

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Možnosti využití infrakamery při elektrotepelných  
procesech**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Daniel STÍBAL  
Osobní číslo: E10N0180P  
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Technická ekologie  
Název tématu: Možnosti využití infra kamery při elektrotepelných procesech  
Zadávací katedra: Katedra elektroenergetiky a ekologie

### Zásady pro vypracování:

1. Uveďte teorii sdílení tepla s důrazem na sálání.
2. Uveďte princip funkce infrakamery, termogram, typy infrakamer. Uveďte historie vývoje infrakamery, základní fyzikální principy související s IR měřením.
3. Příklady využití infrakamer v praxi, základní využití infrakamer, příklady aplikací pro využití infrakamer v budoucnosti.
4. Na zvolené modelové situaci porovnejte výpočet s praktickým měřením na infrakameře.
5. Uveďte závěry pro praxi.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

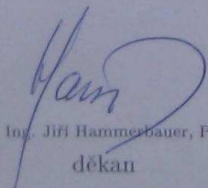
Seznam odborné literatury:

1. Rada, J.: Elektrotepelná technika, Praha, SNTL, 1985
2. Kegel, K.: Elektrowärme, Theorie und Praxis, Cornelsen Verlag GmbH + C, 1994
3. Hradílek, Z. : Elektrotepelná zařízení, Praha, IN-EL, 1997
4. Internet

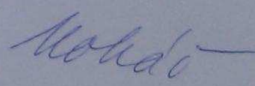
Vedoucí diplomové práce: Ing. David Rot, Ph.D.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013

  
Doc. Ing. Jiří Hammebauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Předložená diplomová práce je zaměřená na teorii týkající se bezdotykového měření infrakamerou, praktické měření pomocí infrakamery a porovnání teoretického výpočtu s praktickým měřením. Práce je rozdělena do pěti hlavních kapitol. První část obsahuje teorii v oblasti šíření tepla. Druhá a třetí část pojednává o principu funkce infrakamery, využití infrakamer a související problematice. Čtvrtá část je věnována termografii ve stavebnictví a příslušným pojmům z této oblasti. Závěrečná pátá část je rozdělena do několika podkapitol a shrnuje praktické měření na infrakameře, teoretický výpočet, výpočet pomocí software a vzájemné porovnání získaných výsledků.

## **Klíčová slova**

Infrakamera, termovize, měření infrakamerou, bezdotykové měření

## **Abstract**

Submitted diploma thesis is focused on the theory of non-contact measuring by infra-red camera, practical measuring using infra-red camera and comparison theoretical calculation with practical measurements. Diploma thesis is divided to five main chapters. The first chapter deals with theory of heat transfer. The second and third chapter discuss about operational principle of infra-red camera, using of infra-red camera and related issues. The fourth chapter is focused on building thermography and relevant terms for this field. The final fifth chapter is divided into several sub-chapters and summarizes the practical measuring with infra-red camera, theoretical calculation, theoretical calculation using software and comparison of the obtained results.

## **Key words**

Infra-red camera, thermo vision, thermal measuring, non-contact measuring

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 9.4.2013

Daniel Stíbal

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Davidu Rotovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat paní Mgr. Kamile Petrášové za ochotu spolupracovat a za poskytnutí měřeného objektu. Především pak děkuji své rodině a přítelkyni Tereze za podporu při studiu na fakultě elektrotechniky.

## Obsah

Seznam použitých symbolů a značek .....	10
Úvod.....	11
1 Šíření tepla .....	12
1.1 Šíření tepla vedením .....	12
1.2 Šíření tepla prouděním.....	13
1.3 Šíření tepla sáláním.....	13
1.3.1 Planckův vyzařovací zákon .....	14
1.3.2 Wienův zákon .....	15
1.3.3 Stefan-Boltzmannův zákon.....	16
2 Teorie infrakamer .....	16
2.1 Historický vývoj infrakamer .....	16
2.2 Elektromagnetické spektrum .....	18
2.3 Absolutně černé těleso .....	20
2.4 Emisivita .....	21
2.5 Princip funkce infrakamery .....	22
2.5.1 Systémy s rozkladem obrazu .....	25
2.5.2 Systémy s mozaikovým detektorem .....	26
2.6 Termogram.....	29
3 Využití infrakamer.....	31
3.1 Rozdělení infrakamer.....	31
3.2 Základní využití infrakamer v praxi .....	32
3.3 Využití infrakamer v budoucnosti .....	33
4 Termografie ve stavebnictví .....	34
4.1 Tepelný most.....	35
4.2 Rosný bod .....	36
5 Praktická část .....	37
5.1 Měření objektu infrakamerou .....	37
5.1.1 Specifikace měřeného objektu .....	37
5.1.2 Technické informace o infrakameře .....	41
5.1.3 Popis měření infrakamerou.....	42
5.1.4 Naměřené termogramy .....	42



5.2	Výpočet pomocí software .....	46
5.2.1	Software Agros2D .....	46
5.2.2	Postup při zpracovávání projektu v Agros2D.....	47
5.2.3	Výsledné grafy .....	49
5.2.3.1	Výsledné grafy projektu.....	49
5.2.3.2	Výsledné grafy s uvažovanou izolací 5 cm .....	51
5.2.3.3	Výsledné grafy s uvažovanou izolací 10 cm .....	53
5.3	Teoretický výpočet prostupu tepla.....	55
5.4	Porovnání teoretické výpočtu s praktickým měřením .....	58
5.4.1	Závěry pro praxi.....	59
Závěr	.....	61
Použitá literatura a internetové zdroje	.....	62

## Seznam použitých symbolů a značek

$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsia
cm	Centimetr
K	Kelvin
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti
$\varepsilon$	Emisivita

## Úvod

Principy a funkce bezdotykového měření a s ním souvisejících technologie zažívaly nejrychlejší vývoj ke konci 20. století, tento trend si tyto technologie udržely i v 21. století. Samotné infrakamery prochází neustálým a velmi rychlým vývojem již od roku 1965, kdy si bylo možné zakoupit první zařízení tohoto druhu. Obor termovizního měření se s příchodem nových technologií stává velice žádaným.

V předložené práci, její teoretické části jsou uvedeny tři základní druhy šíření tepla a fyzikální zákony, které se šíření tepla přivádíme do souvislosti. Dále jsou v práci uvedeny dva základní principy funkce infrakamer, na základě kterých infrakamery pracují a související fyzikální pojmy, které jsou nezbytné pro obor termovizního měření. Rovněž je uvedeno základní využití infrakamer v technické praxi, s příslušným rozdělením infrakamer. Další část práce je věnována termografii ve stavebnictví, která souvisí s praktickým měřením na infrakameře uvedeném v této práci. Praktická část práce je zaměřena na porovnání výsledků získaných praktickým měřením místnosti objektu rodinného domu s výsledky získanými teoretickým výpočtem a výpočtem v softwaru.

# 1 Šíření tepla

Teplu je energie, kterou soustava absorbuje resp. vyzáří, když dojde k interakci s jinou soustavou, je to pohyb molekul. Mluvíme tedy o tepelné výměně, při které předávají částice s vyšší teplotou část své energie částicím s nižší teplotu, částice při tomto ději nemění svoji polohu nýbrž kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Šíření tepla je děj, který se uskutečňuje třemi základními způsoby: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a v poslední řadě sáláním (radiací). V praxi dochází velmi často ke slučování jednotlivých způsobů přenosu.

## 1.1 Šíření tepla vedením

K přenosu tepla vedením dochází především v pevných látkách jejíž segmenty mají rozdílné teploty. U vedení tepla dochází k předávání pohybové energie pomocí nárazů sousedních částic. V plynech a kapalinách se k tomuto druhu šíření tepla připojuje proudění. V závislosti na rychlosti vedení tepla, dělíme pevné látky na tepelné vodiče nebo tepelné izolanty. Při řešení jednotlivých úloh s vedením tepla, lze dále vedení tepla rozdělit na stacionární vedení tepla (teplotní rozdíl mezi částmi tělesa je ustálený a nezávislý na čase) nebo na nestacionární vedení tepla (dochází krok za krokem k vyrovnávání teplotních rozdílů v dílčích částech tělesa). Mezi nejlepší tepelné vodiče patří kovy, proto se využívají např. jako radiátory nebo chladiče. [1]

Při výpočtech vedení tepla se pak užívá vzorce pro tepelný tok:

$$P = \int_S (-\lambda \text{ grad } \theta) dS$$

kde

$P$  tepelný tok [ W ]

$\lambda$  součinitel tepelné vodivosti [  $\frac{W}{m K}$  ]

$\theta$  termodynamická teplota [ K ]

$S$  plocha [  $m^2$  ]

## 1.2 Šíření tepla prouděním

Tento způsob šíření tepla je možný výhradně v kapalinách a plynech, v pevných látkách se nevyskytuje. K proudění tepla dochází pokud v gravitačním poli zahříváme kapalinu nebo plyn, který se pak má tendenci chovat tak, že chladnější plyn resp. kapalina má větší hustotu a proto klesá směrem dolů. Naopak teplejší médium s menší hustotou má tendenci na základě Archimédova zákona stoupat vzhůru. S šířením tepla prouděním se setkáváme např. v zemské atmosféře. [1]

Tepelný tok při šíření tepla prouděním definujeme z Newtonova ochlazovacího zákona:

$$P = \alpha S (\theta_1 - \theta_2)$$

kde

$P$	tepelný tok [ $W$ ]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]
$S$	plocha [ $m^2$ ]
$\theta$	termodynamická teplota [ $K$ ]

## 1.3 Šíření tepla sáláním

K šíření tepla sáláním dochází u každého tělesa, které má vyšší teplotu než je nula kelvinů. Tento děj se uskutečňuje za pomoci elektromagnetických vln, které těleso vyzařuje do svého okolního prostoru všemi směry. Vyzařování (pohlcování) elektromagnetických vln závisí především na teplotě, barvě a obsahu plochy daného tělesa. Pokud se toto záření dostane do styku s jiným tělesem, dojde k jeho částečnému pohlcení povrchem tohoto tělesa, další část této energie je odražena nebo prostoupí tělesem. Energie, která je tělesem pohlcena pak zvýší vnitřní energii daného tělesa. V praxi byly tyto poznatky zjištěny nejprve empiricky (bílá barva má menší pohlcovací schopnosti než barva černá), těchto jevů se využívá např. u chladniček, které jsou bílé, protože požadujeme, aby co nejvíce energie bylo odraženo zpět. Opakem jsou sluneční kolektory, které mají černou barvu, zde požadujeme co největší pohltivost záření. [1]

Můžeme tedy formulovat:

$$\text{Poměrná pohltivost tělesa } A = \frac{\text{energie pohlcená}}{\text{energie celková}}$$

$$\text{Poměrná odrazivost tělesa } B = \frac{\text{energie odražená}}{\text{energie celková}}$$

$$\text{Poměrná propustnost tělesa } C = \frac{\text{energie prošlá}}{\text{energie celková}}$$

Platí tedy:  $A + B + C = 1$

V následujících podkapitolách uvedu základní zákony sálání, které jsou platné pro absolutně černé těleso (dokonale pohlcuje záření na jeho povrch dopadající, bez ohledu na vlnovou délku tohoto záření) . [1]

### 1.3.1 Planckův vyzařovací zákon

Planckův zákon patří k jedním z nejdůležitějších v teorii tepla, popisuje závislost spektrální hustoty intenzity vyzařené energie  $M_{\lambda\theta}$  na vlnové délce  $\lambda$ , černého tělesa.  $M_{\lambda\theta}$  se počítá z následujícího vztahu: [1]

$$M_{\lambda\theta} = c_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda\theta}} - 1)^{-1}$$

kde

$M_{\lambda\theta}$  spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa [ $Wm^{-3}$ ]

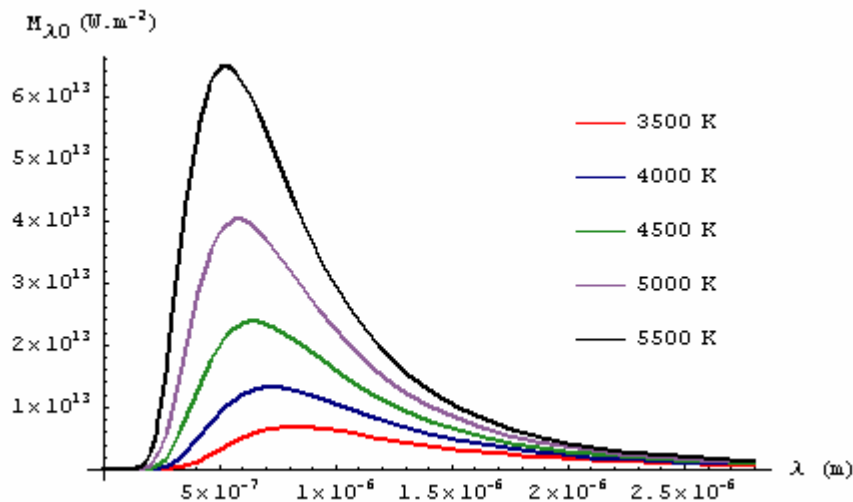
$c_1$  první vyzařovací konstanta,  $c_1 = 3,73 * 10^{-16}$  [ $Wm^2$ ]

$c_2$  druhá vyzařovací konstanta,  $c_2 = 1,438 * 10^{-2}$  [ $mK$ ]

$\lambda$  vlnová délka [ $m$ ]

$\theta$  termodynamická teplota [ $K$ ]

Tato závislost je znázorněna na obr. 1.1, z kterého je zřejmé, že při vzrůstající teplotě absolutně černého tělesa se zvětšuje spektrální hustota a vrcholová hodnota se posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. Křivka dosahuje svého maxima u menších vlnových délek, když je teplota tělesa vyšší. [1]



Obr. 1.1 Závislost zářivosti absolutně černého tělesa na vlnové délce [8]

### 1.3.2 Wienův zákon

Je to fyzikální zákon, ze kterého plyne, že spektrální hustota intenzity vyzařování absolutně černého tělesa (její maximální hodnota) se posouvá, se vzrůstající teplotou, směrem ke kratším vlnovým délkám. Wienův zákon udává vlnovou délku, při které je záření maximální a je definován vztahem: [1]

$$\lambda_m = \frac{b}{\theta} = \frac{2898}{\theta}$$

kde

$\lambda_m$  vlnová délka při maximálním vyzařování [  $\mu\text{m}$  ]

$b$  Wienova konstanta,  $b = 2,898$  [  $\text{mmK}$  ]

$\theta$  termodynamická teplota [  $K$  ]

### 1.3.3 Stefan-Boltzmannův zákon

Udává, že celková intenzita vyzařování absolutně černého tělesa je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty. [1]

$$P_{\zeta} = \sigma \theta^4$$

kde

$P_{\zeta}$  celková intenzita záření absolutně černého tělesa  $[Wm^{-2}]$

$\sigma$  Stefanova-Boltzmannova konstanta,  $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} [Wm^{-2} K^{-4}]$

$\theta$  termodynamická teplota  $[K]$

Pro šedá tělesa nabývá tento vzorec tvaru:

$$P_{\zeta} = \varepsilon \sigma \theta^4$$

kde

$\varepsilon$  emisivita [-]

## 2 Teorie infrakamer

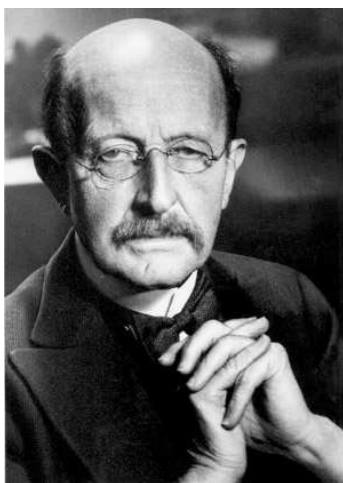
### 2.1 Historický vývoj infrakamer

První volně prodejnou infrakamerou byla AGA Thermovision 665 švédské výroby, v roce 1965. Než si však bylo možno tuto kameru zakoupit, muselo uplynout mnoho desítek let vývoje v oblasti měření teploty, v němž figurovaly významné osobnosti vědy a v němž sehrála nemalou roli druhá světová válka.

