. V nich dominuje záření sluneční, přímé či rozptýlené, ev. záření umělých zdrojů světla.

Lineární tepelné mosty Příkladem lineárního tepelného mostu je navázání rámu okna na okolní zeď nebo vliv distančního rámečku na okraji dvojskla, viz výše vzorec pro U_w .

Veličina, která jej popisuje se označuje písmenem ψ a vztahuje se k délce místo ploše, má tedy jednotku $W/(m \cdot K)$.

Lineární tepelné mosty (či tepelné vazby) mohou být i záporné – např. okno (tak, jak je dodáváno) může být k izolační vrstvě na okolní zdi napojeno tak, že ona vrstva částí své tloušťky pokračuje i přes okenní rám. Únik tepla takto vsazeným oknem je pak menší než oknem, jehož celá vnější plocha vč. rámu je vystavená vnějšmu prostředí. U toho totiž nejen uniká více tepla nekrytým rámem, ale pokud je tepelně izolační vrstva, na níž rám navazuje, výrazně tlustší než samotný rám, také uniká teplo zkratkou („geometrickým tepelným mostem“) kolem rámu, cestou kratší než je tloušťka okolní izolační vrstvy a jen o málo delší, než je tloušťka rámu.

„Tepelné záření“ – sousloví, které má smysl jen jako označení pro mechanismus vzniku daného záření: je to záření vydávané prostředím o dané teplotě, tím silnější, čím je ona teplota vyšší. Jako *netepelné* tak můžeme v případě potřeby označit záření výbojek (ne, že by nebyly uvnitř horké, ale většina světla pochází z částic pohybujících se ve výboji usměrněně), zářivek (totéž, navíc s využitím přeměny ultrafialového záření na světlo na povlaku trubice), svítících diod, světlušek. Smysl nemá pro vyjádření svých tepelných účinků: každé záření totiž předmětům, na které dopadá nebo jimiž prochází, dodává teplo. Zda je také vidět, zda disociuje molekuly, ionizuje nebo přenáší televizní či telefonní signál, je přitom jedno. Pokud je v daném prostředí pohlcováno, vždy je ohřívá.

Literatura

- [1] Arasteh, D.; Goudey, H.; Kohler, C.: Highly Insulating Glazing Systems Using Non-Structural Center Glazing Layers. 2008, shrnutí viz http://windows.lbl.gov/adv_Sys/hi_R_insert/HiRSummaryPaper.pdf. URL http://windows.lbl.gov/adv_Sys/hi_R_insert 32, 36, 49
- [2] Arpino, F.; Buonanno, G.; Giovinco, G.: Thermal conductance measurement of windows: An innovative radiative method. *Experimental Thermal and Fluid Science*, ročník 32, č. 8, 2008: s. 1731 – 1739, ISSN 0894-1777, doi:10.1016/j.expthermflusci.2008.06.010. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V34-4SWWT3R-1/2/16a3bacf420d0fb1a126e06ee8801deb> 38
- [3] Berger, X.; Bathiebo, J.: Directional spectral emissivities of clear skies. *Renewable Energy*, ročník 28, č. 12, 2003: s. 1925 – 1933, ISSN 0960-1481, doi:10.1016/S0960-1481(03)00059-4. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V4S-488VWS2-1/2/c511dbe4c81df0bb3151589c96f36ac4> 26
- [4] Berndgen-Kaiser, A.: Hodnocení 150 pasivních domů v Severním Porýní - Westfalsku. In *Pasivní domy 2007*, Brno: Centrum pasivního domu, 2007, ISBN 978-80-254-0126-2, s. 50–55. 67
- [5] Bier, W.: *Untersuchung von Gebäuden mit sehr niedrigem Heizwärmebedarf - validierte Modellierung zur thermischen Simulation*. Diplomová práce, Universität Siegen, Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie, Siegen, Deutschland, Dezember 2002. URL http://nesa1.uni-siegen.de/download/Diplomarbeit_Bier.PDF 15
- [6] Carli: TARCOG: Mathematical Models for Calculation of Thermal Performance of Glazing Systems With or Without Shading Devices. Technická zpráva, Carli Inc. Technical Report, 2006, draft, October 17. URL <http://windows.lbl.gov/software/window/6/tarcog%20mathematical%20model.pdf> 18, 21, 23, 24, 26, 42, 83
- [7] Chybík, J.: Průzkum subjektivního hodnocení mikroklimatu pasivního domu. In *Pasivní domy 2008*, Brno: Centrum pasivního domu, 2008, ISBN 978-80-254-2848-1, s.

- 44–49.
URL <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=5398> 67
- [8] Coffin, D.: Decoding raw digital photos. 2008.
URL <http://www.cybercom.net/~dcoffin/dcraw> 61
- [9] Colbert, F.: Understanding Proprietary Infrared Image Files.
<http://www.irinfo.org/Articles/articles.html>, 2006, subtitle: Looking Under the Hood: Converting Proprietary Image File Formats Created within IR Cameras for Improved Archival Use.
URL http://www.irinfo.org/Articles/article_4_2006_colbert.pdf 61
- [10] Dupuis, J. R.; Mansur, D.; Vaillancourt, R.; aj.: Two-band infrared thermographer for standoff temperature measurements. In *Enabling Technologies and Design of Nonlethal Weapons*, ročník 6219, editace G. T. Shwaery; J. G. Blitch; C. Land, SPIE, 2006, str. 62190E, doi:10.1117/12.666030.
URL http://www.optra.com/images/TP-Two_Band_Infrared_Thermographer.pdf 43, 83
- [11] Elsherbiny, S. M.: Free convection in inclined air layers heated from above. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, ročník 39, č. 18, 1996: s. 3925 – 3930, ISSN 0017-9310, doi:10.1016/0017-9310(96)00047-6.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V3H-3WCSP8Y-16/2/f81b70b6ca93bb125a17ed77e5f79ed0> 25, 26, 83
- [12] ElSherbiny, S. M.; Raithby, G. D.; Hollands, K. G. T.: Heat Transfer by Natural Convection across Vertical and Incline Air Layers. *Transactions of the ASME*, ročník 104, 1982: s. 96–102, ISSN 0022-1481. 25
- [13] Feist, W.: Fachinformation zum Wärmebrückenfreien Konstruieren. 2006.
URL http://passivhaustagung.de/Passivhaus_D/waermebrueckenfrei_2006.htm 16
- [14] Feist, W.: Fenster - Wärmedurchgang U_w und Verglasungs - Gesamtenergiedurchlass g. 2006.
URL http://passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Fenster_U_Wert.htm 71
- [15] Feist, W.: Fenster und Behaglichkeit: der qualitative Unterschied. 2006.
URL http://passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Fenster_Behaglichkeit_Vergleich.htm 35
- [16] Feist, W.: Übersicht Passivhaus. 2006.
URL http://passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Passivhaus_Verzeichnis.html 10
- [17] Glas-fandel: Iso-Roll, das elektrisch betriebene Rollo im Isolierglas. 2003, podrobně viz http://www.glas-fandel.de/medien/IR_Produktbeschreibung.pdf.

- URL http://www.glas-fandel.de/index.php?bereich=produkte&content_id=38&sub0=1&sub1=6 50
- [18] Glastec: Iso-Roll. 2004.
URL <http://www.glastec.com/en/iso-roll.php> 50
- [19] Greml, A.; Kapferer, R.; Leitzinger, W.; aj.: Komfortlüftungen. 2008.
URL http://www.energie-tirol.at/Downloads/Komfortlueftungen%20Broschuere%2011_2008.pdf 67
- [20] Gustavsen, A.; Uvslokk, S.; Jelle, B. P.: Numerical and Experimental Studies of the Effect of Various Glazing Spacers on the Window U-value and the Glazing Temperature. 2005.
URL http://www.byv.kth.se/avd/byte/reykjavik/pdf/art_153.pdf 22, 25, 83
- [21] Halahyja, M.; Beřko, B.; Bloudek, K.; aj.: *Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie*. Bratislava a Praha: Alfa a SNTL, 1985. 26, 66, 83
- [22] Hansen, J.; Sato, M.; Kharecha, P.; aj.: Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? *Open Atmos. Sci. J.*, ročník 2, 2008: s. 217–231, doi:10.2174/1874282300802010217.
URL http://pubs.giss.nasa.gov/abstracts/2008/Hansen_etal.html 11
- [23] Heat Mirror by Southwall Technologies. 2008, česky viz <http://www.izolacniskla.cz>.
URL <http://www.southwall.com> 32
- [24] Hollan, J.: Co je obloha a co zas hvězdné nebe? 1993.
URL http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/a_papers/oblnebe/ 26
- [25] Hollan, J.: Přehřívání. 1999.
URL http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/e_papers/stavby/okna/prehrivani.html 13
- [26] Hollan, J.: Teplo skrze okna (pracovní poznámky). 2000.
URL http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/e_papers/stavby/okna/pozn_o.pdf 28
- [27] Hollan, J.: Jak propouštějí a odrážejí různé materiály různé záření. *Instantní astronomické noviny*, , č. 484, 2003.
URL http://www.ian.cz/detart_fr.php?id=958&nadpis=Jak 56
- [28] Hollan, J.: Termografické zjiřřování tepelných vlastností budov in situ (zjiřřování emisivit a tepelných toků pomocí termokamery). In *Workshop Nedestruktivní testování v technických oborech*, Brno: Akad. nakl. CERM, s.r.o., 2004, ISBN 80-7204-371-4, s. 248–253, promítané snímky viz http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/term_tep.pdf.
URL http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/term_tepT.pdf 41, 53

- [29] Hollan, J.: Nejlepší okna se získají užitím rolet s nízkou emisivitou. 2005, poster a exponát na konferenci Pasivní domy.
URL http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/ph_brno/ 50
- [30] Hollan, J.: Termografické ověřování tepelně izolačních vlastností oken se speciálními roletami. In *Workshop Nedestruktivní testování v technických oborech*, Brno: Akad. nakl. CERM, s.r.o., 2005, ISBN 80-7204-420-6, str. 27.
URL <http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/term05.html> 36
- [31] Hollan, J.: PV light measurement at twilight and night, Brno Observatory. 2006.
URL <http://amper.ped.muni.cz/weather/> 45
- [32] Hollan, J.: Výzkum nočního prostředí Krkonoš. 2006, adresář s výzkumnými zprávami z let 2005 a 2006.
URL <http://amper.ped.muni.cz/noc/krnap> 61
- [33] Hollan, J.: Zásady osvětlování ve veřejných institucích. In *Zelené úřadování - vybraná témata*, Brno: STEP (<http://www.ekoporadna.cz>), 2007.
URL <http://zeleneuradovani.cz/content/File/svetlo.pdf> 12
- [34] Hollan, J. (editor): *Pasivní dům II*. Brno: ZO ČSOP Veronica, 2008, 56 s.
URL http://www.veronica.cz/dokumenty/pasivni_dum_2008.pdf 10, 70
- [35] Hollan, J.: RGB Radiometry by digital cameras. 2008, workshop paper for a DarkSky 2008 conference, <http://darksky2008.kuffner-sternwarte.at>.
URL <http://amper.ped.muni.cz/light/luminance/english/rgbr.pdf> 61
- [36] Hollan, J.: A Standard House – what’s that? Houses, standards, real life (Co je to standardní dům? Domy, normy a realita). In *Sborník semináře v rámci projektu "Energy in Minds!"*, Zlín: Zelené bydlení, o.s., 2008.
URL <http://amper.ped.muni.cz/pasiv/standardy/> 10
- [37] Hollan, J.: sálání – vedení – proudění. 2008, dopis do konference Ekodům.
URL <http://mailman.fsv.cvut.cz/pipermail/ekodum/2008/002150.html> 19, 23
- [38] Hollan, J.: adresář s pomůckami pro termografii a termografickými snímky. 2009.
URL <http://amper.ped.muni.cz/LW-infrared> 55, 58, 60, 61, 62, 63, 66
- [39] Hollan, J.: adresář s českými předklady zásadních textů o změně klimatu. 2009.
URL <http://amper.ped.muni.cz/gw> 11
- [40] Hollan, J.: Nové paradigma osvětlení v budovách, nová řešení. In *Sborník anotací konference JUNIORSTAV 2009*, Brno: VUT v Brně, FAST, 2009, ISBN 978-80-214-3810-1, str. 75.
URL http://amper.ped.muni.cz/light/texty_pdf/paradigma.pdf 12, 68
- [41] Hollan, J.; Šťastník, S.: Tepelná optimalizace okenních výplní. In *Construmat 2008, Conference about structural materials*, Brno: VUT, FAST, 2008, ISBN

- 978-80-214-3660-2.
URL <http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/construmat/optimalizace.pdf>
34, 68
- [42] Internorm: Dřevohliníkové zdvojené okno EDITION 4. 2007, podrobně viz
http://www.internorm.at/cps/rde/xbcr/SID-53E1FFC5-D0211FD2/internorm_at/pr_AT-DE-A_EDITION4_vetro_design1.pdf.
URL http://www.internorm.cz/cps/rde/xchg/SID-E4D25477-F3B1F887/internorm_cz/hs.xsl/fehoal_1088.html 51
- [43] IPCC: Změna klimatu 2007: Fyzikální základy; Shrnutí pro politické představitele.
URL http://amper.ped.muni.cz/gw/ipcc_cz/Fyzik_zakl.pdf 11
- [44] Klems, J. H.: U-Values of Flat and Domed Skylights. 1999.
URL <http://btech.lbl.gov/papers/44422.pdf> 25
- [45] Liger, M.: *Uncooled Carbon Microbolometer Imager*. Diplomová práce, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2006.
URL <http://etd.caltech.edu/etd/available/etd-09302005-174955/unrestricted/thesisweb.pdf> 39
- [46] Lohrenges, J.; Rasper, M.; Geotti-Bianchini, F.; aj.: Angular emissivity at room temperature and spectral reflectance near normal incidence of float glass, borosilicate glass and glass ceramics. *Glastechn. Ber. - Glass Sci. Techn.*, ročník 69, 1996: s. 64–74. 70
- [47] Manz, H.: On minimizing heat transport in architectural glazing. *Renewable Energy*, ročník 33, č. 1, 2008: s. 119 – 128, ISSN 0960-1481, doi:10.1016/j.renene.2007.01.007.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V4S-4N9MYHC-1/2/6a8a4ee73302db4bfa3bb5e81cd81631> 34, 68
- [48] Modest, M. F.: *Radiative Heat Transfer (Second Edition)*. Burlington: Academic Press, druhé vydání, 2003, ISBN 978-0-12-503163-9. 56, 57, 84
- [49] Müller, H.-C.: *Entwicklung und Bau einer solaren Gebäudeheizung im Altiplano/Argentinien*. Diplomová práce, Universität Karlsruhe, 1999.
URL http://www.hc-solar.de/Diplomarbeit_cm.PDF 19, 26, 43
- [50] Rubin, M.: Optical properties of soda lime silica glasses. *Solar Energy Materials*, ročník 12, č. 4, 1985: s. 275 – 288, ISSN 0165-1633, doi:10.1016/0165-1633(85)90052-8.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B7571-481F8PK-7B/2/60fc291b7d2b031aa647236abc4f328a> 70
- [51] Rubin, M.; Arasteh, D.; Hartmann, J.: A Correlation between Normal and Hemispherical Emissivity of Low-emissivity Coatings on Glass. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, ročník 14, 1987: s. 561–565.
URL <http://btech.lbl.gov/papers/23384.pdf> 55, 56, 84

- [52] Solar Collector Facts (Sonnenkollektor-Fakten). 2008.
URL <http://www.solarenergy.ch/spf.php?lang=de&fam=1&tab=1> 15, 21, 84, 86
- [53] Steuer, R.: *Studium fyzikálních vlastností materiálů vnějšího zateplení budov z hlediska snížení vlhkostní zátěže: disertační práce*. Dizertační práce, VUT v Brně, FAST, Ústav technol. stav. hmot a dílců, Brno, 2008. 56, 57, 58, 84
- [54] Themessl, A.; Weiss, W.: *Solární systémy. Návrhy a stavba svépomocí*. Praha: Grada Publishing, a.s, 2005, ISBN 80-247-589-3, 120 s., úpravy a doplnění Jan Hollan a Ekologický institut Veronica. 13
- [55] Thompson, A.; Taylor, B. N.: *Guide for the Use of the International System of Units (SI)*. Gaithersburg, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology, 2008, NIST Special Publication 811, 2008 Edition. Html version, Section 7, Rules and Style Conventions for Expressing Value of Quantities. Celá kniha viz <http://physics.nist.gov/cuu/pdf/sp811.pdf>.
URL <http://physics.nist.gov/Pubs/SP811/sec07.html> 15
- [56] Tolasz, R. (editor): *Atlas podnebí Česka*. Praha a Olomouc: Český hydrometeorologický ústav a Univerzita Palackého, 2007, ISBN 978-80-86690-26-1. 12
- [57] Vaverka, J.; Chybík, J.; Meixner, M.: *Tepelná ochrana budov*. Brno: PC-DIR spol s.r.o. – Nakladatelství, 1995, ISBN 80-85895-03-X, soubor fyzikálních veličin stavebních materiálů a výpočtů k ČSN 730540. 30
- [58] Vecchi, S. C.: An Experimental Method to Measure Hemispherical Emissivity and Solar Absorptivity of Space Flight Materials. 2007.
URL http://spacegrant.colorado.edu/symposium_archive/2007/papers/S07_07_Measuring_Hemispherical_Emissivity.pdf 70
- [59] Vicente, G. S.; Bayón, R.; Germán, N.; aj.: Long-term durability of sol-gel porous coatings for solar glass covers. *Thin Solid Films*, ročník In Press, Corrected Proof, 2008: s. –, ISSN 0040-6090, doi:10.1016/j.tsf.2008.11.079.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TWO-4TYR04M-C/2/4400a6af3e759779dc2a395829453a9a> 32
- [60] Production Methods for Vacuum-Insulating-Glass. 2008, výzkumný projekt německého Spolkového ministerstva pro hospodářství a technologie.
URL <http://www.vig-info.de> 34, 68
- [61] Vacuum Insulation Panels. 2008.
URL <http://www.vip-bau.de> 34
- [62] Weast, R. C. (editor): *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton: CRC Press, 1979, F-104 s. 70
- [63] Werner, J.; Chybík, J.: *Pozemní stavitelství*. Brno: Vutium, 1999, ISBN 80-214-1333-6, Studijní texty pro 4. semestr studia architektury. 28