Počátky vývoje lze datovat až do 17. století, kdy vznikali první kapalinové teploměry (voda, líh, později v roce 1714 použil Fahrenheit jako teploměrnou látku rtuť), rovněž v tomto století Isaac Newton zjistil, že bílé světlo, lze rozložit do barevného spektra



a Christian Huygnes sepsal vlnové vlastnosti světla, čímž položil základy pro Maxwellovu teorii elektromagnetického záření. Je nutno podotknout, že tyto objevy s vývojem infrakamery přímo nesouvisí, ale souvisí s vývojem a formulací významných definic, které značně historicky napomohly k jejímu vývoji. Klasické teploměry byly a jsou používány dodnes, mezním vynálezem byl ale v 19. století termočlánek (napětí se mění v závislosti na změně teploty dvou kovů), který byl použit v různých modifikacích pro první bezdotykové měření teploty vlivem jeho velké citlivosti. V 19. století byly rovněž stanoveny významné definice. Mezi nejvýznamnější a mající největší vliv patřily definice Gustava Roberta Kirchhoffa, který definoval absolutně černé těleso. James Clerk Maxwell popsal rovnicemi elektromagnetické pole. Ludwig Boltzmann matematicky popsal zákon, který před ním Stefan empiricky stanovil (Stefan – Boltzmannův zákon o vyzařování absolutně černého tělesa) a Wilhem Wien uvedl vztah mezi vlnovou délkou a termodynamickou teplotou absolutně černého tělesa. Všechny tyto objevy 19. století vedly krok po kroku k vynálezu dnešní infrakamery. Za převratný objev byl považován Planckův vyzařovací zákon (viz. kapitola 1.3.1 Planckův vyzařovací zákon) , který Max Planck formuloval v roce 1901, od tohoto data se výzkum rozběhl naplno a probíhal v utajení i za první a později druhé světové války, kdy se soustředilo na vojenské využití tohoto systému. Vývoj ve válečném a poválečném období byl podroben přísnému utajení. Odtajnění těchto technologií a další výzkum v této oblasti v civilním sektoru došlo až v polovině padesátých let dvacátého století.



Obr. 2.1 Max Planck 1858 - 1947 [6]

Do 70. let dvacátého století se vývojem a výrobou infракamer s větším či menším úspěchem zabývalo pouze několik firem na světě. Velký pozitivní vliv na budoucím vývoj, ale patřil fúzi těchto firem ve společnost FLIR Systems, která byla založena v roce 1978. Firma FLIR dnes zahrnuje pět velkých firem: AGEMA Infrared Systems, Indigo Systems, FSI a Inframetrics, Cepid a Extech Instruments. FLIR Systems stála u velkých historických mezníků vývoje infракamery. V roce 1983 bylo v této firmě vyrobeno první zařízení s možností vyobrazení teploty na obrazovce. O šest let později, v roce 1989 byla vyrobena ve firmě FLIR Systems první infракamera se zabudovanou digitální pamětí. V devadesátých letech bylo přestoupeno na mozaikové detektory a systém FPA (Focal Plane Array). S příchodem nového tisíciletí se v roce 2000 podařilo firmě vyrobit první infракaru, která umožňovala záznam teplotních, vizuálních, ale i hlasových a textových dat. O dva roky později byla firmou vyvinuta infракamera s LCD displejem a rozšířenou konektivitou pomocí rozhraní USB. Infракamery, ale pořád disponovaly značnými rozměry a byly určeny spíše pro stacionární průmyslové využití. Zlom nastal až v roce 2004, kdy se na trh dostala opravdu kompaktní infракamera pro termografické sledování budov. [5]

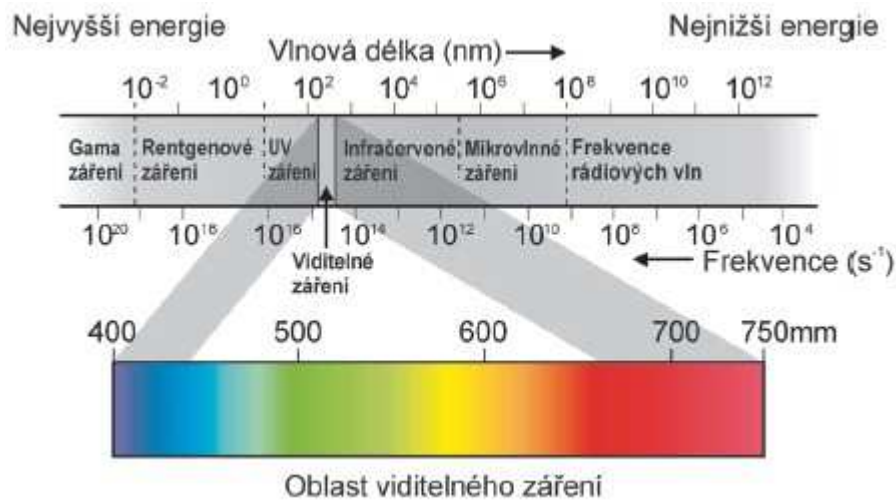


Obr. 2.2 Logo společnosti FLIR Systems [7]

Infракamery prochází neustálým vývojem, jejich rozměry a hmotnost se neustále zmenšují, přičemž jejich ovládání, vlastnosti a dostupnost se stále zlepšuje. Lídrem na trhu mezi infракamerami zůstává společnost FLIR Systems. [8]

## 2.2 Elektromagnetické spektrum

Zařízení pro bezdotykové měření teploty, využívá faktu, že každý objekt s teplotou vyšší než je absolutní nula ( $0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) vyzařuje infračervené záření (IR záření), které odpovídá jeho aktuální teplotě. Toto záření ale není viditelné pouhým okem, protože leží za hranicí vnímání lidského oka, jak je patrné z obrázku 2.3 z něhož plyne, že lidské oko je



Obr. 2.3 Elektromagnetické spektrum [9]

schopné detekovat pouze určitou část tohoto spektra, jež je nazýváno viditelné záření, zbytek spektra je pro člověka neviditelným. Všechna pásma v elektromagnetickém spektru se liší pouze vlnovými délkami a podléhají stejným zákonům.

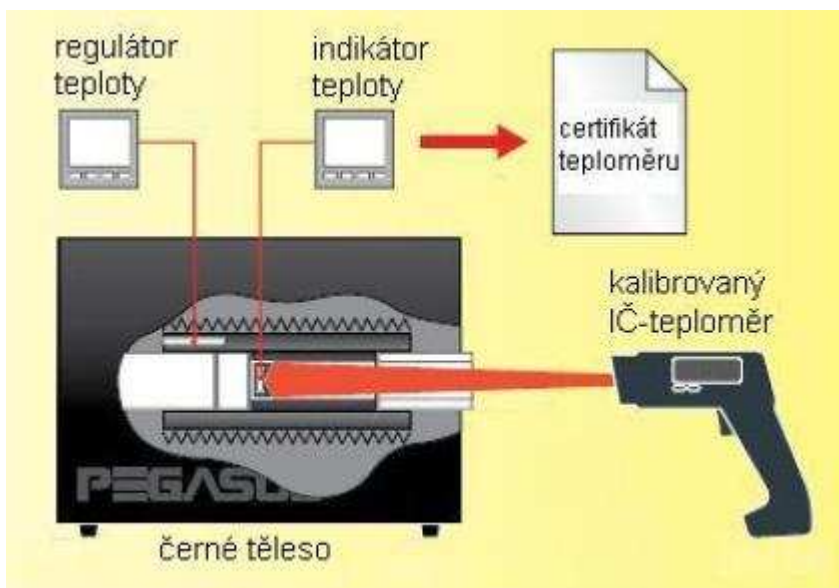
Infračervené záření se v elektromagnetickém spektru nachází mezi viditelným zářením, jehož vlnová délka je menší a mezi mikrovlnným zářením jehož vlnová délka je větší. Dá se říci, že infračervená oblast začínám tam, kde končí oblast viditelného světla. Rozpětí infračerveného záření je tedy od  $0,75 \mu\text{m}$  do  $1000 \mu\text{m}$ . Infračervené záření se dá dále dělit na dílčí pásma podle vlnové délky takto:

- blízké infračervené záření IR-A, označení NIR ( $0,75 - 1,4 \mu\text{m}$ )
- infračervené záření krátké vlnové délky IR-B, označení SWIR ( $1,4 - 3 \mu\text{m}$ )
- infračervené záření střední vlnové délky IR-C, označení MWIR ( $3 - 8 \mu\text{m}$ )
- infračervené záření dlouhé vlnové délky IR-C, označení LWIR ( $8 - 15 \mu\text{m}$ )
- infračervené záření vzdálené, označení FIR ( $15 - 1000 \mu\text{m}$ )

Tepelná hranice pro viditelnost tohoto záření je  $525 \text{ }^\circ\text{C}$ , tzn. pokud je objekt chladnější než tato teplota, záření viditelné není. Pokud je ale objekt teplejší záření se stává viditelným. Příkladem pro tento fakt z praxe může být například do ruda rozpálený kus kovu. [10]

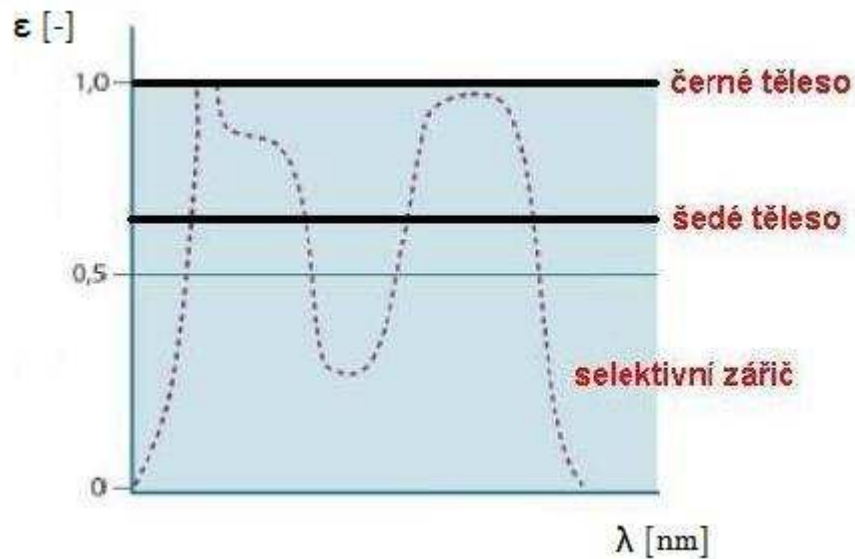
### 2.3 Absolutně černé těleso

Těleso jež pohlcuje veškeré záření se nazývá absolutně černé těleso (nebo také může být nazýváno černým zářičem), toto těleso pohlcuje záření všech vlnových délek, při libovolném úhlu dopadu, které dopadají na jeho povrch. Emisivita černého tělesa  $\varepsilon = 1$ . Černý zářič se využívá zejména pro kalibraci pyrometrů. Hodnota emisivity u kalibračních přístrojů pro pyrometry nabývá hodnoty  $\varepsilon \approx 1$  v praxi od 0,980 až 0,995. Černý zářič je obvykle realizován jako kovová válcová dutina opatřena černou barvou, jíž teplota se udržuje přesným regulátorem teploty. Obdobný princip kalibrace s černým zářičem se využívá i u infrakamer. [2]



Obr. 2.4 Průběh kalibrace pyrometru [9]

Emisivita reálného tělesa je tedy  $\varepsilon \leq 1$ . Pokud se těleso chová tak, že pro různé vlnové délky vykazuje různé odchylky od záření absolutně černého tělesa, jedná se pak o selektivní zářiče. Pokud pro různé vlnové délky vykazuje těleso konstantní charakter emisivity, jedná se o tzv. šedá tělesa. Grafický průběh závislosti emisivity na vlnové délce jednotlivých zářičů je na obrázku 2.5. [2]



Obr. 2.5 Závislost emisivity na vlnové délce jednotlivých zářičů [13]

## 2.4 Emisivita

Jeden z velmi důležitých parametrů při měření infракamerou je emisivita. Je to parametr, který se musí do infракamery zadat ručně a na kterém závisí přesnost měření. Emisivita je obecně definována jako poměr intenzity vyzařování daného tělesa ku intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa. Definuje nám schopnost objektu vyzařovat teplo.

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0}$$

kde

$\varepsilon$  emisivita [-]

$M$  intenzita vyzařování daného tělesa [ $Wm^{-2}$ ]

$M_0$  intenzita vyzařování černého tělesa [ $Wm^{-2}$ ]

Emisivita obvykle není konstantní, závisí na mnohých parametrech jako je barva, vlnová délka, teplota či struktura povrchu. Hodnoty pro emisivitu jsou tabelovány, při měření se tedy vychází ze znalosti měřeného objektu, ke kterému se následně v tabulce dohledá příslušná hodnota emisivity. [10]

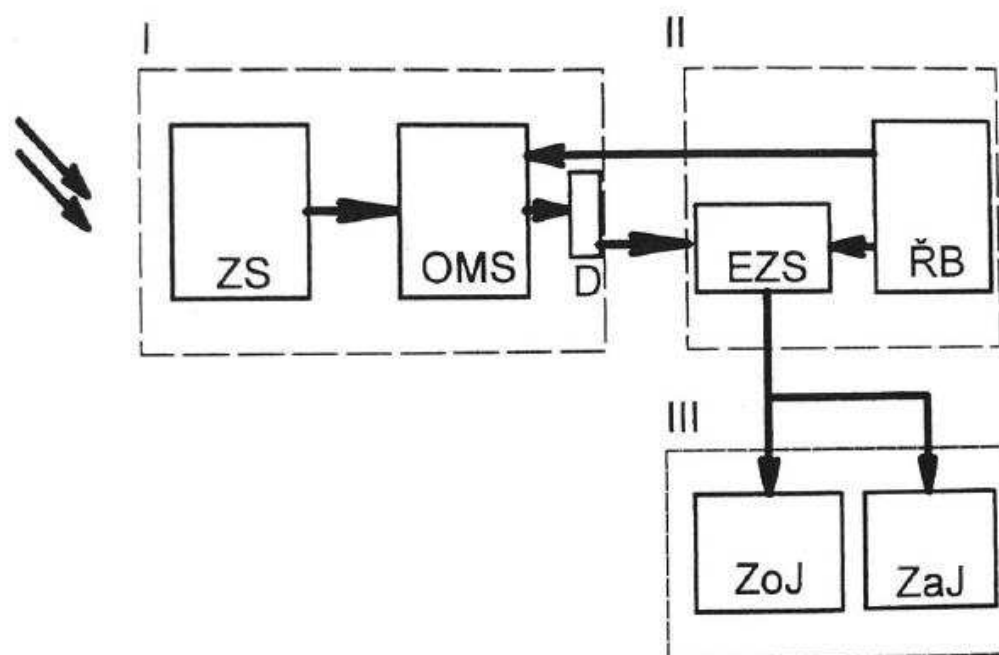
Tab. Emisivita  $\varepsilon$  pro vybrané povrchy

<i>Charakteristika povrchu</i>	<i>Emisivita</i>
Černé těleso	1,00
Černý matový lak	0,99
Voda	0,95
Cihly	0,85
Zoxidovaný ocelový plech	0,75
Zoxidovaný hliník	0,55
Lesklý ocelový plech	0,25

Obr. 2.6 Emisivita pro vybrané povrchy [10]

## 2.5 Princip funkce infrakamery

Při měření teploty objektu bezdrátovým detektorem teploty, infrakamerou (pyrometry) využíváme faktu, že daný objekt vyzařuje infračervené záření (každý objekt s teplotou vyšší než je nula kelvinů vyzařuje infračervené záření), které můžeme tímto zařízením detekovat, převést na elektrický signál a následně zobrazit. Infrakamera nám tedy umožňuje zobrazení infračerveného záření, které není běžným okem pozorovatelné, ve spektru barev, které lidským okem pozorovatelné jsou. Operační rozsah infrakamer v závislosti na typu je 0,35  $\mu\text{m}$  až 25  $\mu\text{m}$ , spektrum viditelného světla končí u hodnoty 0,75  $\mu\text{m}$  dále pak mluvíme už o infračerveném záření. Na obrázku 2.9 je vyobrazeno obecné blokové schéma infrakamery. [14]