- [64] Wikipedia: Bolometer – Wikipedia, the free encyclopedia. 2008.
URL <http://en.wikipedia.org/wiki/Bolometer> 39
- [65] Wikipedia: Infrared – Wikipedia, the free encyclopedia. 2009.
URL <http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared> 40
- [66] LBNL Windows & Daylighting Software – WINDOW. 2008.
URL <http://windows.lbl.gov/software/window/window.html> 35, 38
- [67] LBNL Window & Daylighting Software – WINDOW 6 Research Version. 2008.
URL <http://windows.lbl.gov/software/window/6> 33, 35
- [68] Wright, J. L.: A Correlation to Quantify Convective Heat Transfer Between Vertical Window Glazings. *ASHRAE Transactions*, ročník 102, č. 1, 1996: s. 940–946. 23, 25, 26, 83
- [69] Wright, J. L.; Jin, H.; Hollands, K.; aj.: Flow visualization of natural convection in a tall, air-filled vertical cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, ročník 49, č. 5-6, 2006: s. 889 – 904, ISSN 0017-9310, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.06.045.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V3H-4HRDY8K-1/2/f38a44d3ceaa2a0a78fd20f143a81d8f> 23
- [70] Yang, Y.: *Natural Convective Flow and Heat Transfer in Vertical and Inclined Glazing Cavities*. Diplomová práce, Graduate School of the University of Massachusetts, Amherst, September 2003.
URL <http://www.ceere.org/beep/docs/FY2003/New-Yunhua-thesis-1.pdf> 25, 26, 83
- [71] Šťastník, S.; Steuer, R.; Hollan, J.: Možnosti určení emisivity materiálů pomocí infračervené termografie. In *Workshop Nedestruktivní testování v technických oborech*, Brno: VUT v Brně, 2006, ISBN 80-7204-487-7, s. 181–186.
URL <http://amper.ped.muni.cz/LW-infrared/omitky06.pdf> 53
- [72] Šťastník, S.; Steuer, R.; Kalousek, M.: Posouzení nátěrové hmoty ThermoShield z hlediska projevu na tepelnou bilanci budov. 2008.
URL <http://www.reflexe.nazory.cz/download/THERMOSHIELDPOSUDEK.pdf> 58

Seznam veličin

B	měrná zářivá bilance povrchu, rozdíl měrného výkonu vyzařovaného a pohlcovaného	W/m^2
d	tloušťka vrstvy	m
e	emitance	
E	intenzita vyzařování	W/m^2
e_{LWIR}	pásmová emitance v oboru LWIR, tedy $8 \mu m$ až $14 \mu m$	W/m^2
E_{LWIR}	pásmová intenzita vyzařování v oboru LWIR, tedy $8 \mu m$ až $14 \mu m$	W/m^2
e_n	normálová emitance	
h_c	složka koeficientu přestupu tepla připadající na transport tekutinou	$W/(m^2K)$
h	součinitel tepelné přestupnosti, koeficient přestupu tepla, měrná tepelná přestupnost	$W/(m^2K)$
h_{int}	koeficient přestupu tepla do interiéru	$W/(m^2K)$
h_{out}	koeficient přestupu tepla do exteriéru	$W/(m^2K)$
h_r	složka koeficientu přestupu tepla připadající na záření	$W/(m^2K)$
λ	konduktance, měrná tepelná vodivost materiálu	$W/(m \cdot K)$
q	koeficient u kvadratického členu aproximace výpočtu pásmové emitance či skutečné teploty z jasové teploty	
R	měrný tepelný odpor	m^2K/W
σ	konstanta Stefanova-Boltzmannova zákona, $5.68 \cdot 10^{-8} W/(m^2K^4)$	
t	rozdíl teplot	K
T	teplota, absolutní teplota	K
T_i	absolutní teplota interiéru	K
T_{lum}	jasová teplota	K
T_{object}	teplota objektu	K
T_s	absolutní teplota povrchu	K
T_{surr}	absolutní teplota okolí	K
Θ	teplota, Celsiova teplota = $T - 273.15$ K	$^{\circ}C, K$
Θ_i	Celsiova teplota interiéru	$^{\circ}C$
Θ_s	Celsiova teplota povrchu	$^{\circ}C$
θ	číslná hodnota Celsiovy teploty, $\Theta/^{\circ}C$	
θ_{lum}	číslná hodnota Celsiovy jasové teploty, $T_{lum}/K - 273.15$	
θ_{obj}	číslná hodnota Celsiovy teploty předmětu, $T_{object}/K - 273.15$	
θ_{surr}	číslná hodnota Celsiovy teploty okolí, $T_{surr}/K - 273.15$	
U	součinitel (koeficient) tepelné prostupnosti, součinitel prostupu tepla, měrná tepelná prostupnost	$W/(m^2K)$
u	číslná hodnota součinitele tepelné prostupnosti	

Seznam obrázků

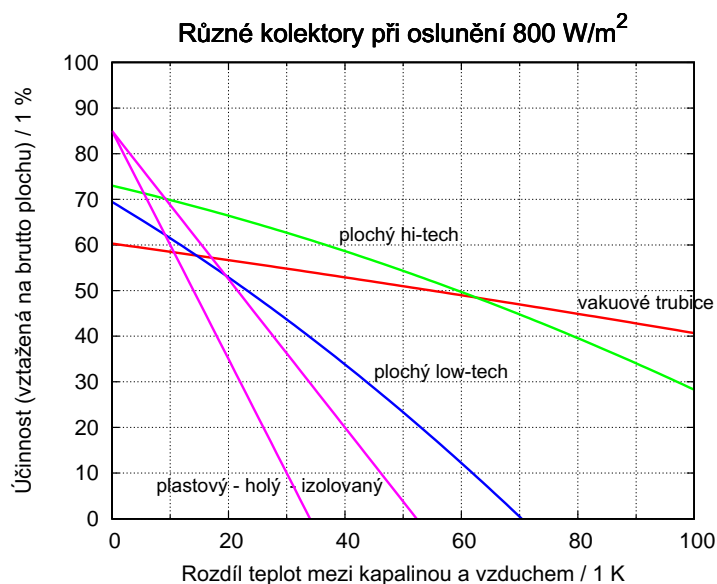
2.1	„Planckovy křivky“ v logaritmickém zobrazení. Stínováním jsou odleva vyznačeny postupně oblasti ultrafialová, viditelná, infračervená krátkovlnná a dlouhovlnná.	17
2.2	Konvekce na interiérové straně	20
2.3	Zářivé ztráty vakuových kolektorů	22
2.4	Transport tepla vzduchem v dutinách tlouštěk 1,5 cm až 3,5 cm, $t = 15$ K	24
2.5	Transport tepla vzduchem (ev. jen kondukcí), $t = 5$ K, dle [6, str. 18-20]	24
2.6	Neradiační složka přestupu tepla vzduchovými dutinami s izotermními stěnami, pro tři různé teplotní rozdíly (2,5 K, 5 K a 15 K – čím vyšší teplotní rozdíl t , tím větší přestup tepla). Stoupající křivky udávají Rayleighova čísla pro tyto tři případy (v práci se jimi jinde nezabývám, nicméně pro posuzování vlivu konvekce jsou to údaje základní). Realitou existence optimální tloušťky dutiny, např. necelých 2 cm pro $t = 15$ cm, si nejsem jist, ale přinejmenším pro případ velkých t ji na základě dosavadních poznatků určitě nelze vyloučit. Případ meziskelních dutin v oknech se kromě toho od situace zobrazené v grafu liší tím, že teplota horní a dolní části skla není stejná (viz např. [20]).	25
2.7	Neradiační složka přestupu tepla, i pro tlusté dutiny. Zdroje: Halahyja [21, str. 64], Wright: [68], ISO 10077-1: [6], ElSherbiny: [11], Yang: [70]. Nejstarší zdroj Halahyja téměř jistě přeceňuje vliv konvekce u tenkých dutin, ISO 10077-1 a Wright naopak jej přeceňují naopak u tlouštěk nad 10 cm.	26
2.8	Teplota oblohy a rozdíl oproti přízemní teplotě	27
3.1	Vyzařování Země do vesmíru v porovnání s černými tělesy (viz text str. 41)	42
3.2	Transmitance ovzduší při pozorování skrze vrstvu tloušťky 100 m. Křivkami je znázorněn možný vliv mlhy a deště. Na pravé straně je škála spektrálních září pro černé těleso teploty $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ / ($10^{-4}\text{ W}/(\text{m}^2\text{ sr } \mu\text{m})$) (převzato z [10]) (viz text str. 42)	43