Obr. 2.7 Základní blokové schéma infракamery [14]

Vysvětlivky k obr. 2.7 :

ZS.....Zobrazovací soustava

OMS.....Systém rozkladu obrazu (pouze u bodového detektoru)

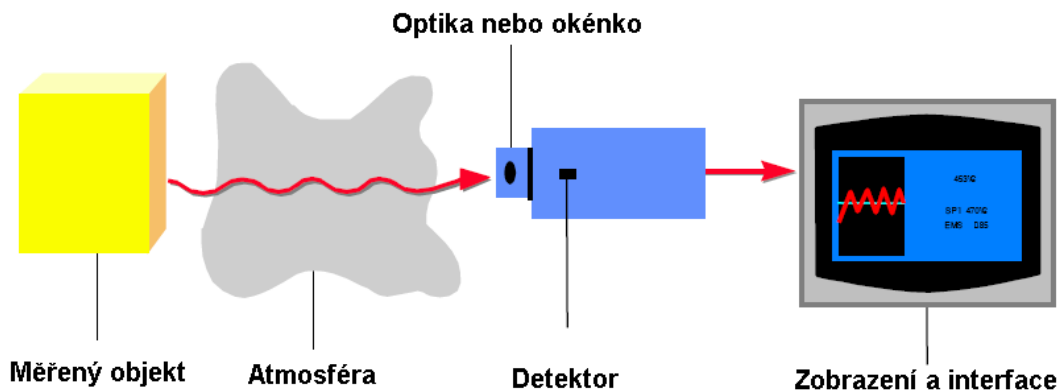
D.....Detektor

ŘB.....Řízení barev

EZS.....Elektronický blok

ZoJ.....Výstup pro zpracování, záznam signálu

ZaJ.....Výstup pro zobrazení



Obr. 2.8 Průběh bezdotykového měření pomocí infrakamery [15]

Na obrázku 2.8 je vyobrazeno bezdotykové měření pomocí infrakamery. Infračervené záření, které vyzařuje objekt prochází atmosférou a dopadá na detektor záření, záření je poté převedeno v infrakameře na elektrický signál a následně zobrazeno, pokud se jedná o kameru s integrovaným displejem.

Princip funkce infrakamer se dělí zejména podle detektorů infračerveného záření. Původně se v kamerách používaly detektory s rozkladem obrazu, které se dnes téměř nevyužívají a pomalu je nahrazují infrakamery s maticovým detektorem, jejich funkce je naznačena v následujících kapitolách. [14]

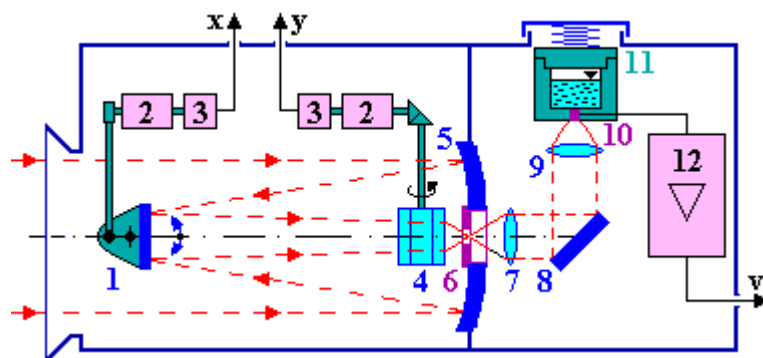


Obr. 2.9 Infrakamera značky Fluke [16]



### 2.5.1 Systémy s rozkladem obrazu

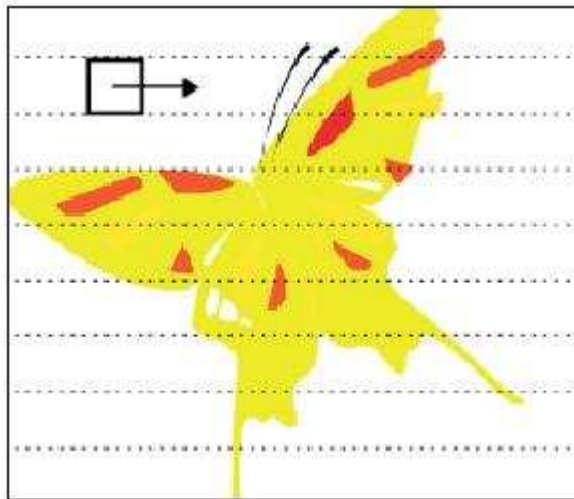
Systém s rozkladem obrazu využívaly jedny z prvních infrakamer, tyto systémy jsou velice technologicky náročné na výrobu, s čímž souvisí i jejich vysoká cena. Systém je založen na principu snímání jednotlivých obrazových bodů sledovaného objektu, pomocí natáčecího zrcadla uvnitř infrakamery, názorně je tento postup znázorněn na obr. 2.10. Pohledové pole infrakamery se krok za krokem zaměřuje na jednotlivé obrazové body, pomocí pohyblivých optických částí, které přivádějí obraz k vysoce citlivému detektoru. Citlivost těchto detektorů závisí na jejich provedení a materiálu, z kterého jsou vyrobeny. Nejcitlivější detektory jsou vyhotoveny z InSb (antimonid inditý), při jejich použití, ale vznikají velké teploty a detektor je nutné chladit viz. schéma termovizní kamery s chlazeným detektorem na obr. 2.10. [17]



Obr. 2.10 Schéma termovizní kamery s chlazeným detektorem a rozkladem obrazu [18]

Vysvětlivky k obr. 2.10 :

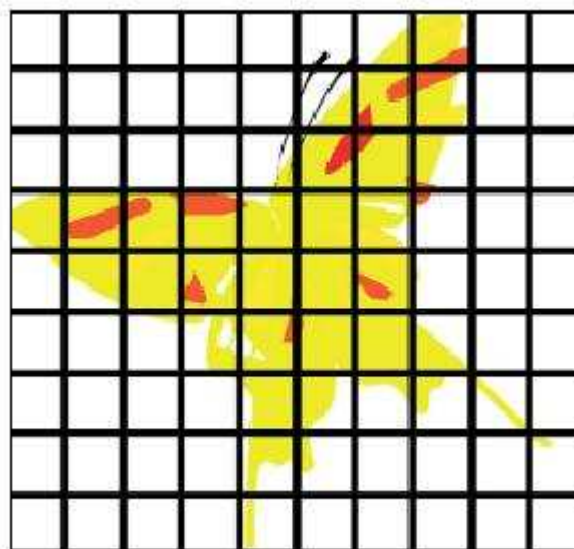
- 1) rozmítací zrcadlo
- 2) motorky
- 3) fotoelektrické vysílače polohy x-y
- 4) křemenný osmiboký hranol
- 5) duté zrcadlo
- 6) clona
- 7) 8) 9) optická soustava
- 10) kvantový detektor
- 11) kapalný dusík
- 12) předzesilovač s videovýstupem v



Obr. 2.11 Názorný postup systému rozkladu obrazu („bodový detektor“) [19]

### 2.5.2 Systémy s mozaikovým detektorem

Detektor je v tomto případě tvořen systémem (maticí) infračervených senzorů. Obraz, který vstupuje do infrakamery se již nerozkládá na jednotlivé obrazové body, ale rovnou se převádí jako celek na elektrický signál, s kterým se dále pracuje (Obr. 2.12). Senzorů pracujících na tomto principu je několik.

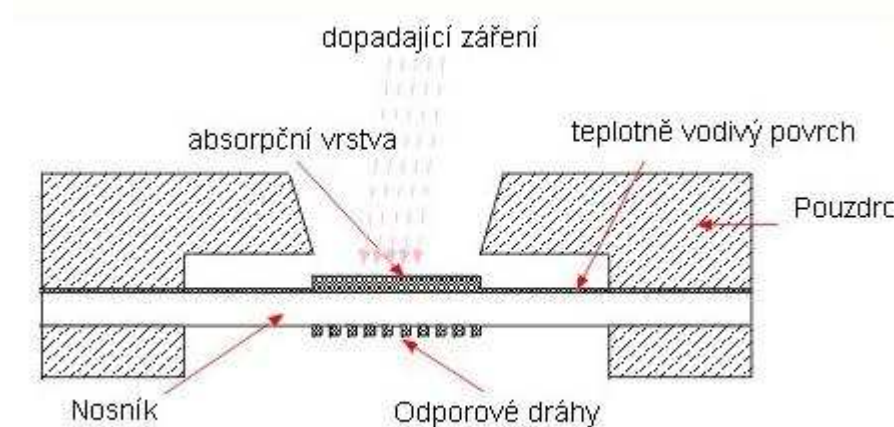


Obr. 2.12 Systém s maticovým detektorem obrazu [19]

Jedním z těchto typů jsou fotonové senzory, fotodiody nebo fotoodpory. Při dopadu záření na tyto senzory dochází ke změně vodivosti a přeměně na elektrický signál. Hlavní nevýhodou těchto senzorů je nutnost jejich chlazení, což je značně komplikované a zvětšuje to složitost celého systému. Chladič v těchto systémech pracuje na principu Stirlingova motoru (heliový kompresorový agregát). [19]

Dalším typem jsou pyroelektrické a feroelektrické senzory. U těchto senzorů dochází při dopadu záření na detektor ke změně kapacity. Obecně senzory tohoto druhu nejsou vhodné pro měření teploty. Jejich výhodou je, že zde není nutnost chlazení, ale je nutná vstupní modulace obrazu. [20]

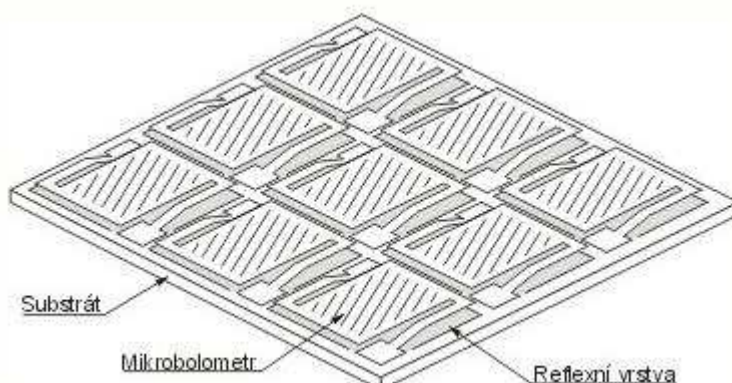
Nejpoužívanějším typem senzorů jsou tepelné senzory (bolometry). Princip funkce bolometru je jednoduchý záření, které dopadne na jeho plochu vyvolá změnu teploty, tato změna dále vyvolá změnu odporu, čímž se záření převádí na elektrický signál. Je však nutné zajistit izolaci bolometru od svého okolí, aby změna teploty na jeho povrchu byla vyvolána pouze změnou infračerveného záření. [20]



**Obr. 2.13** Provedení bolometru [21]

Na obrázku 2.13 je jednoduchý bolometr, infračervené záření dopadá na absorpční vrstvu bolometru, která je zhotovena ze zlaté fólie pro dobrou tepelnou vodivost. Postupně dochází k ohřevu nosníku, na kterém jsou na spodní straně napařeny odporové dráhy, přičemž odpor se mění lineárně s teplotou. [21]

V dnešních infrakamerách se používají bolometry ve formě integrovaných obvodů, které obsahují stovky až tisíce bolometrů integrovaných na jediném čipu. Takto uspořádané bolometry se nazývají mikrobolometry. Detektory v takovém uspořádání pracují již běžně s rozlišením 320 x 240 obrazových bodů, ale až 640 x 480 obrazových bodů. [21]



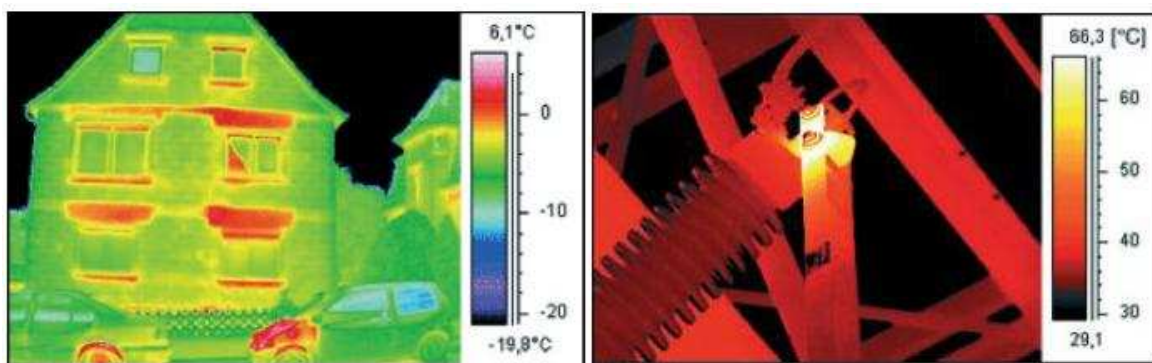
**Obr. 2.14** Uspořádání mikrobolometrů [21]

Hlavními výhodami mikrobolometrů je jejich velká rychlost, citlivost a rozsah teplot, při kterých jsou schopny pracovat. Jejich vysoká integrovatelnost, s kterou souvisí malé celkové rozměry mikrobolometrů, z nich činí výhodné součástky pro infrakamery. Další výhodou je, že některé typy mikrobolometrů nepotřebují technologicky náročné chlazení a jsou použitelné v širokém spektru užití. Jejich hlavní nevýhodou zůstává vysoká cena. [21]

Infrakamery, které nepotřebují ke své operaci chlazení jsou většinou kompaktnější a cenově příznivější. Detektor v nechlazených systémech pracuje při okolní teplotě nebo při stabilizované teplotě, která se blíží teplotě okolí. Nevýhodou nechlazených systémů je jejich zmenšená citlivost a kvalita obrazu. Oproti tomu chlazené systémy využívají ke své funkci chlazené detektory, které značným způsobem zvětšují citlivost infrakamery. Tyto infrakamery jsou, ale velmi nákladné na výrobu a i na samotný provoz infrakamery. Rozměry infrakamery s chlazenými detektory jsou větší než s detektory nechlazenými. Práce s touto infrakamerou je náročnější jak po stránce obsluhy, tak po stránce časové. Před zahájením měření je nutno vždy vyčkat než se detektory nachladí na požadovanou teplotu. Běžnou operační teplotou chlazených detektorů je 80 K. [21]

## 2.6 Termogram

Infračervené záření je pro lidské oko neviditelné. Infrakamera umožňuje sledovat toto zařzení jako tepelný obraz, který je vyobrazen na displeji infrakamery nebo na počítačové obrazovce ve formě termogramu. Termovizní snímky jsou zobrazovány v barevných formách, které jsou pro lidské oko viditelnými. Termogram tedy přiřazuje neviditelným formám záření, různé palety barev, podle tepelného rozvrstvení. Tyto palety barev lze, většinou pro potřeby uživatele měnit takovým způsobem, jaký nejlépe vyhovuje potřebám měření. Jedná se zejména o zdůraznění nebo zvýraznění určitých oblastí na termogramu pro přesnější a názornější měření. Tentýž termogram lze tedy pomocí samotné infrakamery nebo za pomoci příslušného softwaru zobrazit v odlišných paletách barev. Standardně používané palety jsou duha, železo nebo paleta v odstínech šedé. [22]



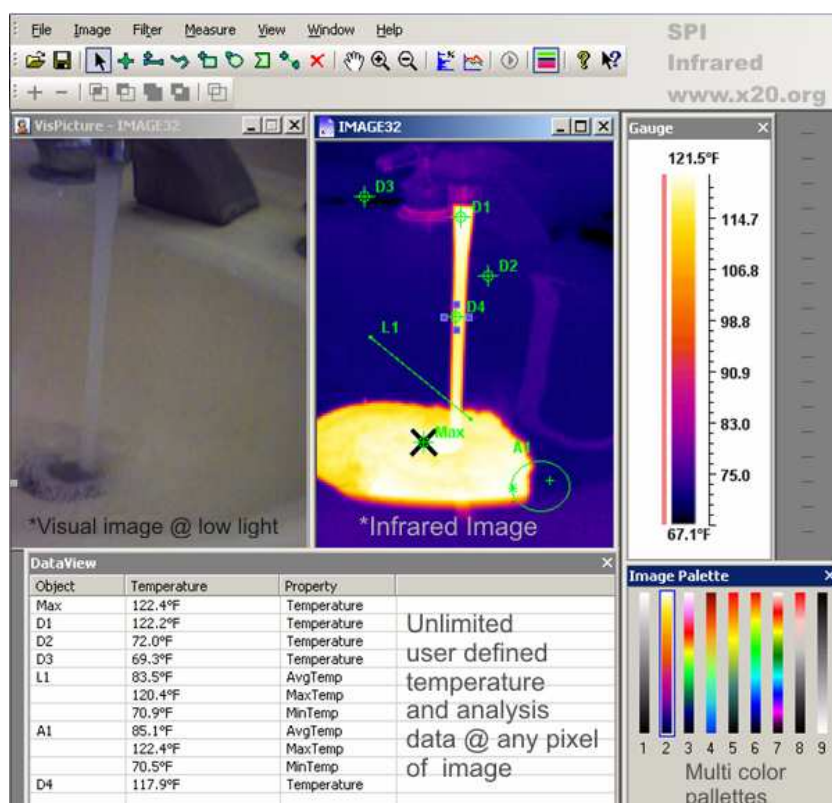
Obr. 2.15 První obrázek: Termogram v paletě duha, Druhý obrázek: Termogram v paletě železo [22]

Termogramy můžeme rozdělit na snímky radiometrické a neradiometrické (snímky pouze zobrazující). Neradiometrické snímky jsou snímky, které nám zobrazují pouze údaje o tepelném rozvrstvení na povrchu sledovaného objektu. Po uložení lze se snímkem pracovat pouze v omezeném rozsahu, nelze následně editovat parametry, které souvisí a jsou důležité pro přesné měření. [23]

Snímky, které umožňují měření teploty a nastavení parametrů měření nazýváme radiometrickými snímky. Tyto snímky umožňují editaci hlavních parametrů měření jako je emisivita, vzdálenost objektu, nebo propustnost atmosféry i po uložení snímku a to přímo

v infrakameře nebo následně v počítači pomocí vhodného softwaru. Radiometrické snímky nám rovněž umožňují měření teploty v jednotlivých bodech termogramu, je však nutné přesně zadat parametry, které se do infrakamery zadávají uživatelsky a které mohou nepříznivě ovlivnit výsledek měření. Na bodové měření má rovněž nemalý vliv velikost obrazového bodu, zvláště je-li bod ve velké vzdálenosti, může se stát, že měřený objekt bude menší než obrazový bod, potom dojde ke značnému ovlivnění měření okolím měřeného objektu. [24]

Příklad náhledu softwaru vhodného pro editaci a vyhodnocení termogramů je na obrázku 2.16, dnešní softwary nabízí široké možnosti jako nejrůznější barevné úpravy termogramů, změnu parametrů měření, tisku protokolů o měření a analýzu termogramů. [24]



Obr. 2.16 Software pro úpravu radiometrických termogramů [25]

### **3 Využití infrakamer**

Jedny z prvních infrakamer byly využívány hlavně pro vojenské účely, později infrakamery přešly do průmyslového a následně i komerčního využití. S postupujícím pokrokem a s příchodem nových technologií do tohoto odvětví se infrakamery stávají kompaktnějšími a mnohem dostupnějšími než kdykoli v minulosti. Infrakamery jsou využívány v mnohých oblastech lidských činností a můžeme je dělit podle nejrůznějších kritérií, viz. níže.

#### **3.1 Rozdělení infrakamer**

Dle druhu využití můžeme infrakamery rozdělit do následujících čtyř základních sektorů:

1. Nedestruktivní defektoskopie
2. Kontrola a řízení technologických procesů
3. Výzkum a vývoj
4. Speciální aplikace

Dle způsobu užití dělíme infrakamery na:

1. Stacionární
2. Přenosné

Dle oblasti využití můžeme infrakamery dělit na:

1. Pro vojenské a bezpečnostní účely
2. Pro průmyslové využití
3. Pro komerční využití



### 3.2 Základní využití infrakamer v praxi

V průmyslových účelech nacházejí infrakamery nejrozšířenější působení v elektrotechnice, energetice, stavebnictví a strojírenství.

Oblast využití infrakamer v praxi s příklady:

- energetika: kontroly rozvodů el. energie, jistících prvků, transformátorů, kabelů, vypínacích prvků
- elektrotechnika: vyhledávání zkratů, kontroly motorů, generátorů, jistících prvků, plošných spojů, poruchovost FV panelů
- strojírenství: namáhání ložisek, analýzy točivých strojů
- stavebnictví: analýza nedostatečné izolace, tepelné mosty, detekce vlhkosti kontroly po zateplení budovy
- automatizace: prevence požáru ve výrobě, kontrola výrobků, kontrola kvality
- detekce plynů: kontrola plynotěsnosti, hledání úniků plynů, detekce úniků plynu SF<sub>6</sub>
- medicína: neinvazivní diagnostické metody využití
- bezpečnost: oblast bezpečnostních technologií, např. hledání osob, využití pro záchranáře, kontroly osob na letištích
- vojenství: zaměřovací zařízení, detekce plynů, detekce přítomnosti různých chemických a biologických prvků



### 3.3 Využití infrakamer v budoucnosti

Se vzrůstající dostupností infrakamer lze očekávat, že se tato zařízení začnou pronikat do stále větší oblasti lidských činností. Infrakamery se budou více objevovat nejen v průmyslových segmentech, ale i v komerčním využití. Dnes je již možné nalézt infrakamery zabudované v osobních automobilech, kde slouží pro předcházení srážkám s chodci při nočních jízdách. Infrakamery se stávají díky zvyšování poptávky a objemu výroby cenově dostupnými, neustále se zlepšuje jejich rozlišení a citlivost.

Jelikož v posledních letech došlo k jistému navýšení alternativních zdrojů elektrické energie z fotovoltaických panelů, jsou vyvíjeny stacionární zařízení, které umí detekovat panely, které nepracují správně a tím eliminují vliv na účinnost elektráren. Takové zařízení tedy detekuje panely pracující v nevyhovujících režimech a tím napomáhá zvyšovat účinnost celého systému.

Dalším odvětvím, kde se dá očekávat prudký nárůst použití a vývoje nových aplikací pro infrakamery je stavebnictví. Vývoj nových a dokonalejších infrakamer bude napomáhat k lepší analýze objektů, při snaze o co nejnižší energetickou náročnost budov. Již dnes lze pomocí infrakamer automaticky detekovat místa s nedostatečnou izolací a potenciální místa pro kondenzaci vodní páry, v budoucnu budou tyto funkce rozšiřovány, bude dosahováno vyšší přesnosti měření, při snižující se uživatelské náročnosti.

Nejprogresivnějším odvětvím je výzkum a vývoj, v těchto odvětvích je kladen největší důraz na přesnost a citlivost snímačů infrakamer. Často jsou zde sledovány změny na teplotních polích zachycené v reálném čase v náročných aplikacích. Infrakamery jsou rovněž široce využívány pro zkoumání vesmíru. Používají se v širokoúhlých infračervených teleskopech.

Vývoj samotných infrakamer je však velice nákladný a dodnes se jím zabývá pouze několik firem po celém světě. Infrakamery nacházejí velice široké pole využitelnosti, avšak do jaké míry budou aplikovatelné bude v budoucnu záležet především na jejich cenové dostupnosti.

## 4 Termografie ve stavebnictví

S trendem neustálého snižování energetické náročnosti budov, jsou infракamery stále více využívány pro analýzu objektů a určení tepelných ztrát.

Infrakamery slouží ve stavebnictví k nedestruktivní, bezkontaktní a velmi rychlé analýze objektů. Nejčastěji jsou vyhodnocovány tepelné ztráty na povrchu pláště budov pro odhalení skrytých vad nebo konstrukčních nepřesností při návrhu budovy, které vykazují menší tepelný odpor. Pomocí této analýzy lze určit energeticky nejztrátovější místa na budově a provést následná preventivní opatření pro nejhodnější eliminaci těchto tepelných ztrát.

Infrakamery procházejí neustálým technologickým vývojem, proto se i neustále rozšiřuje možnost jejich využití. K základnímu měření tepelných mostů na obvodovém plášti budovy lze dnešními zařízeními také detekovat místa se zvýšenou vlhkostí a možnosti tvorby plísně.

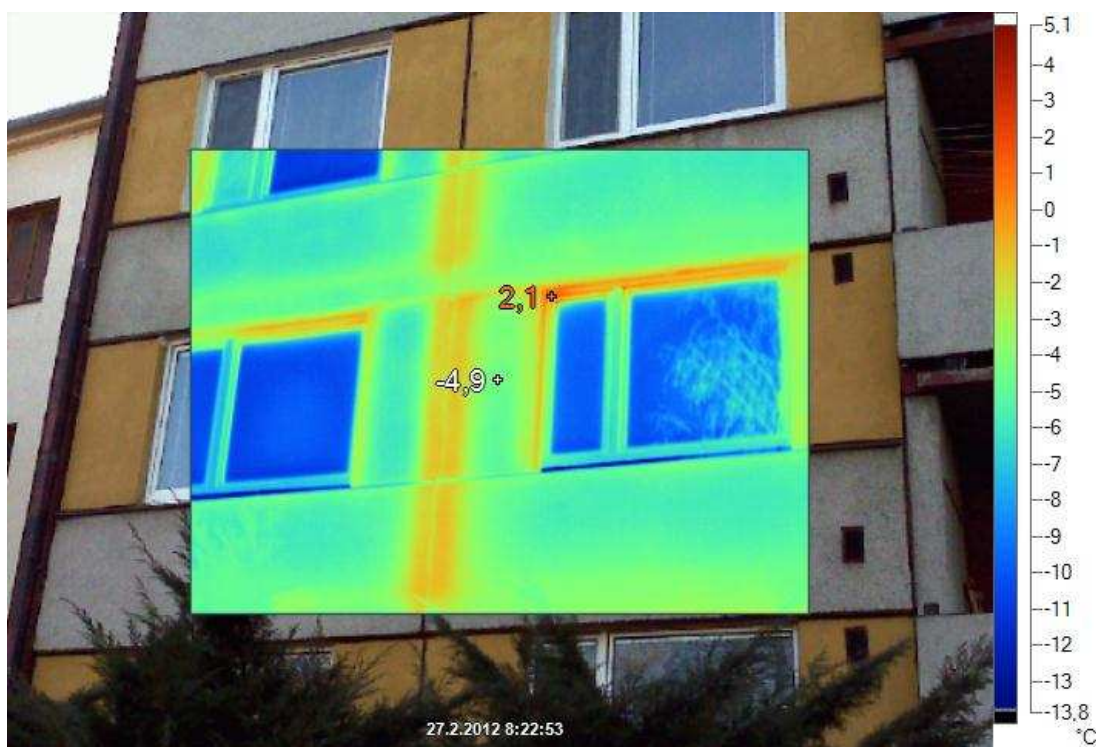
Infrakamerou lze ve stavebnictví moderně analyzovat, detekovat a kontrolovat následující procesy:

- analýza obvodového pláště
- detekce tepelných mostů
- detekce nedokonalé nebo narušené tepelné izolace
- analýza střešních konstrukcí
- detekce vlhkosti
- detekce míst s možností tvorby plísně
- odhalení povrchových trhlin v obvodovém plášti
- analýza podlahového vytápění
- pronikání vzduchu do objektu
- analýza rozvodů tepla v objektu
- netěsnosti oken
- kontrola kvality po zateplení objektu

## 4.1 Tepelný most

K největším únikům tepla z objektů dochází prostřednictvím tzv. tepelných mostů. Tepelné mosty jsou místa v konstrukci objektu, kterými dochází ke zvýšenému odvodu tepla směrem z objektu. Tyto tepelné mosty jsou zejména způsobeny nevhodným návrhem budovy, špatným konstrukčním řešením nebo použitím nevyhovujících materiálů.

Tepelné mosty je tedy vhodné co nejvíce eliminovat, nebo odstraňovat při snaze o dosažení co nejnižší energetické náročnosti objektu. V místě tepelného mostu lze zaznamenat vysoký pokles vnitřní povrchové teploty v tomto místě, což může zapříčinit zvýšenou vlhkost a následný vznik plísně, která je nežádoucí, ale i lidskému zdraví velmi nebezpečná. [26]

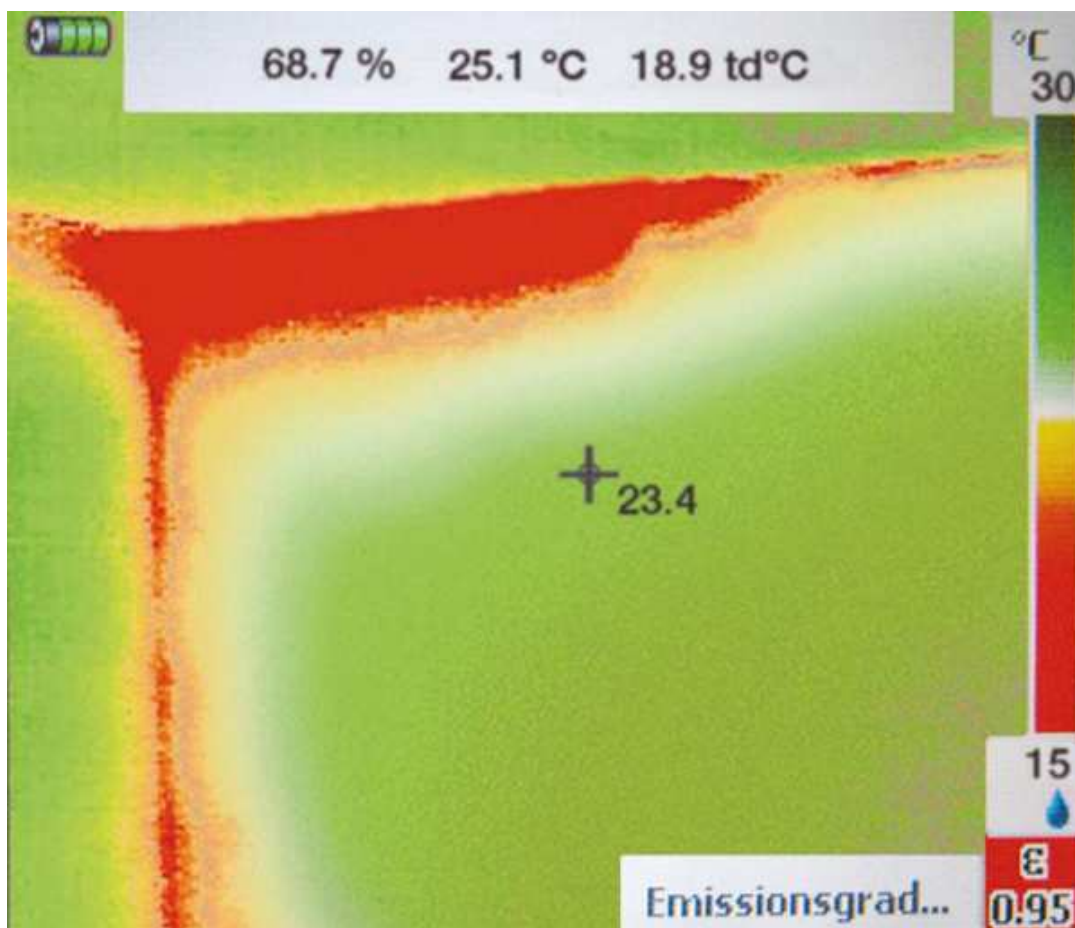


Obr. 4.1 Tepelný most zobrazený pomocí funkce obraz v obraze [27]

## 4.2 Rosný bod

Infrakamery umožňují zobrazení míst se zvýšenou vlhkostí, tedy míst, kde teplota klesá pod rosný bod a dochází ke kondenzaci vodních par, které zapříčiňují vznik nežádoucích plísní. Rosný bod je definován jako teplota, při níž je vzduch maximálně nasycen vodními parami.