3.3	Elektricky vyhříváná skleněná ploška je na obrázku vlevo. Nahoře je polepená papírem, aby posloužila i pro porovnání s nelesklými předměty, jako jsou dřevěné rámy oken. Sousední skleněná ploška je zčásti překrytá alobalem a slouží jen na ověření správné tepelné kompenzace. Napětí na odporovém vinutí pod samostatně vyhříváním sklem a proud vinutím se měří dvojicí multimetrů. (viz text str. 46)	46
4.1	Model okna s elektricky navíjenou foliovou roletou	50
5.1	Přepočítání normálové bolometrické emisivity na celkovou dle [51]. (viz text str. 55)	56
5.2	Směrové emitance pro dielektrika a kovy, obr. z [48] upravil R. Steuer [53, str. 50]. Symbolem Θ je zde vyznačen odklon od normály.	57
7.1	Spektrální citlivosti lidského zraku	72
8.1	Účinnosti kolektorů v závislosti na použité technologii. Absorbéry se selektivními vrstvami nízké emitance dle [52], kolektor s černě natřeným absorbérem dle měření zkušebny Arsenal Research ve Vídni, holé absorbéry dle teoretického odhadu. Vliv aplikace vrstvy nízké emitance je velmi nápadný. Účinnosti jsou vztaženy na brutto plochu kolektorů (tj. na místo, které zabírají na střeše nebo fasádě).	86
8.2	Měření s použitím elektricky vyhříváné referenční plošky. Nevyhřívánou plošku by bylo vhodné doplnit elementem vysoce odrazivým (hladkou fólií s aluminiovým povrchem) pro přímé určení jasové teploty okolí, které se odráží ve sklech. (viz text str. 46, 64)	87
8.3	Dvě lišty na boku starého dvojitého okna spolu se dvěma roletami z pokovené fólie sníží na noc koeficient prostupu tepla až na $U = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. (viz text str. 48)	88
8.4	Pasivní tělocvična v Heidelbergu, snímek fotoaparátem Nikon 990 s předsádkou FC E8. Vpravo jsou jasy scény / (cd/m^2) kódované logaritmickou stupnicí udanou dole. Jasy nemají korigování vinětací na okraji zorného pole. (viz text str. 61)	88
8.5	Vzhled jihovýchodního rohu budovy Centra v Hostětíně ve dne. Svislá pozinkovaná potrubí slouží pro případnou cirkulaci vzduchu mezi sálem a podkrovím, pro využití solárních zisků a chlazení podkroví. (viz text str. 62)	89
8.6	Pod jižním oknem v Centru v Hostětíně mohou posloužit jako referenční plochy opěradla židlí. Sklo je o 1,0 K až 1,5 K chladnější. Výrazný je vliv neizolačního distančního rámečku i tepelně nedokonalého napojení okna na vnější izolaci (okraj zasklení je totiž zvenčí jen málo překryt venkovní tepelnou izolací). Prostupem tepla skrze sklo i kolem skla je pak chladnější i betonová zeď kolem okna. Vlevo dole pod oknem je na zdi patrný únik tepla do podlahy (pod oknem samotným je spodní část zdi nebetonová, ale polystyrénová, čímž je podlahy tepelně dobře odděleno). Venkovní teplota byla o 20 K nižší než interiérová, teplota skla odpovídá deklarovanému $u = 0,6$. (viz text str. 62)	90

8.7	Na předchozím snímku se v okně zrcadlila vnitřní stěna budovy, nyní se v části jižního okna zrcadlí stěna vnější s dalšími okny. Je také vidět geometrický tepelný most tvořený rohem budovy. (viz text str. 62)	91
8.8	Snímání přes vypuklé zrcadlo vyžaduje, aby osoba pracující s kamerou byla na snímku zobrazena co nejméně. Na okraji zrcadla je nicméně nějaká její část vždy zachycena. Bylo by možné tomu čelit tím, že se dolní část zrcadla kolem úchytu a jeho dolní okraj polepí nebo natře, aby se tam odraz v LWIR oboru velmi snížil. To by též poskytlo informaci o teplotě zrcadla. (viz text str. 63)	92
8.9	Infrasnímek přednáškového sálu Centra v Hostětíně. (viz text str. 63)	93
8.10	Světelný snímek pořízené pak ve dne; dole je otočen tak, aby pohled nebyl zrcadlově převrácený. (viz text str. 63)	94
8.11	Okno s foliovou roletou, ještě bez postranních lišt, na něž by fólie doléhala. Obraz ve vypuklém kovovém zrcadle. (viz text str. 65)	95
8.12	Okno s foliovou roletou, ještě bez postranních lišt, na něž by fólie doléhala. Vliv proudění vzduchu kolem okrajů rolety je velmi nápadný.	96
8.13	Fóliová roleta v okně je již utěsněná postranními lištami a pružným profilem na dolním okraji. Nahoře a uprostřed snímku jsou zavěšeny referenční, zezadu tepelně izolované skleněné plošky, kterými žádný tepelný tok neprobíhá.	97
8.14	Jiné dvojité okno, které fóliovou roletu neobsahuje, má hodnotu u dvojnásobnou.	98
8.15	Dvojité okno s fóliovou roletou v detailu.	99
8.16	Termosnímek okna, zlepšeného nad hranici pro pasivní domy užitím dvojice pokovených rolet. Okno tak izoluje lépe než okolní cihlová zeď. Vzhled dané scény ve dne, kdy by roleta byla v zimě ovšem vytažená, jako na horním pravém snímku. Částečně zatažená by mohla být za letních veder jako ochrana proti slunci.	100

Kapitola 8

Příloha: barevné obrazy



Obrázek 8.1: Účinnosti kolektorů v závislosti na použité technologii. Absorbéry se selektivními vrstvami nízké emitance dle [52], kolektor s černě natřeným absorbérem dle měření zkušebny Arsenal Research ve Vídni, holé absorbéry dle teoretického odhadu. Vliv aplikace vrstvy nízké emitance je velmi nápadný. Účinnosti jsou vztaženy na brutto plochu kolektorů (tj. na místo, které zabírají na střeše nebo fasádě).

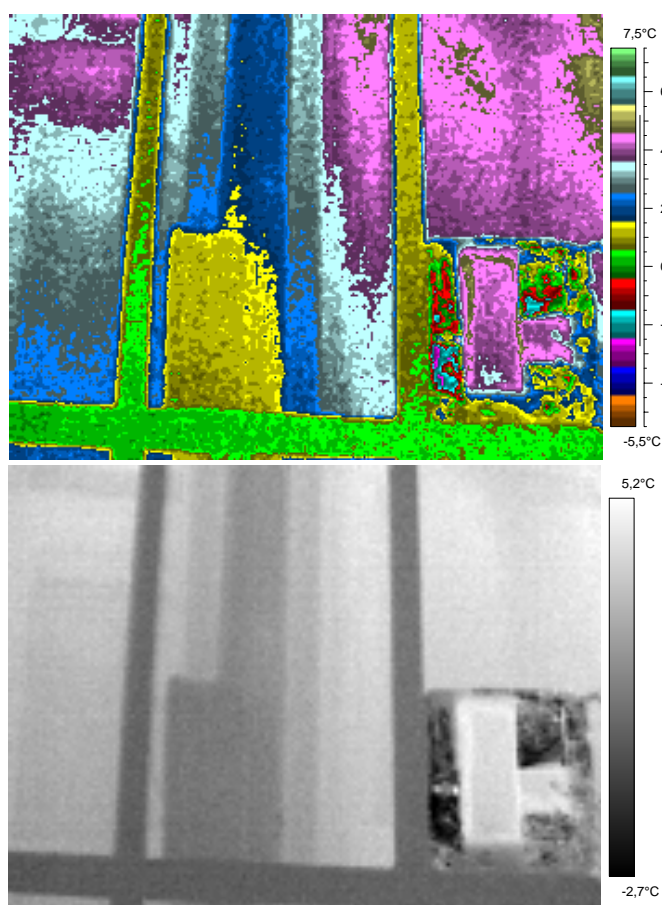
Dvojité okno kryté ocelovou mříží. Vpravo dole elektricky vyhřívaná ploška, vlevo od středu referenční izolované sklo.

2 - *

Label	Value
IR : max	5,6°C
IR : min	-3,2°C

27.2.2005

21:10:48



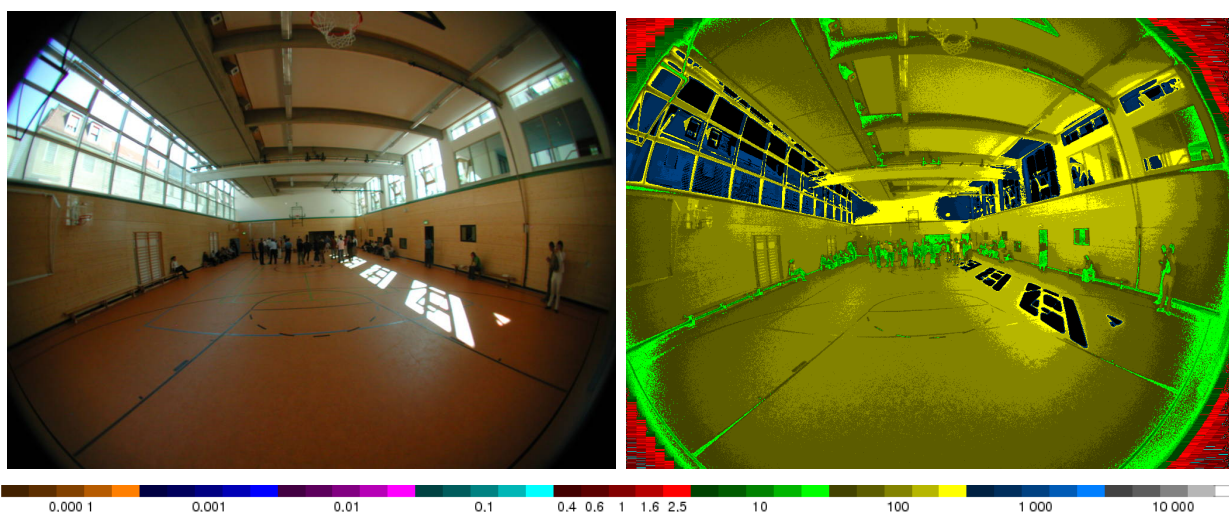
poster

2

Obrázek 8.2: Měření s použitím elektricky vyhřívané referenční plošky. Nevyhřívanou plošku by bylo vhodné doplnit elementem vysoce odrazivým (hladkou fólií s aluminium povrchem) pro přímé určení jasové teploty okolí, které se odráží ve sklech. (viz text str. 46, 64)