Teplota rosného bodu se mění pro různé vlhkosti vzduchu. Se vzrůstající vlhkostí, roste i teplota rosného bodu, proto tím vyšší teplotu musí mít okolní vzduch, aby vodní pára následně nezkondenzovala. Detekce vlhkosti se využívá v interiérech objektů, obvodových zdivech, ale i střeších. Termogram zobrazující vlhkost v rohu místnosti je na obrázku 4.2. [26]



Obr. 4.2 Termogram zobrazující místo se zvýšenou vlhkostí [28]

## **5 Praktická část**

Obsahem této kapitoly diplomové práce je porovnání naměřených hodnot infrakamerou daného objektu s hodnotami určenými pomocí teoretického výpočtu v příslušném softwaru a následné zhodnocení.

V následujících dílčích kapitolách je popsána bližší specifikace daného objektu, stejně jako měření objektu infrakamerou s výslednými termogramy. Dále je uveden teoretický výpočet a modelování situace pomocí software Agros2D s příslušnými grafy. Závěrečná kapitola praktické části hodnotí dosažené výsledky a popisuje doporučení, která plynou z měření.

### **5.1 Měření objektu infrakamerou**

V dílčích kapitolách kapitoly 5.1 je podrobný popis měřeného objektu, jakožto i samotného měřicího přístroje. Je zde uveden proces měření infrakamerou, podmínky při měření a výsledné termogramy, sloužící jako nástroj pro srovnání výsledů měření s teoretickým výpočtem v následujících kapitolách.

#### **5.1.1 Specifikace měřeného objektu**

Jako měřený objekt jsem zvolil rodinný dům v okrese Beroun. Tento objekt byl postaven jako novostavba v roce 2012. Při měření byla zvolena jedna místnost objektu jako referenční. Tato místnost byla změřena ze všech vnějších stran a rovněž bylo v této místnosti provedeno interiérové měření pro teoretický výpočet a modelování situace v softwaru. Referenční místnost poslouží v modelové situaci jako prostředek pro ověření přesnosti měření infrakamerou v porovnání s teoretickým výpočtem a protože je objekt v současné době bez vnějšího zateplení a fasády, v teoretickém výpočtu je rovněž uveden vliv různých druhů zateplení objektu na jeho tepelné vlastnosti. Druh uvažované vnější tepelné izolace objektu vzešel z konzultace s majiteli objektu.

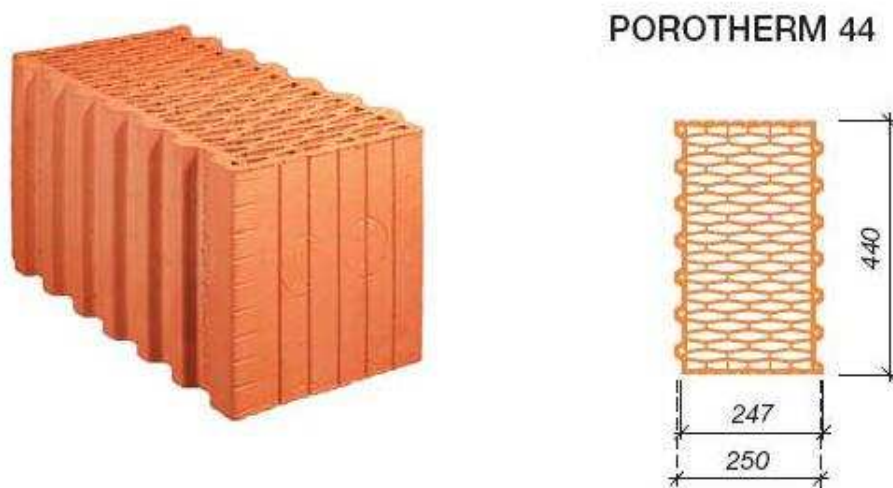
Parametry měřeného objektu nutné k výpočtům a měření:

Skleněné tabule: Izolační dvojsklo o síle 26 mm

$$\text{Součinitel tepelné vodivosti } \lambda = 1,4 \left[ \frac{W}{mK} \right]$$

Obvodové zdivo: Porotherm 44

$$\text{Součinitel tepelné vodivosti } \lambda = 0,14 \left[ \frac{W}{mK} \right]$$



Obr. 5.1 Tvárnice Porotherm 44 [29]

Uvažovaný druh vnější izolace: Fasádní polystyren Isover ESP 150 S (5 cm a 10 cm)

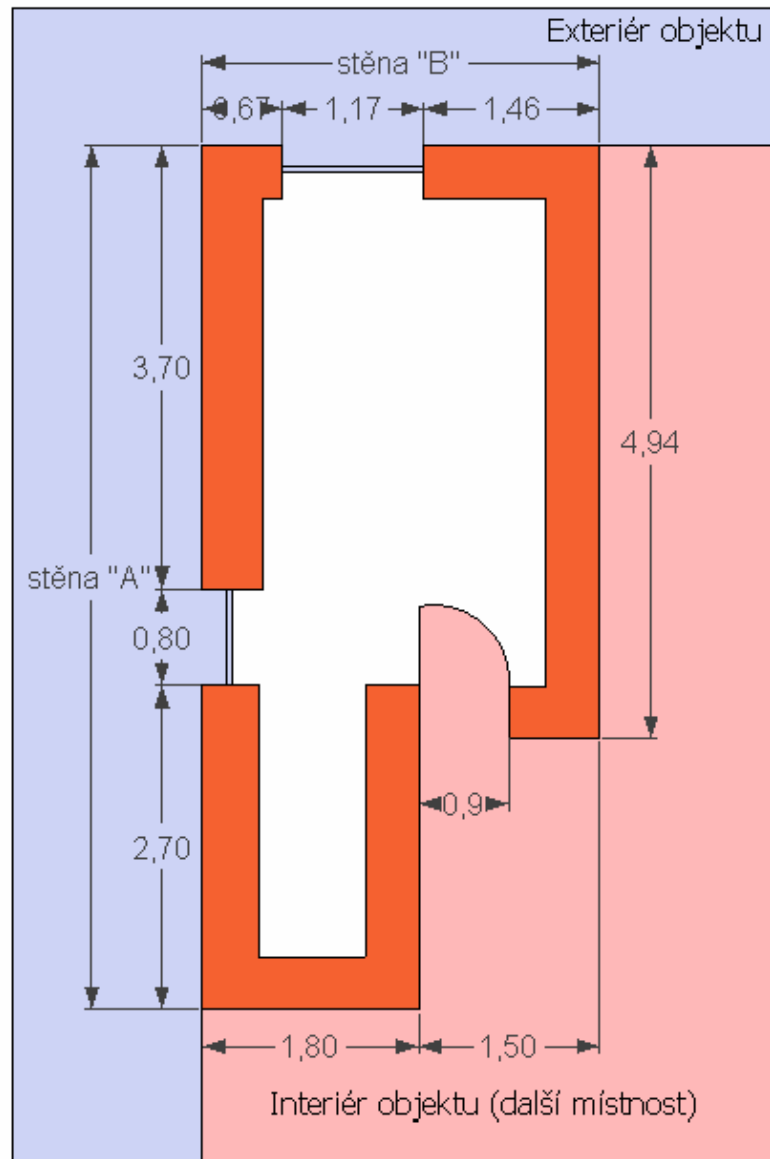
$$\text{Součinitel tepelné vodivosti } \lambda = 0,035 \left[ \frac{W}{mK} \right]$$



Obr. 5.2 Fasádní polystyren Isover ESP 150 S [30]

Na následujícím obrázku 5.3 je znázorněn náčrt referenční místnosti, veškeré rozměry uvedené v náčrtu jsou v metrech. Referenční místnost byla změřena ze všech vnějších i vnitřních stran objektu. Z náčrtu jsou patrné rozměry místnosti, tloušťka zdiva je při použitém materiálu Porotherm 44 cm.

Referenční místnost objektu se sestává ze dvou obvodových stěn, které jsou vystaveny vnějším vlivům, na náčrtu je vnější prostor znázorněn modrou barvou a označen jako exteriér objektu. Vnější stěny jsou označeny jako stěna „A“ a stěna „B“. Ostatní stěny referenční místnosti jsou stěny vnitřní, které jsou sdílené s jinými místnostmi objektu, což je v náčrtu pro přehlednost znázorněno světle červenou barvou, tento prostor je označen jako interiér objektu (další místnost).



Obr. 5.3 Náčrt referenční místnosti [31]



Na obrázku 5.4 a 5.5 je vyfotografován měřený objekt. V obrázcích jsou červenou barvou zvýrazněny vnější stěny referenční místnosti.



Obr. 5.4 Fotografie referenční místnosti s vyznačenou stěnou „B“ [32]



Obr. 5.5 Fotografie referenční místnosti s vyznačenou stěnou „A“ [33]



### 5.1.2 Technické informace o infrakameře

Použitým měřidlem je infrakamera značky FLIR typ T335. Tato kamera tvoří dle svých užitných vlastností střední třídu infrakamer značky FLIR. Pro použití v oblasti diagnostiky staveb obsahuje nadprůměrný teplotní rozsah a citlivost detektoru. Za zmínku stojí i její velký displej a vlastnosti, které napomáhají v diagnostice staveb jako je funkce obraz v obraze (reálný obraz se prolíná s termogramem), nahrávání mluvených poznámek k jednotlivým termogramům a vysoká konektivita infrakamery, viz. technická specifikace. [34]

#### Technická specifikace:

Teplotní rozsah:	od -20 °C do 650 °C
Detektor:	rozlišení 320 x 240 pixelů, nechlazený mikrobolometr
Citlivost:	0,05 °C
Zoom:	1x až 2x digitální zoom
Obrazovka:	3,5“ dotykový, barevný LCD displej
Záznam:	SD karta, USB disk
Hmotnost:	880 g včetně baterie
Snímky:	radiometrické, editovatelné pomocí dodávaného programu FLIR QuickReport [34]



Obr. 5.6 Infrakamera FLIR T335 [34]

### 5.1.3 Popis měření infrakamerou

Měření objektu probíhalo za asistence konzultanta ZČU FEL Ing. Stanislava Jiřince zapůjčenou infrakamerou FLIR T335.

Infrakameru není nutné před samotným měřením nastavovat, jelikož jsou termogramy z infrakamery radiometrické, lze veškeré potřebné parametry doplnit do termogramu až v příslušném počítačovém software, což je velice výhodné jak z časového hlediska, tak i z ohledu, že parametr jako např. emisivita, nelze vždy jednoznačně určit. Demonstrativně byl infrakamerou změřen celý objekt, důkladněji byla posléze proměřena zejména referenční místnost objektu a to jak ze strany vnější, tak ze strany vnitřní.

Při měření infrakamerou byly rovněž změřeny parametry prostředí, které jsou důležité, z hlediska správného měření. Parametry prostředí byly následně doplňovány k výsledným radiometrickým termogramům, čímž značným způsobem přispívají k přesnosti celého měření infrakamerou. Výsledné termogramy z měření jsou obsaženy v následující kapitole 5.1.4.

#### Parametry prostředí při měření:

Teplota vně objekt: -2 °C

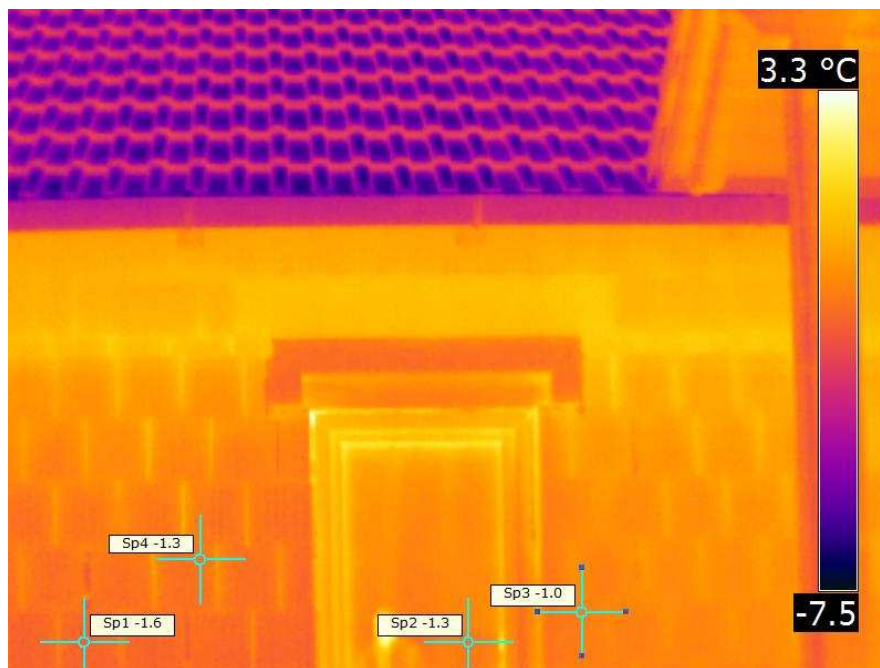
Teplota uvnitř objektu: +12 °C

Vlhkost vně objektu: 62 %

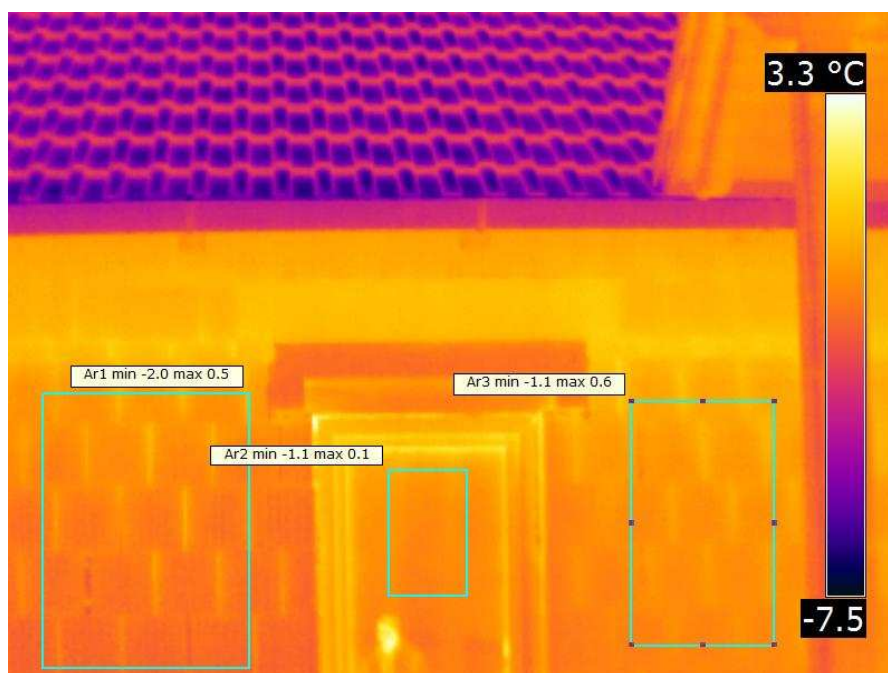
Vlhkost uvnitř objektu: 56 %

### 5.1.4 Naměřené termogramy

Termogramy byly upraveny pomocí software FLIR QuickReport, který je součástí infrakamery. V termogramech bylo v prvním kroku provedeno bodové měření teploty viz. obr. 5.7 a 5.9, následně ve druhém kroku bylo provedeno plošné měření teploty obr. 5.8 a 5.10, ze kterého vzešly průměrné hodnoty teploty. Tyto průměrné teploty slouží jako porovnávací činitele k teoretickému výpočtu v následující kapitole. Teploty byly odečteny z programu FLIR QuickReport.

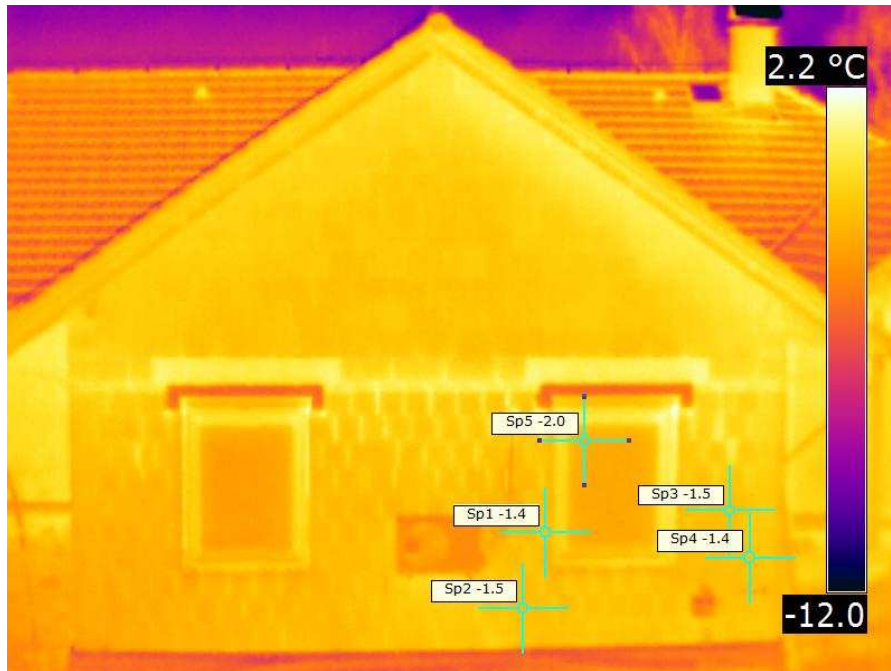


Obr. 5.7 Termogram vně ref. místnosti stěna „A“, bodové hodnoty teploty [35]



Obr. 5.8 Termogram vně ref. místnosti stěna „A“, hodnoty teploty na ploše [36]

Průměrná teplota stěny „A“ vně ref. místnosti: -1,3 °C

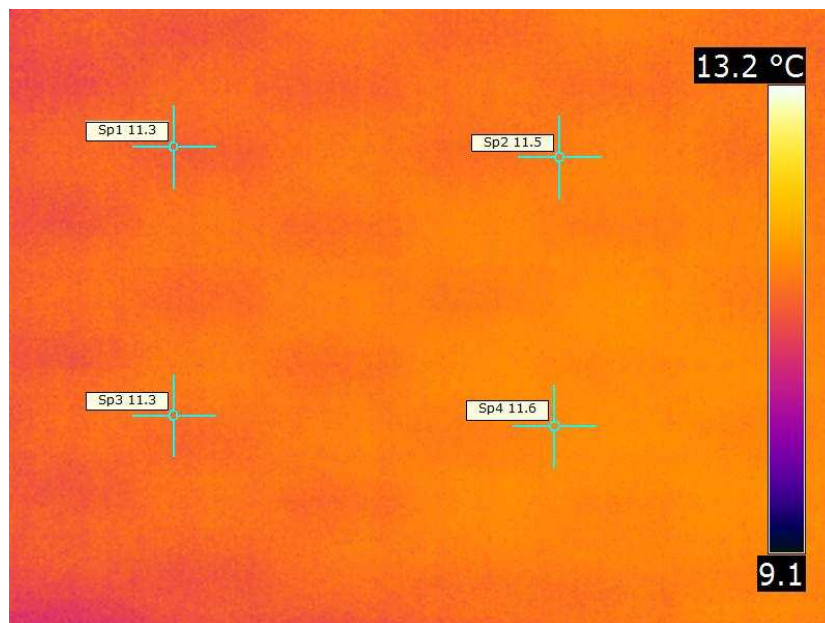


Obr. 5.9 Termogram vně ref. Místnosti stěna „B“, bodové hodnoty teploty [37]



Obr. 5.10 Termogram vně ref. místnosti stěna „B“, hodnoty teploty na ploše [38]

Průměrná teplota stěny „B“ vně ref. místnosti: -1,4 °C



Obr. 5.11 Termogram uvnitř ref. místnosti „A“, bodové hodnoty teploty [39]

Průměrná teplota stěny „A“ uvnitř ref. místnosti: +11,4 °C

Při porovnání teplot na termogramech vně referenční místnosti stěn A a B, je patrné, že průměrná teplota stěny A je vyšší o 0,1 °C než teplota stěny B. Tento jev může být způsoben jednak polohou celého objektu, protože stěna A se nachází v závětrří a není do takové míry ovlivňována povětrnostními vlivy. Další možností zvýšené teploty stěny A je navazující přilehlá místnost, která tvoří přirozenou bariéru této stěně (viz. obr. 5.4 na pravé straně).

Termogramy z vnitřní části referenční místnosti se nepodařilo vytvořit v dostatečné kvalitě, vzhledem k rozlišovací schopnosti infrakamery a vnitřním rozměrům referenční místnosti. Z tohoto důvodu je uveden pouze jeden termogram stěny A.

## 5.2 Výpočet pomocí software

Teoretický výpočet v software byl proveden za pomoci programu Agros2D. V software byla namodelována celá situace problému v referenční místnosti. Referenční místnost objektu byla zakreslena do programu dle obr. 5.3. Do programu byly zaneseny rovněž okrajové podmínky a parametry použitých materiálů (viz. kapitola 5.1.1), které byly čerpány z příslušných technických tabulek těchto materiálů pro co nejpřesnější výpočet.

Výsledkem modelování v software Agros2D je určení teploty na vnější straně referenční místnosti, vynesení příslušných grafů a namodelovaných obrázků. Stanovení případových studií v případě zateplení místnosti, dvěma druhy izolace.

### 5.2.1 Software Agros2D

Tento software byl vyvinut na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU. Jedná se o víceplatformovou aplikaci, která slouží k řešení fyzikálních problémů a je založena na knihovně Hermes2D (slouží k řešení diferenciálních rovnic v závislosti na metodě konečných prvků). Agros2D prochází neustálým vývojem, aktualizacemi, vylepšeními a je pod správou doc. Ing. Pavla Karbana, Ph.D. [40]

Pomocí Agros2D lze řešit:

- elektrostatické pole
- magnetické pole
- elektrické proudové pole
- teplotní pole
- strukturální mechanika
- akustické pole
- obecné pole

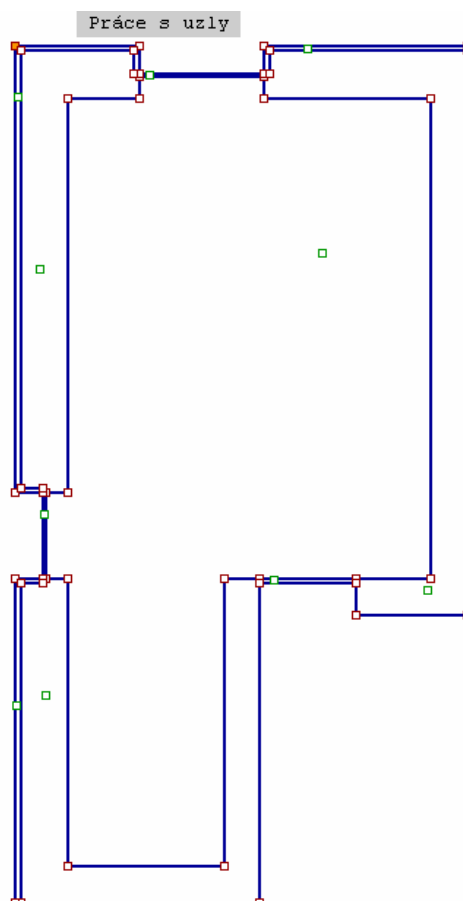
Agros2D je volně šiřitelný a distribuovatelný software podle podmínek GNU (General Public Licence). Software je alternativou výpočetním programům FEMM nebo Matlab. [37]



## 5.2.2 Postup při zpracování projektu v Agros2D

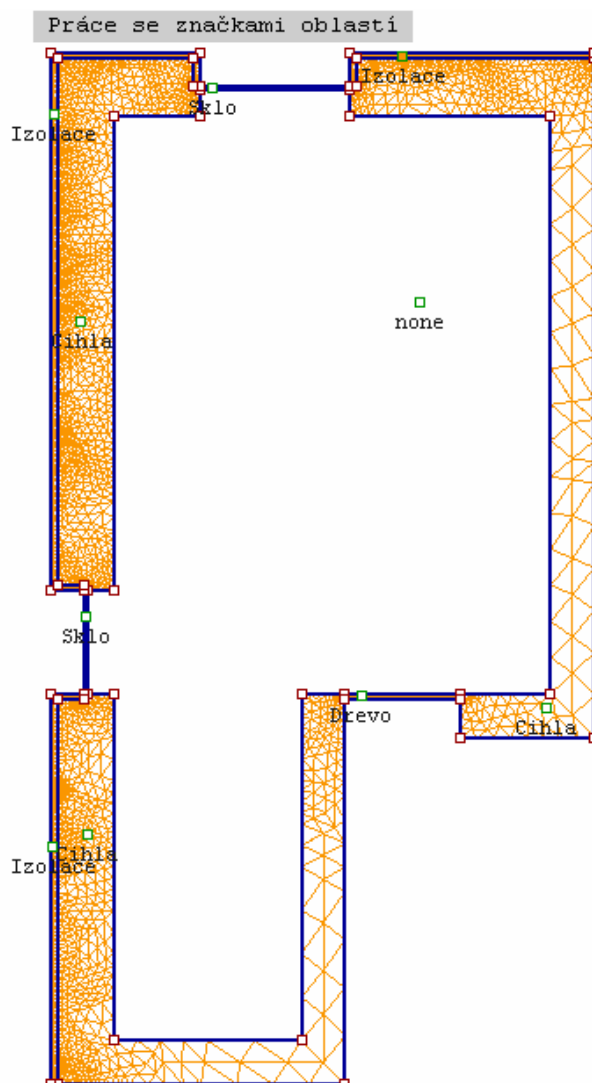
V první fázi práce v Agros2D bylo nejprve nutné nakreslit celou situaci problému (nakreslit definiční oblast pro řešení). K tomuto účelu slouží v programu uzly a hrany pomocí kterých, lze situaci zakreslit. Nákres projektu byl nejprve vytvořen v programu Google SketchUp, který slouží jako program pro jednoduché rýsování (obr. 5.3), tento nákres následně posloužil jako předloha pro překreslení do programu Agros2D.

Po vytvoření definiční oblasti (obr. 5.12), byly nadefinovány značky oblastí (zelené body v obr. 5.12), které slouží každé uzavřené oblasti a lze s jejich pomocí přiřadit této oblasti charakteristické materiálové vlastnosti. Následně byly do programu zadány okrajové podmínky a materiály, které jsou přiřazeny jednotlivým oblastem. Materiálové vlastnosti a okrajové podmínky jsou uvedeny v kapitole 5.1.1 a 5.1.3.



Obr. 5.12 Definiční oblast projektu [41]

Další fází je diskretizace problému. Tato fáze vytvoří v definiční oblasti výpočtovou síť, která je vytvořena na základě diferenciálních rovnic, popisujících konkrétní problém. Jiným úkolem této fáze je ověření uzavřenosti všech nadefinovaných oblastí a přiřazení všech značek oblastí všem oblastem. Každá oblast musí být pro řešení problému uzavřená, pokud uzavřená není, nelze provést diskretizaci a program zahlásí chybu. Rovněž je nutné, aby každá oblast obsahovala právě jednu značku oblasti, pokud jedna oblast obsahuje více značek oblastí nebo žádnou značku oblasti, program znovu zahlásí chybu a diskretizace nebude provedena. Na obr. 5.13 je znázorněna diskretizace řešeného projektu.



Obr. 5.13 Diskretizace definiční oblast projektu [42]

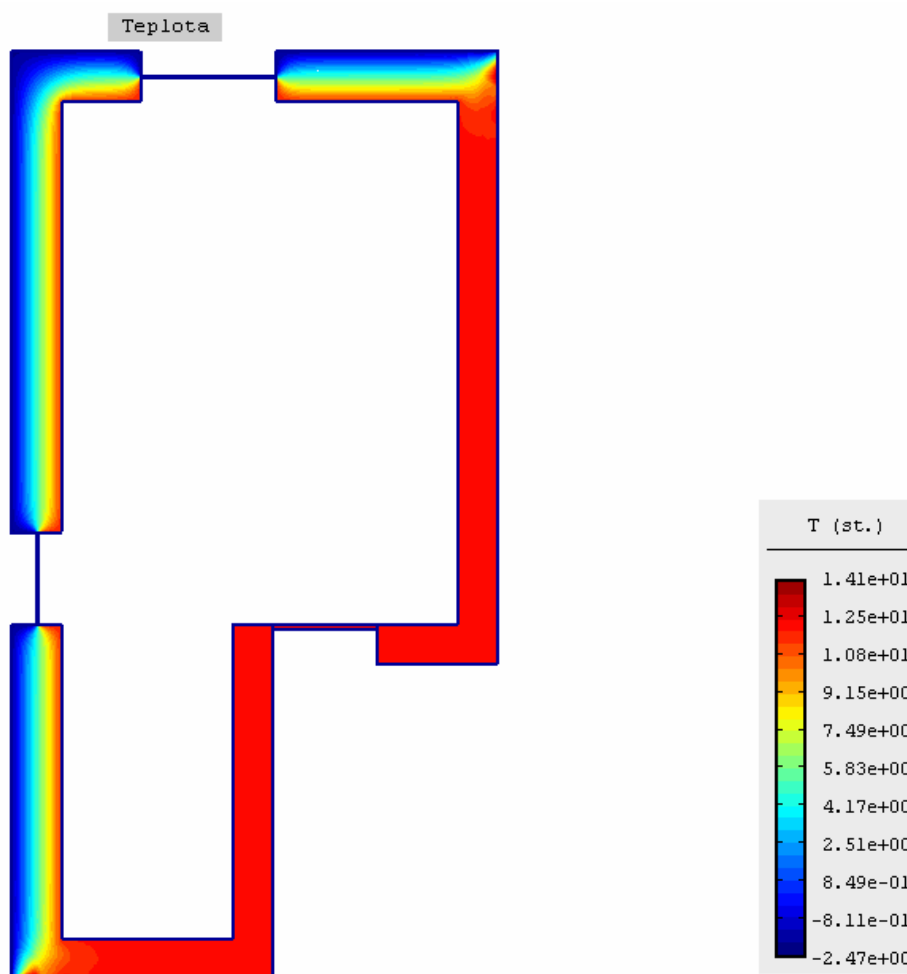


### 5.2.3 Výsledné grafy

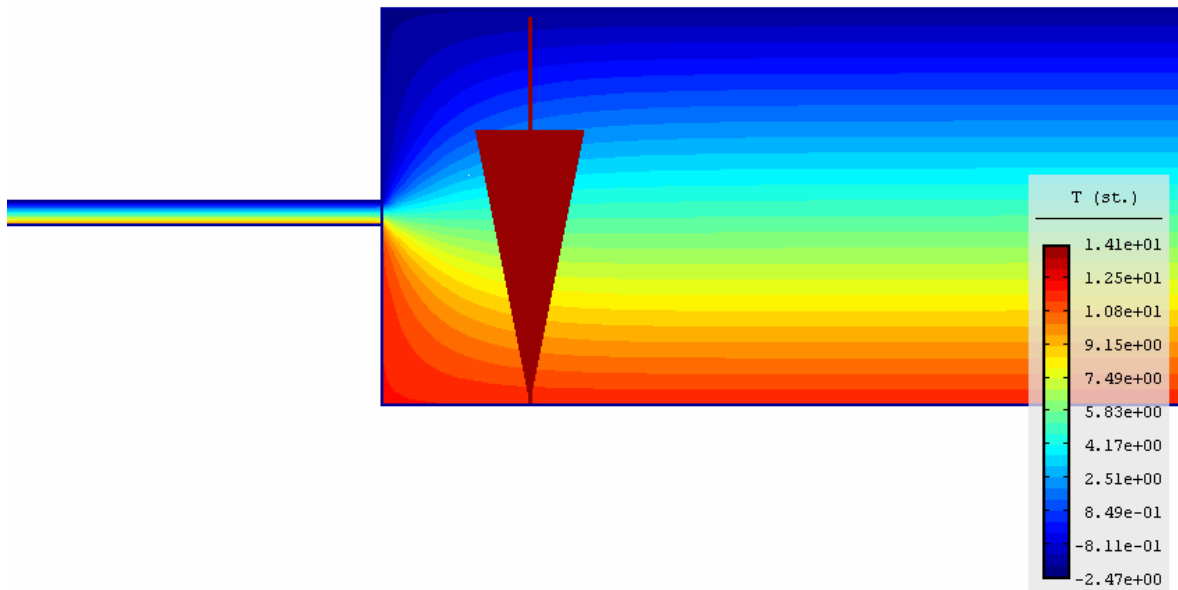
Pokud byla úspěšně provedena v Agros2D diskretizace, projekt je úspěšně vytvořený a připraven pro výsledné vyřešení problému a modelování celé situace. Po vyřešení, je definiční oblast vyobrazena v barevném spektru, které dle legendy přiřazuje barvy jednotlivým teplotám od nejchladnější – tmavomodré až po nejteplejší – tmavočervenou.