Obrázek 8.3: Dvě lišty na boku starého dvojitého okna spolu se dvěma roletami z pokovené fólie sníží na noc koeficient prostupu tepla až na $U = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. (viz text str. 48)



Obrázek 8.4: Pasivní tělocvična v Heidelbergu, snímek fotoaparátém Nikon 990 s předsádkou FC E8. Vpravo jsou jasy scény / (cd/m^2) kódované logaritmickou stupnicí udanou dole. Jasy nemají korigovanu vinětaci na okraji zorného pole. (viz text str. 61)



Obrázek 8.5: Vzhled jihovýchodního rohu budovy Centra v Hostětíně ve dne. Svislá pozinkovaná potrubí slouží pro případnou cirkulaci vzduchu mezi sálem a podkrovím, pro využití solárních zisků a chlazení podkroví. (viz text str. 62)

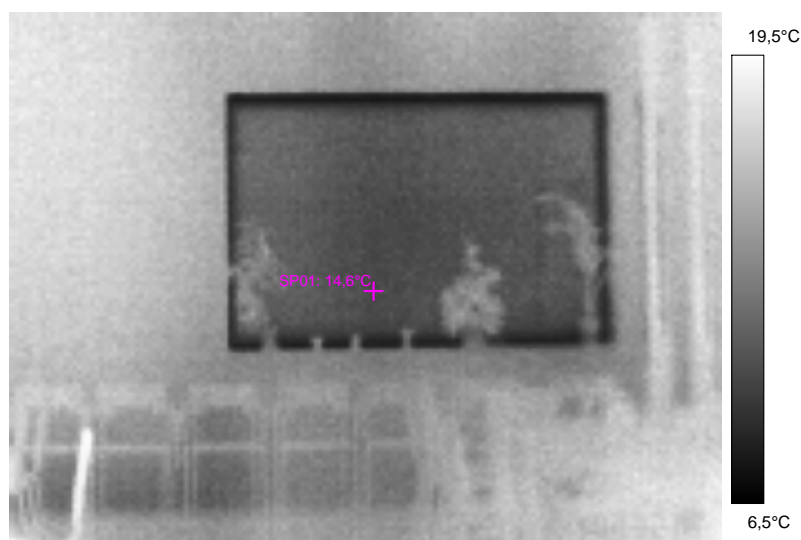
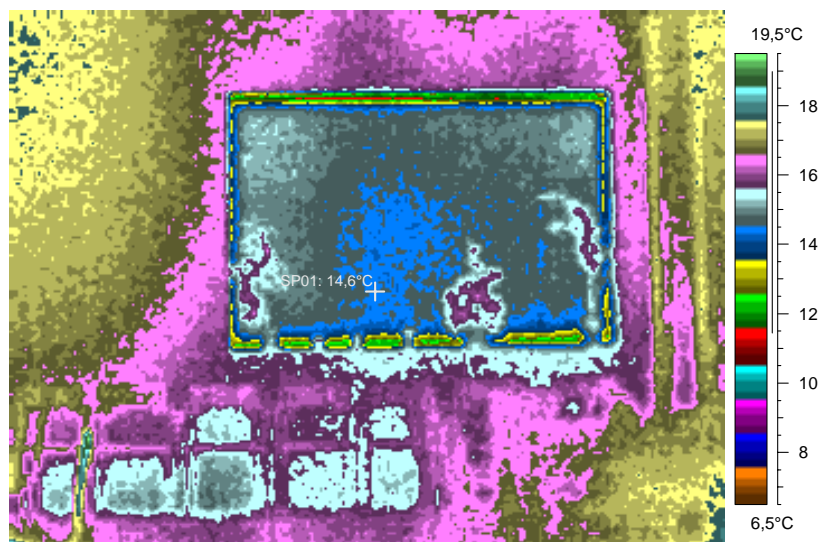
Jižní okno v sále, fixní zasklení. Je dobře patrná hůře izolující oblast uprostřed, kde jsou skla prohnuta směrem k sobě.

2 - Ir_1295.jpg

Label	Value
IR : max	20,1°C
IR : min	11,3°C
SP01	14,6°C

3.1.2008

22:48:46



2i_65

2

Obrázek 8.6: Pod jižním oknem v Centru v Hostětíně mohou posloužit jako referenční plochy opěradla židlí. Sklo je o 1,0 K až 1,5 K chladnější. Výrazný je vliv neizolačního distančního rámečku i tepelně nedokonalého napojení okna na vnější izolaci (okraj zasklení je totiž zvenčí jen málo překryt venkovní tepelnou izolací). Prostupem tepla skrze sklo i kolem skla je pak chladnější i betonová zeď kolem okna. Vlevo dole pod oknem je na zdi patrný únik tepla do podlahy (pod oknem samotným je spodní část zdi ne betonová, ale polystyrénová, čímž je podlahy tepelně dobře oddělena). Venkovní teplota byla o 20 K nižší než interiérová, teplota skla odpovídá deklarovanému $u = 0,6$. (viz text str. 62)

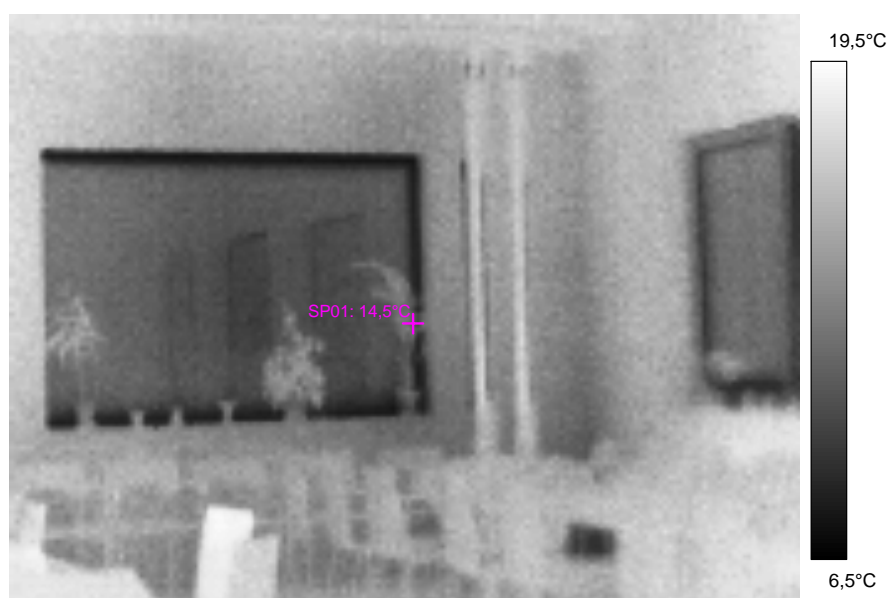
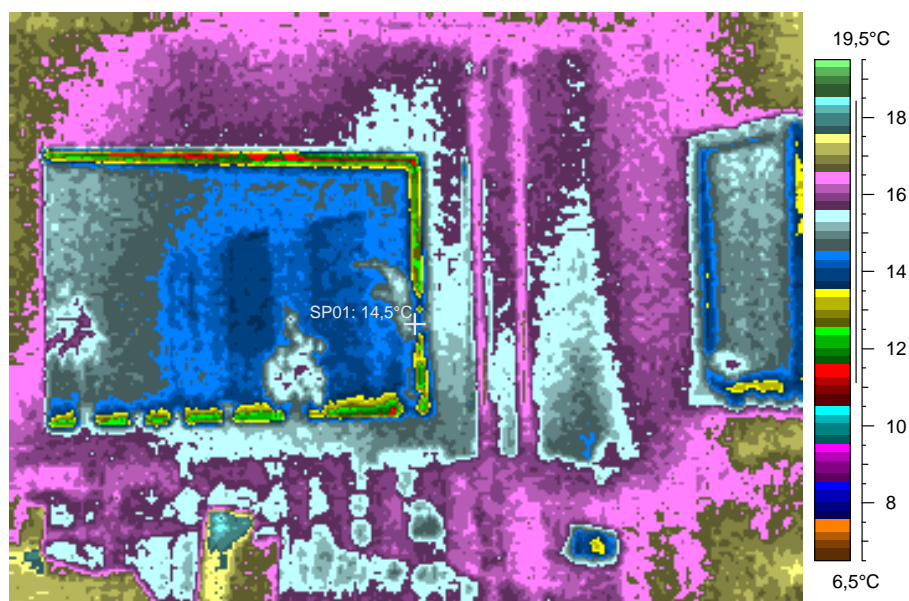
Pohled na jižní okno spolu s částí odvíravého jihozápadního. V jižním okně se zrcadlí okna západní i chladnější vnější zeď.