#### 5.2.3.1 Výsledné grafy projektu

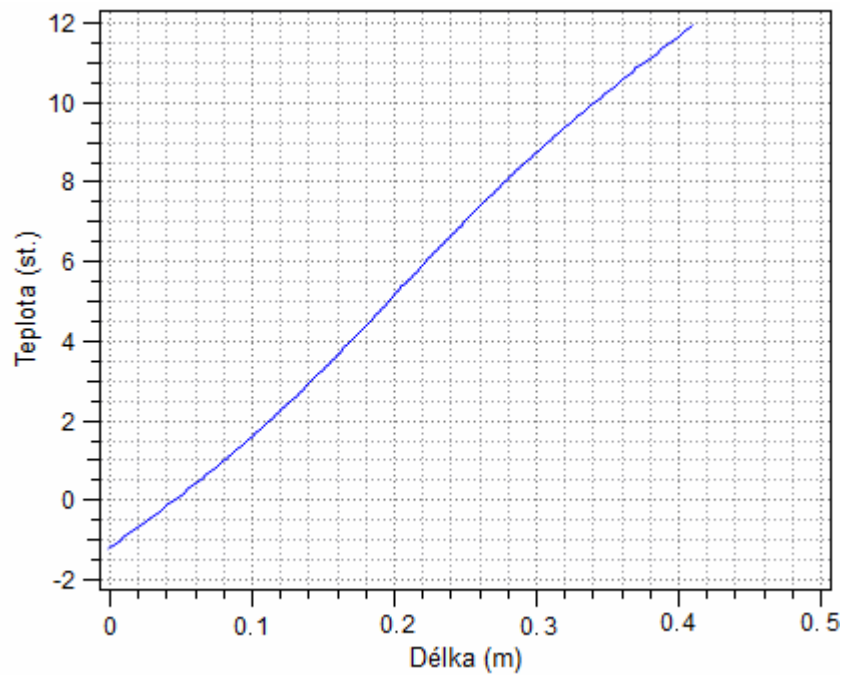
Na následujícím obrázku 5.14 je výsledný prostup tepla definiční oblastí, namodelovaný dle reálné situace objektu. Obrázek 5.15 znázorňuje detail prostupu tepla u okna – šipka znázorňuje směr grafu, která je na obrázku 5.16.



Obr. 5.14 Prostup tepla v definiční oblasti [43]



Obr. 5.15 Detail prostupu tepla (šipka označuje směr grafu) [44]

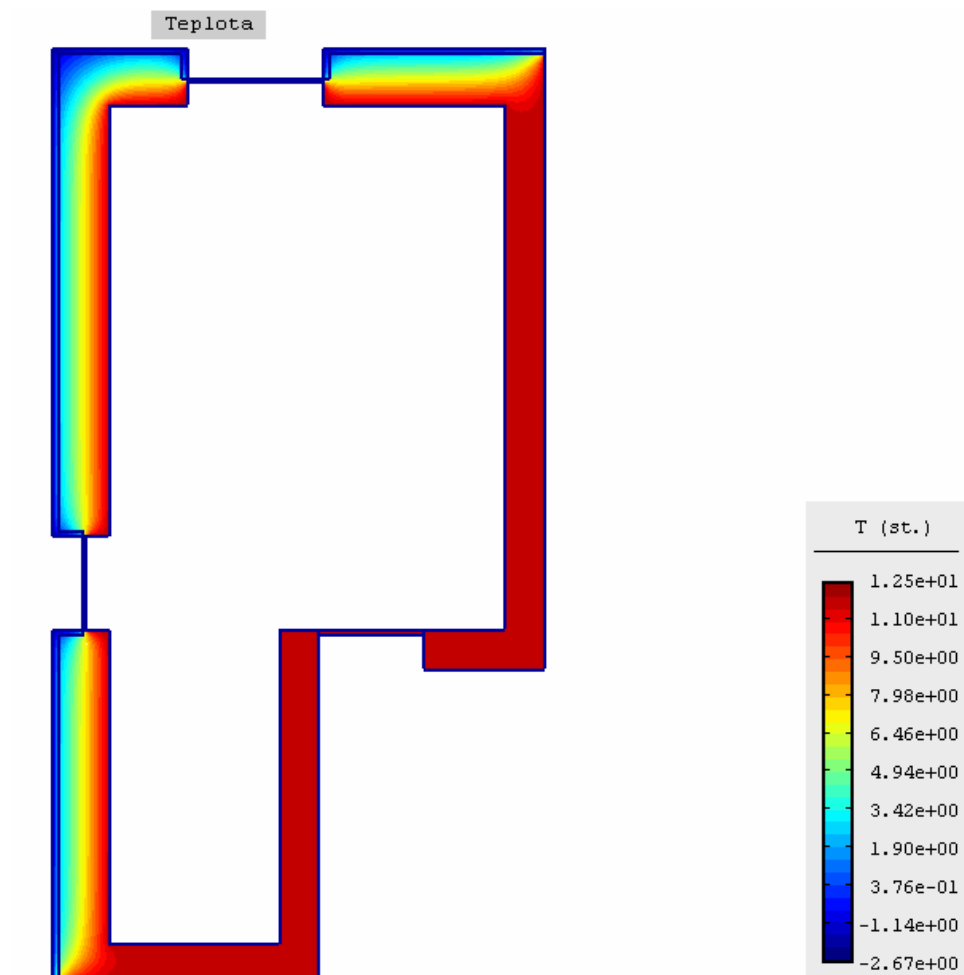


Obr. 5.16 Graf průběhu teploty [45]

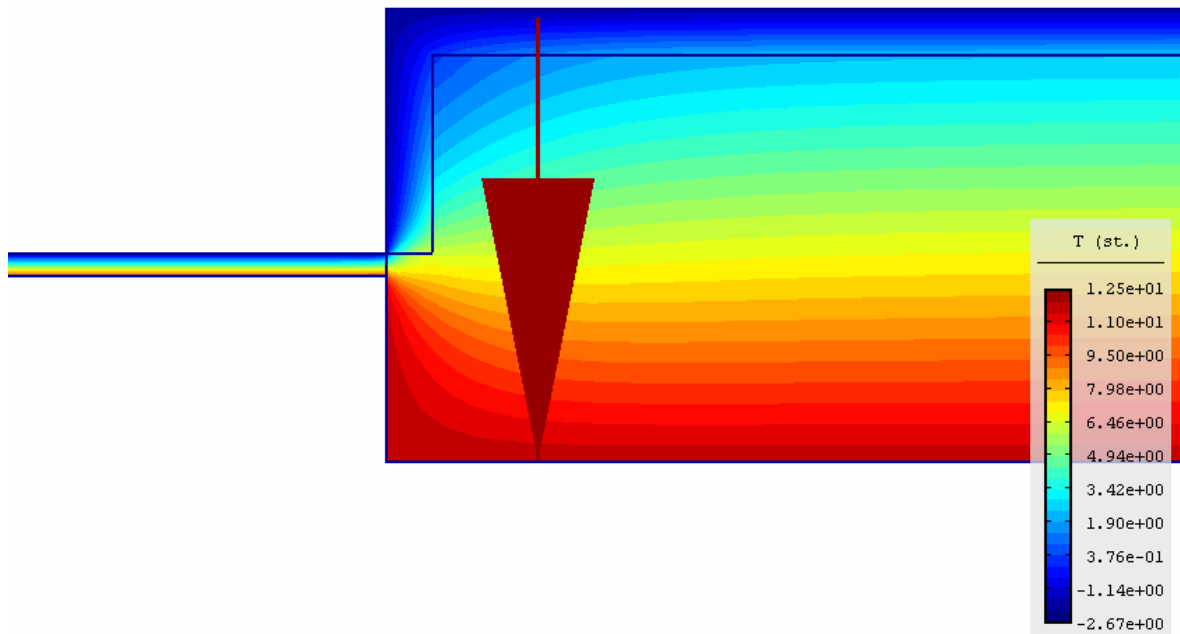
Z obrázků 5.14 a 5.15 plyne, že simulace proběhla správně. Teploty přibližně odpovídají naměřeným, důvodem vysokých teplot v ostatních stěnách v porovnání se stěnami A a B jsou přilehlé místnosti objektu – simulace tudíž proběhla správně. Z grafu je patrné, že teplota ve stěně klesá konstantně, tento jev je vysvětlen v následující kapitole 5.3.

### 5.2.3.2 Výsledné grafy s uvažovanou izolací 5 cm

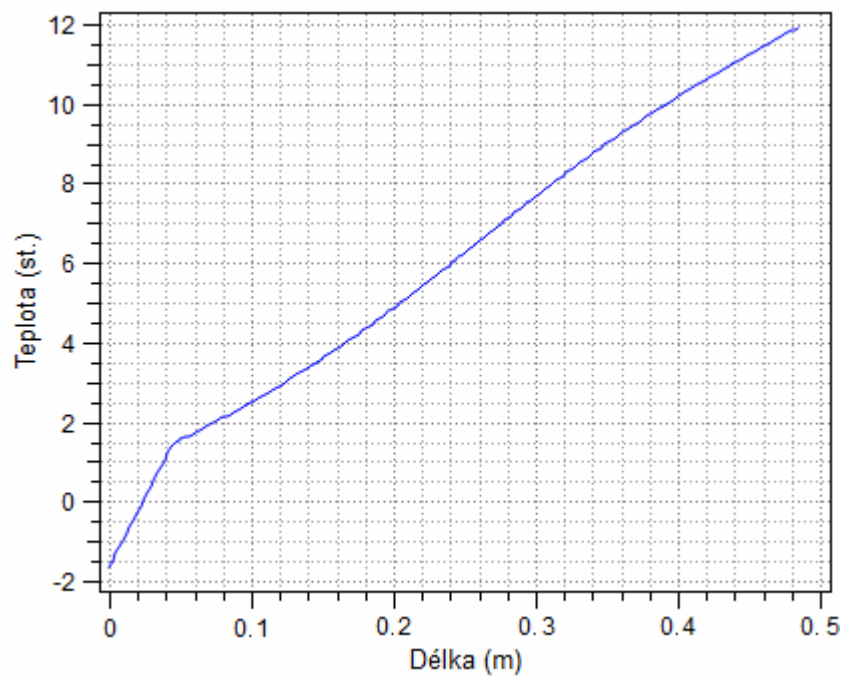
Po namodelování reálné situace, byla modelována situace s uvažovanou tepelnou izolací. Definiční oblast byla překreslena a byla přidána izolace, z hlediska sledování měnících vlivů tepelné izolace na tepelné vlastnosti definiční oblasti. V první fázi byla použita 5 cm silná tepelná izolace, s materiálovými vlastnosti viz. kapitola 5.1.1.



Obr. 5.17 Prostup tepla v definiční oblasti [46]



Obr. 5.18 Detail prostupu tepla (šipka označuje směr grafu) [47]



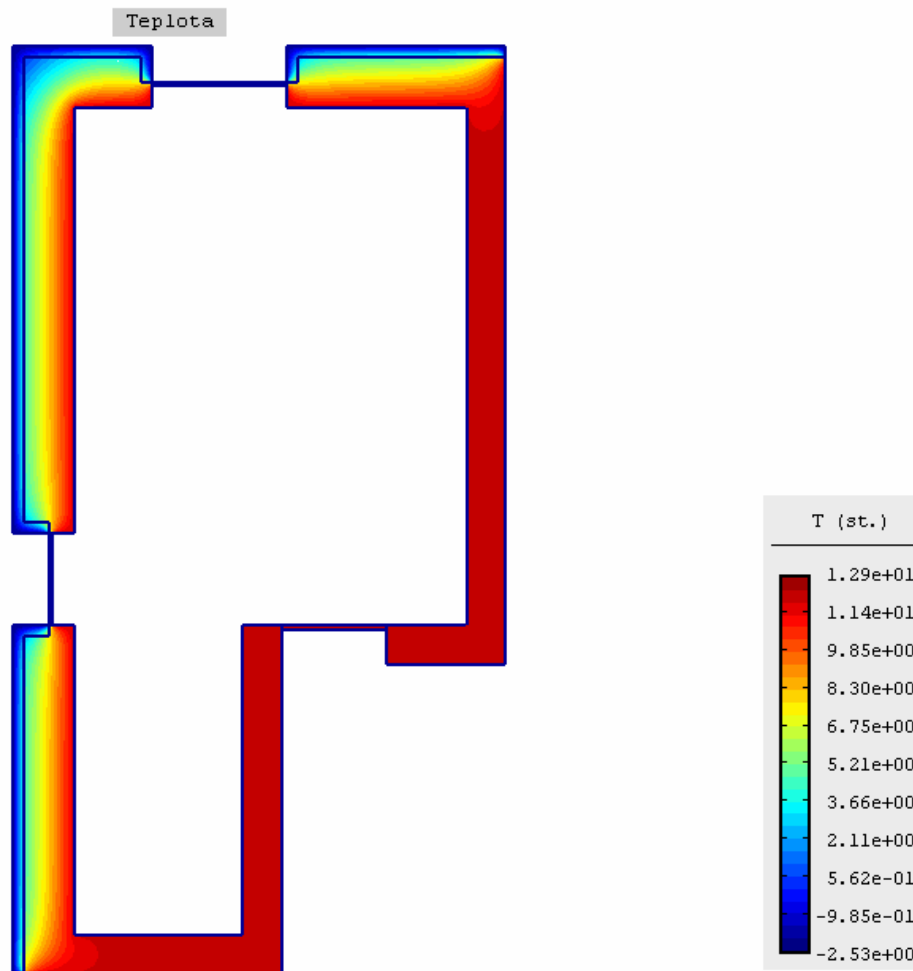
Obr. 5.19 Graf průběhu teploty [48]

Na grafu se tepelná izolace projevila jako zlom. Při srovnání grafu na obr. 5.16 (graf reálné situace bez izolace) je na první pohled patrný příznivý vliv izolace, graf 5.16 začíná u hodnoty  $-1,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kdežto graf na 5.19 až u hodnoty  $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což svědčí o lepších izolačních vlastnostech (definiční oblast nepropouští teplo směrem ven).