3 - Ir_1296.jpg

Label	Value
IR : max	18,7°C
IR : min	10,9°C
SP01	14,5°C

3.1.2008

22:49:34



2i_65

3

Obrázek 8.7: Na předchozím snímku se v okně zrcadlila vnitřní stěna budovy, nyní se v části jižního okna zrcadlí stěna vnější s dalšími okny. Je také vidět geometrický tepelný most tvořený rohem budovy. (viz text str. 62)



Obrázek 8.8: Snímání přes vypuklé zrcadlo vyžaduje, aby osoba pracující s kamerou byla na snímku zobrazena co nejméně. Na okraji zrcadla je nicméně nějaká její část vždy zachycena. Bylo by možné tomu čelit tím, že se dolní část zrcadla kolem úchytu a jeho dolní okraj polepí nebo natře, aby se tam odraz v LWIR oboru velmi snížil. To by též poskytlo informaci o teplotě zrcadla. (viz text str. 63)

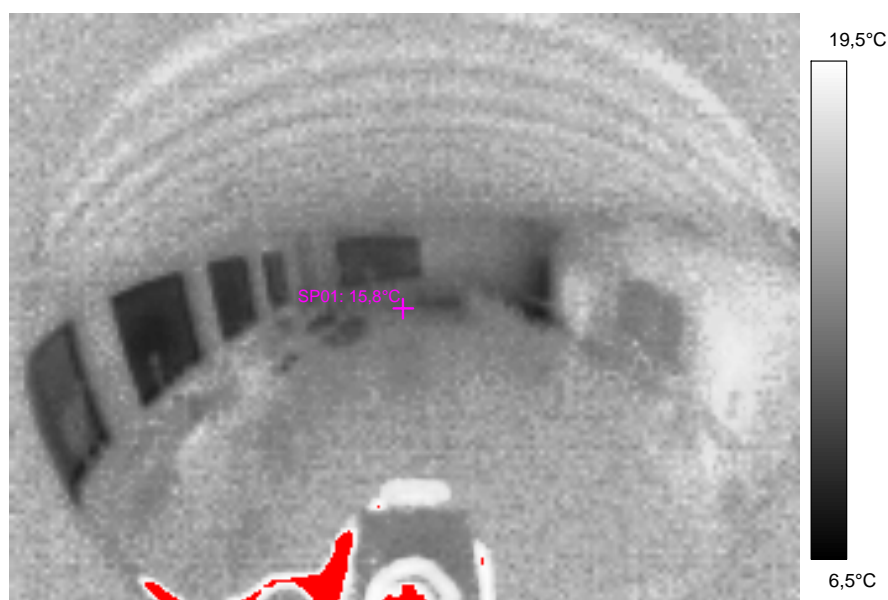
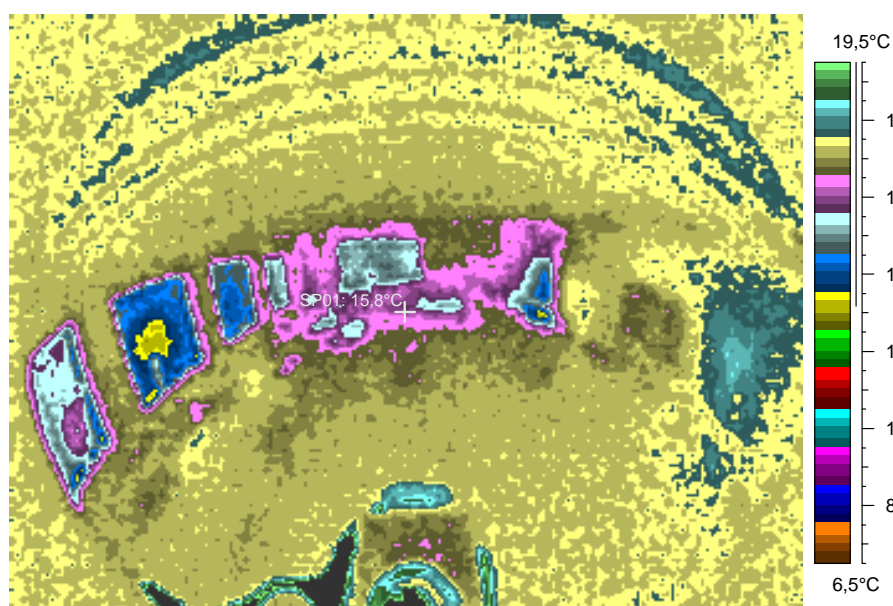
Pohled sálem na jih, z centra severní strany. Vlevo jsou dobře patrná dvě horší okna s deklarovaným $u = 0.8$

7 - Ir_1247.jpg

Label	Value
IR : max	26,8°C
IR : min	13,0°C
SP01	15,8°C

3.1.2008

21:16:31



1_65

7

Obrázek 8.9: Infrasnímek přednáškového sálu Centra v Hostětíně. (viz text str. 63)



Obrázek 8.10: Světelný snímek pořízené pak ve dne; dole je otočen tak, aby pohled nebyl zrcadlově převrácený. (viz text str. 63)

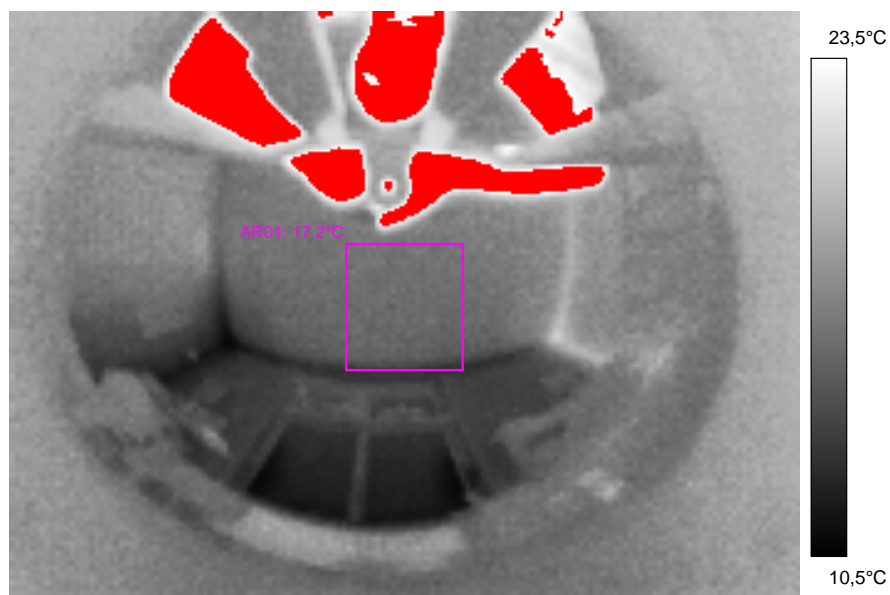
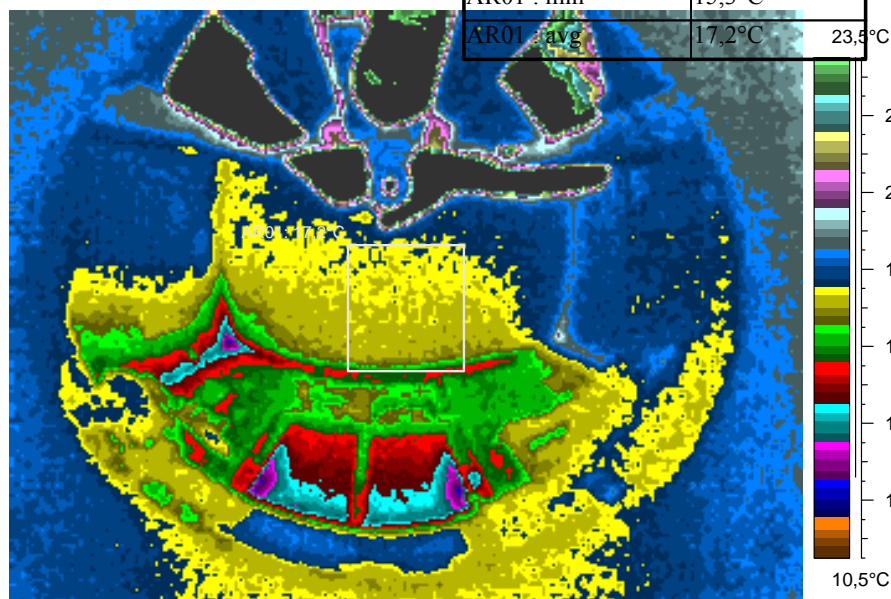
Minima v místech, kudy kolem okrajů rolety proudí studený vzduch z vnější dutiny 12,6, středy tabulí 14,8, vršky 15,3, horní tabule asi 16,5. V okně se zrcadlí plochy o asi 18 (čísla jsou Celsiovy teploty / 1 K).

23 - Ir_1463.jpg

Label	Value
IR : max	31,1°C
IR : min	12,3°C
AR01 : max	17,8°C
AR01 : min	15,3°C
AR01 : avg	17,2°C

12.2.2005

11:15:50



1.rep

23

Obrázek 8.11: Okno s foliovou roletou, ještě bez postranních lišt, na něž by fólie doléhala. Obraz ve vypuklém kovovém zrcadle. (viz text str. 65)

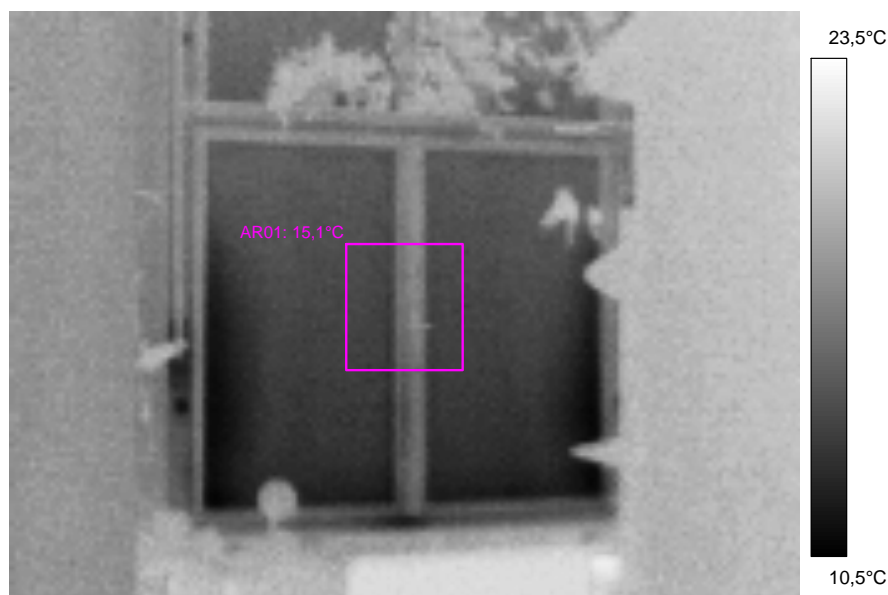
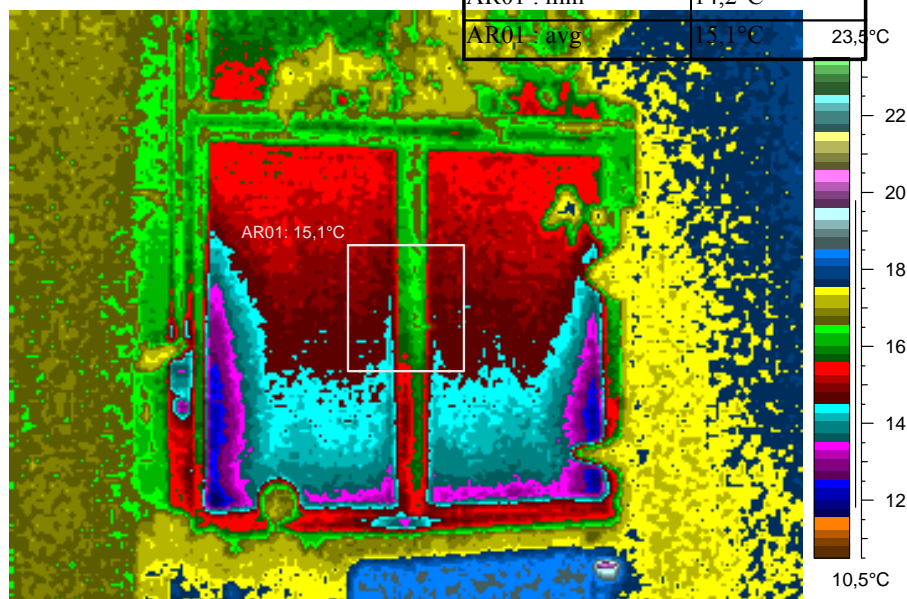
Vlevo se lesknou dveře odrážející okno, vpravo je přepážka zhruba s tou teplotou, která se zrcadlí v okně. Minima jsou jen 11,9 a vršky až 15,4. Zrcadlí se plochy mají kolem 17,6.

24 - Ir_1464.jpg

Label	Value
IR : max	20,5°C
IR : min	11,6°C
AR01 : max	16,7°C
AR01 : min	14,2°C
AR01 : avg	15,1°C

12.2.2005

11:16:41



1.rep

24

Obrázek 8.12: Okno s foliovou roletou, ještě bez postranních lišt, na něž by fólie doléhala. Vliv proudění vzduchu kolem okrajů rolety je velmi nápadný.

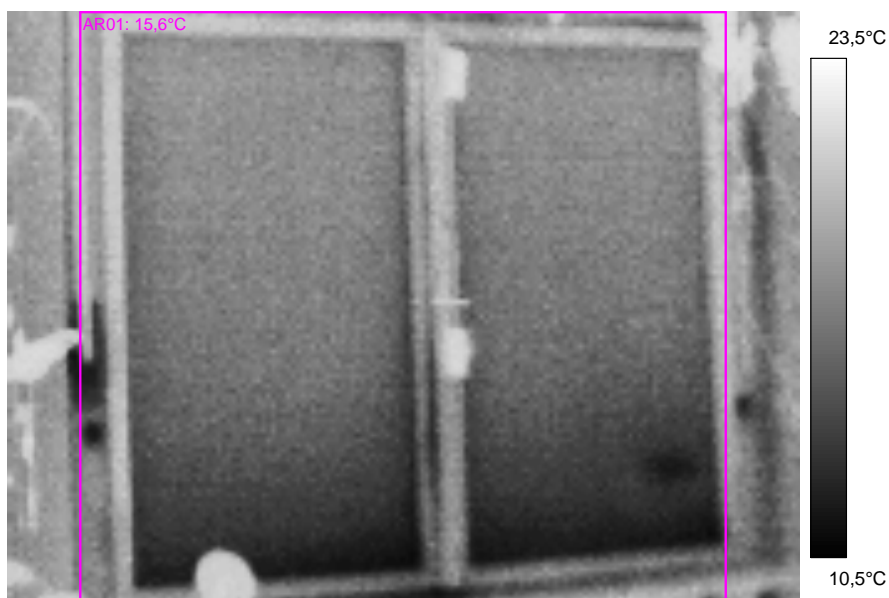
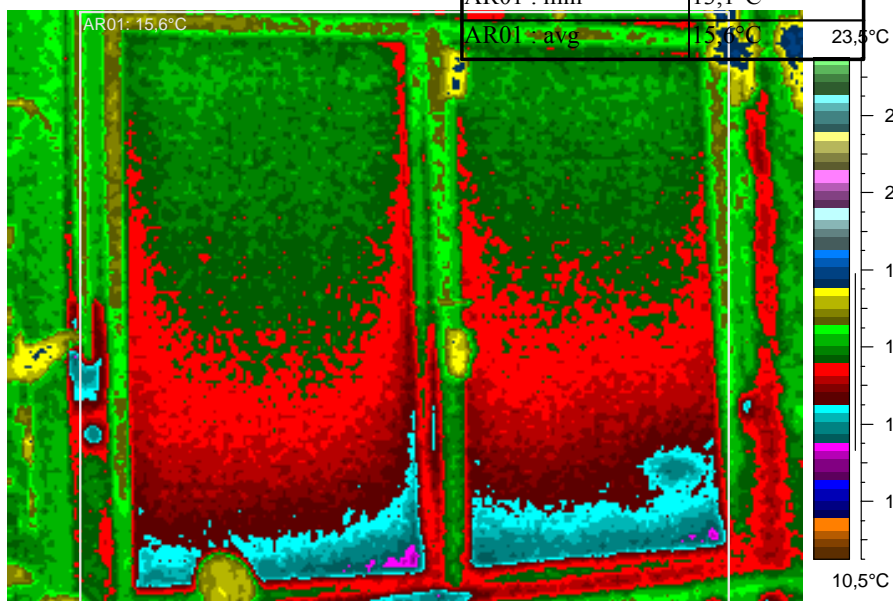
Okno jako celek má průměrnou jasovou teplotu jen o 1,8 K nižší než referenční neochlazované plošky.

25 - Ir_1674.jpg

Label	Value
IR : max	18,1°C
IR : min	13,1°C
AR01 : max	18,1°C
AR01 : min	13,1°C
AR01 : avg	15,6°C

13.2.2005

18:38:14



13.2.rep

25

Obrázek 8.13: Fóliová roleta v okně je již utěsněná postranními lištami a pružným profilem na dolním okraji. Nahoře a uprostřed snímku jsou zavěšeny referenční, zezadu tepelně izolované skleněné plošky, kterými žádný tepelný tok neprobíhá.

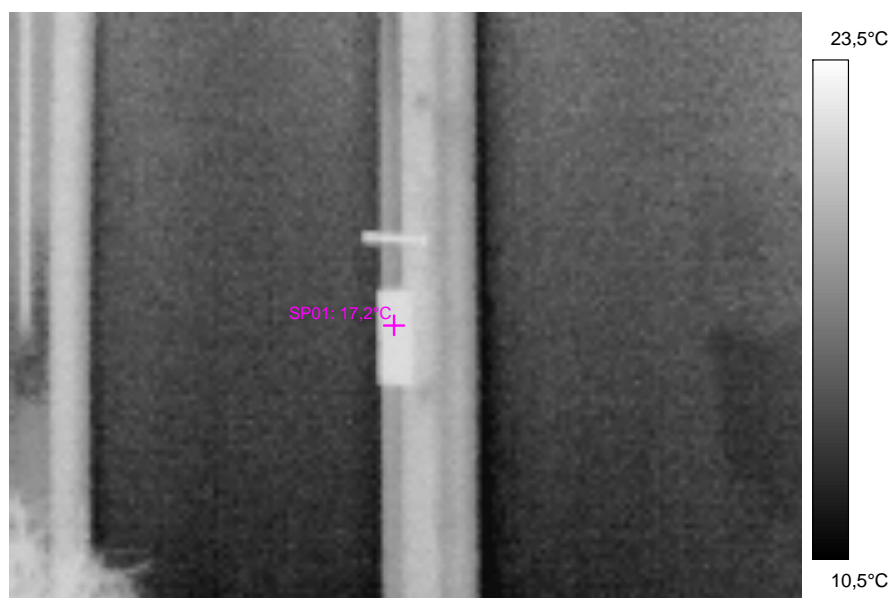
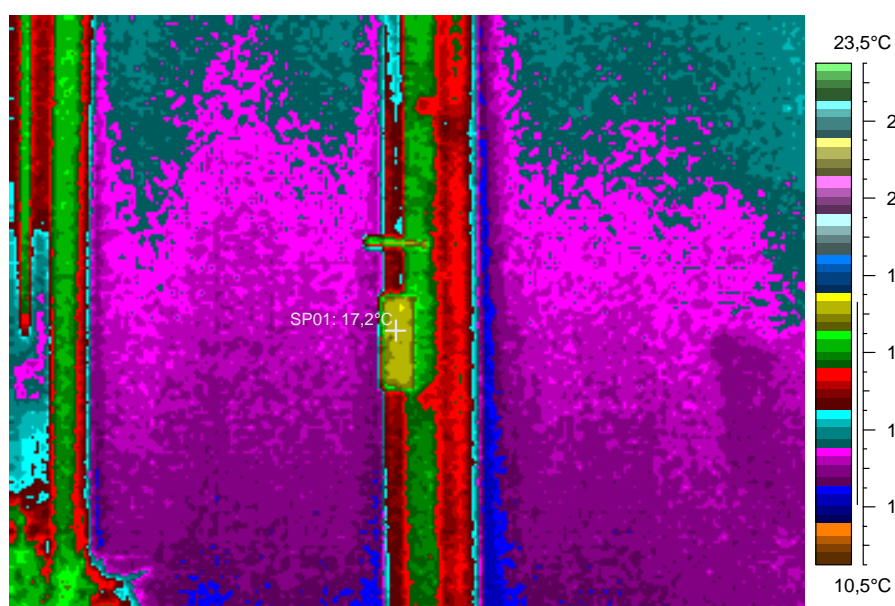
Menší okno bez foliové rolety, referenční ploška je teplejší o 4 K.

8 - Ir_1634.jpg

Label	Value
IR : max	17,6°C
IR : min	12,0°C
SP01	17,2°C

13.2.2005

2:26:01



13.1.2.rep

8

Obrázek 8.14: Jiné dvojité okno, které fóliovou roletu neobsahuje, má hodnotu u dvojnásobnou.

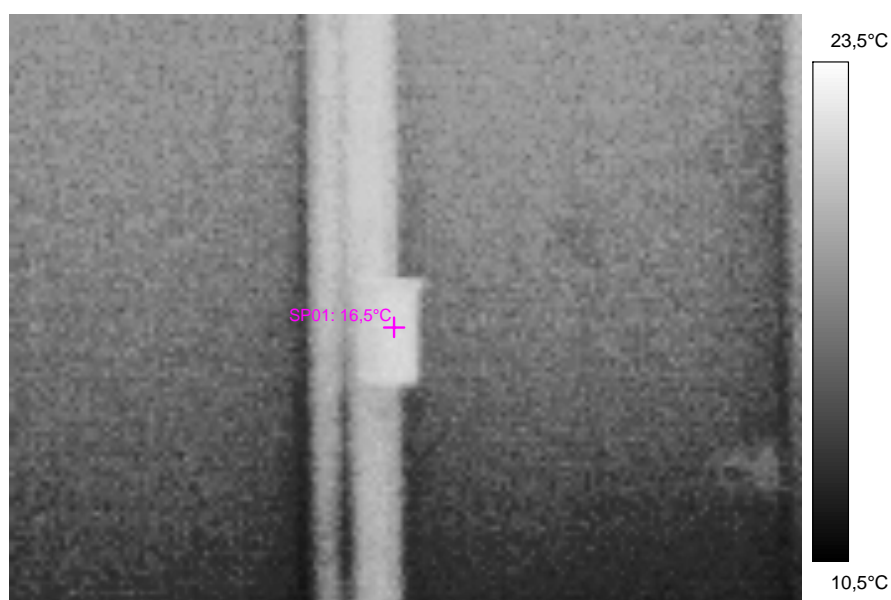
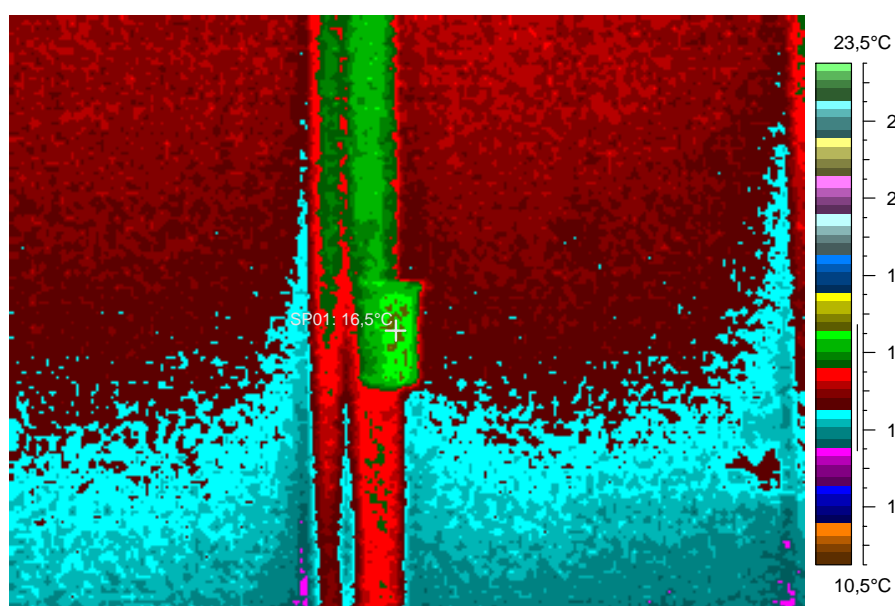
Okno s roletou, srovnávací neochlazovaná ploška zavěšená uprostřed má jasovou teplotu o 2 K vyšší.

7 - Ir_1633.jpg

Label	Value
IR : max	16,9°C
IR : min	13,3°C
SP01	16,5°C

13.2.2005

2:25:29



13.1.2.rep

7

Obrázek 8.15: Dvojité okno s fóliovou roletou v detailu.

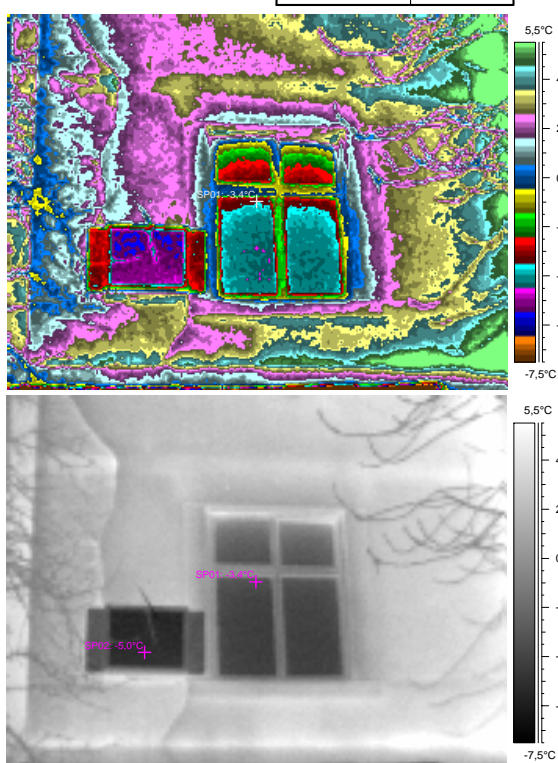
Okno zvenčí, s dvojicí pokovených rolet mezi skly. Referenční sklo vlevo odráží oblohu, EPS na bocích méně.

4 - *

Label	Value
IR : max	8,5°C
IR : min	-18,6°C
SP01	-3,4°C

16.3.2005

0:35:00



poster

4



Obrázek 8.16: Termosnímek okna, zlepšeného nad hranici pro pasivní domy užitím dvojice pokovených rolet. Okno tak izoluje lépe než okolní cihlová zeď. Vzhled dané scény ve dne, kdy by roleta byla v zimě ovšem vytažená, jako na horním pravém snímku. Částečně zatažená by mohla být za letních veder jako ochrana proti slunci.