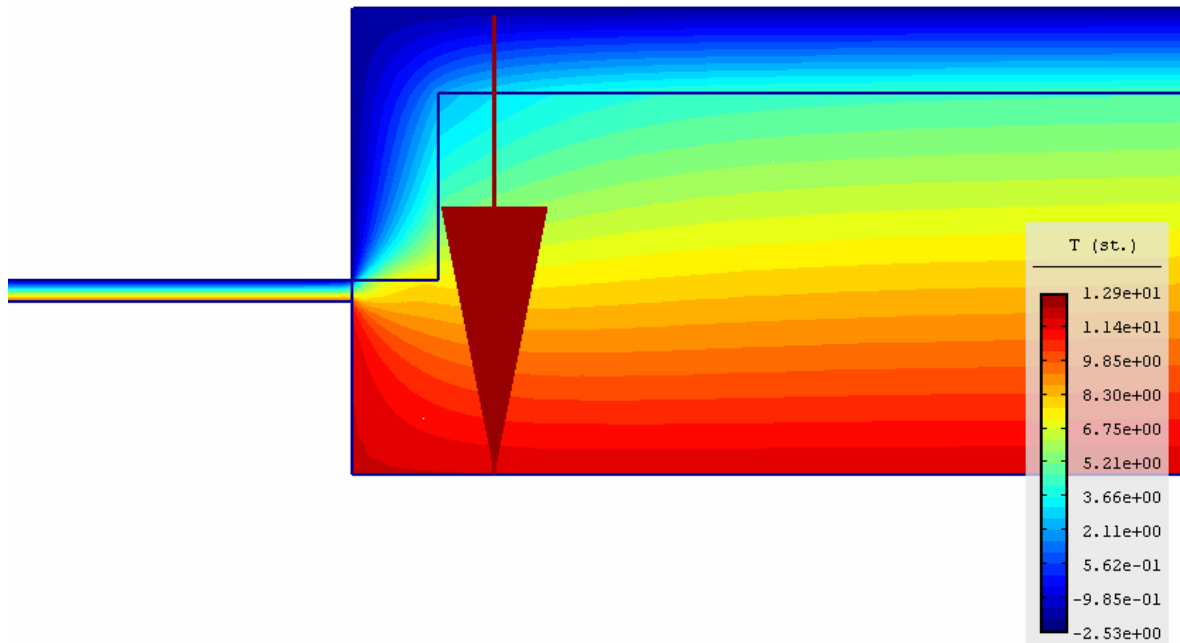
### 5.2.3.3 Výsledné grafy s uvažovanou izolací 10 cm

V poslední fázi byla namodelována definiční oblast s tepelnou izolací o síle 10 cm. Dle předpokladů by tento druh izolace měl vytvořit nejlepší výsledky z hlediska tepelných vlastností definiční oblasti oproti předchozím dvou příkladům.

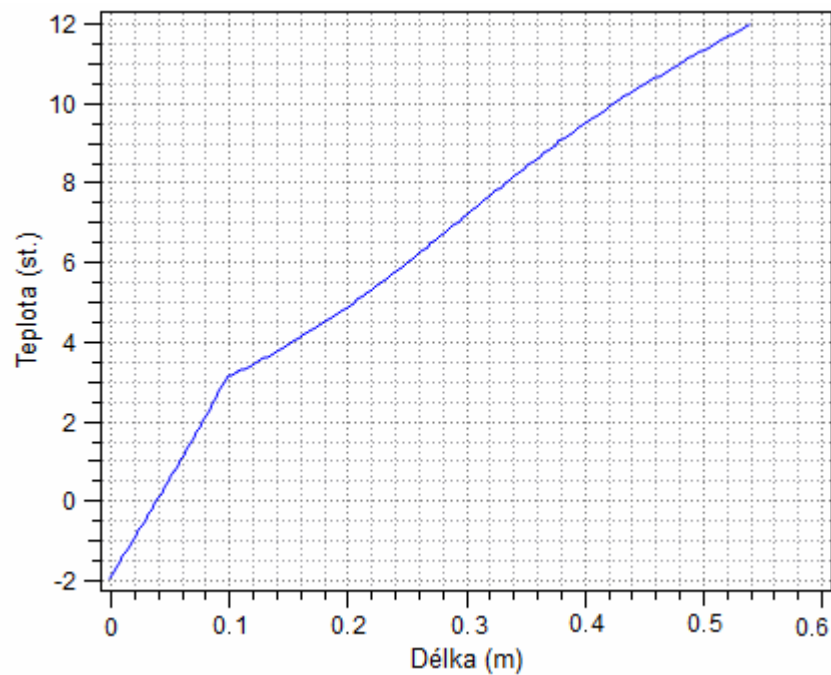
Tento druh izolace lze označit za v praxi používanější, z hlediska poměru ceny a tepelně izolačních vlastností.



Obr. 5.20 Prostup tepla v definiční oblasti [49]



Obr. 5.21 Detail prostupu tepla (šipka označuje směr grafu) [50]



Obr. 5.22 Graf průběhu teploty [51]

Graf v tomto případě vyšel ještě příznivěji, dle předpokladu než graf na obr. 5.19. Z grafu lze vyčíst, že teplota zdiva je  $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což při naměřené venkovní teplotě  $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  svědčí o výtečných izolačních vlastnostech, teplo je nyní propouštěno směrem ven v minimální míře.

### 5.3 Teoretický výpočet prostupu tepla

Teoretický výpočet slouží pro porovnání hodnot se získanými hodnotami pomocí praktického měření a pro porovnání hodnot získaných ve výpočtovém softwaru.

Hodnoty nutné pro teoretický výpočet:

$$T_i = 12 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{Teplota v interiéru}$$

$$T_e = -2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{Teplota v exteriéru}$$

$$d = 0,44 \text{ [ m ]} \quad \text{Délka stěny (v tomto případě délka zdiva)}$$

$$R_{si} = 0,13 \left[ \frac{m^2 K}{W} \right] \quad \text{Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce}$$

(ČSN EN ISO 6946)

$$R_{se} = 0,04 \left[ \frac{m^2 K}{W} \right] \quad \text{Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce}$$

(ČSN EN ISO 6946)

$$\lambda = 0,14 \left[ \frac{W}{m K} \right] \quad \text{Součinitel tepelné vodivosti uvažovaného zdiva}$$

Teoretický výpočet je proveden pomocí Fourier-Kirchhoffovy rovnice, která slouží k výpočtu prostupu tepla a je upravena pro řešení ustáleného stavu. Výsledná rovnice nabývá tvaru  $T_x = T_i - q(R_{si} + \sum R_x)$ , pro dosazení do této rovnice je nejprve nutné vypočítat tepelný odpor  $R$  a hustotu tepelného toku  $q$ . Postup výpočtu viz. další strana.

Vztah pro výpočet tepelného odporu:

$$R_1 = \frac{d}{\lambda}$$

kde

$$R \quad \text{tepelný odpor} \left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$\lambda \quad \text{součinitel tepelné vodivosti} \left[ \frac{W}{m K} \right]$$

$$d \quad \text{délka} [m]$$

Vztah pro výpočet celkového tepelného odporu:

$$R_c = R_1 + R_{si} + R_{se}$$

Po dosazení do vztahu dostaneme:

$$R_c = R_1 + R_{si} + R_{se} = \frac{0,44}{0,14} + 0,13 + 0,04 = 3,31 \left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$$

Následně bude vypočtena hustota tepelného toku ze vztahu:

$$q = \frac{T_i - T_e}{R_c}$$

kde

$$q \quad \text{hustota tepelného toku} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$



Po dosazení do vzorce získáme:

$$q = \frac{T_i - T_e}{R_c} = \frac{12 - (-2)}{3,31} = 4,23 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Pro výpočet teploty na vnitřní a vnější straně stěny zvolíme:

$$T_x = T_i - q(R_{si} + \sum R_x)$$

kde

$$T_x \quad \text{teplota [}^\circ\text{C]}$$

Teplota na vnitřní straně stěny:

$$T_{xi} = T_i - q(R_{si} + \sum R_x) = 12 - 4,23(0,13) = 11,45[^\circ\text{C}]$$

Teplota na vnější straně stěny:

$$T_{xe} = T_i - q(R_{si} + \sum R_x) = 12 - 4,23\left(0,13 + \frac{0,44}{0,14}\right) = -1,84[^\circ\text{C}]$$

## 5.4 Porovnání teoretické výpočtu s praktickým měřením

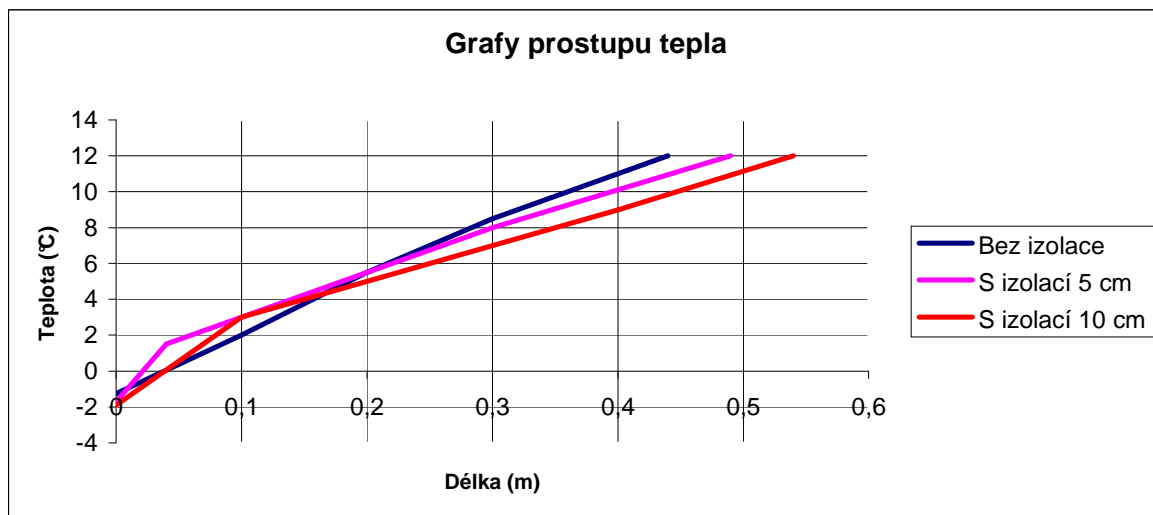
Cílem práce je zhodnocení a porovnání výsledků získaných praktickým měřením na infrakameře s výsledky získanými teoretickým výpočtem a výpočtem v příslušném softwaru. Porovnání výsledků bylo vztaženo na dvě referenční stěny A a B (viz. kapitola 5.1.1).

Průběh praktického měření na infrakameře i s příslušnými termogramy je popsán v kapitole 5.4.1, přičemž nejdůležitějšími činiteli jsou průměrné teploty referenčních stěn A a B. Stěny byly změřeny na vnější i vnitřní straně. Vnější měření teploty proběhlo úspěšně, avšak vzhledem k rozlišovacím schopnostem kamery a rozměrům referenční místnosti, byla změřena na vnitřní straně pouze místnost A. Hodnoty měření jsou uvedeny v tabulce na obr. 5.23.

Teoretický výpočet ve výpočtovém software, byl namodelován dle reálné situace referenční místnosti. Z grafu na obr. 5.16 prostupu tepla stěnou, lze odečíst počáteční i koncovou teplotu, které reprezentují teplotu na vnější a vnitřní straně stěny. Je nutno podotknout, že při teoretickém výpočtu se teploty stěny A a B nelišily, z tohoto důvodu je uváděn pouze jeden graf. Důvodem rozdílných teplot stěn při praktickém měření mohou být povětrnostní podmínky, geografická poloha budovy nebo přilehlá místnost k referenční místnosti. Všechny tyto aspekty mohly ovlivnit teplotu stěn a nebylo možné je v teoretickém výpočtu zohlednit. Graf průběhu teploty stěnou vychází v teoretickém výpočtu jako konstanta, což vzhledem ke koncepci použitého obvodového zdiva Porotherm 44 se vzduchovými kapsami se jeví jako mylný výsledek. Vzduchové kapsy ale nelze z důvodu stavebních prostupů (překrývání jednotlivých tvárnic) namodelovat, při teoretickém výpočtu byl použit součinitel tepelné vodivosti uváděný samotným výrobcem zdiva, z tohoto důvodu lze teploty na vnějšku a na vnitřní straně stěny považovat za objektivní a správné. Výsledné teploty jsou uvedeny v tabulce níže.

	Měření infra kamerou	Teoretický výpočet	Výpočet v software
Teplota vně stěny A (°C)	-1,30	-1,84	-1,25
Teplota vně stěny B (°C)	-1,40	-1,84	-1,25
Teplota na vnitřní straně stěny A (°C)	+11,40	+11,45	+12,00

Obr. 5.23 Tabulka porovnání teplot [52]



Obr. 5.24 Grafy průběhu teplot [53]

Dle tabulky na obr. 5.23 lze soudit, že teoretický výpočet byl velice přesný. Pokud srovnáme teplotu referenční stěny A na vnější straně, jedná se o rozdíl 0,54 °C mezi teoretickým výpočtem a praktickým měřením. U referenční stěny B je tento rozdíl 0,44 °C. Výsledky se dají považovat za úspěšné, rozdíl teplot je minimální. Přesnost teoretického výpočtu lze přisuzovat věrnému nákresu referenční místnosti s použitím přesným okrajových podmínek. Pokud porovnáme naměřené hodnoty s hodnotami získanými z programu Agros 2D je tento rozdíl pouze 0,05 °C a 0,15 °C.

Minimální odstup od teoretického výpočtu je dosažen u vnitřní strany stěny zde je rozdíl teplot 0,05 °C oproti praktickému měření. Při srovnání změřených hodnot na této stěně s hodnotami ze software je patrný výraznější odstup 0,60 °C. Tento odstup je způsoben nepřesným pořízením termogramu z důvodů výše popsaných v této kapitole.

Součástí práce je i zhodnocení vlivu tepelné izolace na referenční místnost (popř. na objekt jako celek) jelikož je objekt v současném stavu bez tepelné izolace. Změny tepelných vlastností referenční místností jsou popsány v následující kapitole, výsledné grafy jsou uvedeny v kapitolách 5.2.3.2 a 5.2.3.3.

### 5.4.1 Závěry pro praxi

Z porovnání teoretického výpočtu s praktickým měřením lze výsledné hodnoty získané teoretickým měřením považovat za velice přesné, z tohoto důvodu lze objektivně stanovit důležité závěry pro praxi ohledně uvažované tepelné izolace. V práci je vypočten vliv

tepelné izolace Isover ESP 150 S, v síle 5 cm, který je vyobrazen na namodelované situaci a grafu v kapitole 5.2.3.2 a tepelné izolace totožného typu o síle 10 cm v kapitole 5.2.3.3. Pro srovnání výpočtů a vlastností jsou nejdůležitějšími parametry teploty na vnější straně stěny, které jsou uvedeny níže v tabulce.

	Výpočet v software
Teplota vně stěny s izolací o síle 5 cm (°C)	-1,70
Teplota vně stěny s izolací o síle 10 cm (°C)	-1,90

**Obr. 5.25 Tabulka teplot s izolací stěn [54]**

Z hodnot v tabulce na obr. 5.25 plyne, že rozdíl teplot mezi použitou izolací o síle 5 cm a o síle 10 cm je 0.20 °C. Hodnota teploty na vnější straně stěny s izolací o síle 5 cm je -1.70 °C, oproti s izolací o síle 10 cm, kde činí -1.90 °C. Tyto hodnoty lze považovat za korektní, nižší teplota na vnější straně stěny se silnější izolací je logická – teplo neproniká v takové míře směrem ven z vnitřní strany stěny. Typ, síla i druh izolace jsou voleny na základě požadavků majitelů objektu.

Z praktického hlediska je vhodné doporučit jako druh zateplení objektu silnější druh fasádní izolace tedy Isover ESP 150 S, 10 cm. Pořizovací cena této izolace je zhruba dvojnásobná oproti ceně izolace o síle 5 cm. Norma upravující tepelnou ochranu budov je norma ČSN 73 0540 - 2, dle této normy je požadovaná minimální hodnota součinitele prostupu tepla  $\lambda = 0,38 \left[ \frac{W}{m K} \right]$  a doporučená hodnota  $\lambda = 0,25 \left[ \frac{W}{m K} \right]$ . Obvodové zdivo

Porotherm 44 z kterého je objekt postaven má  $\lambda = 0,14 \left[ \frac{W}{m K} \right]$ , což znamená, že budova

by splnila normativní požadavky i bez vnější fasádní izolace. Je ale nutno podotknout, že fasádní izolace výrazným způsobem zlepšuje tepelné izolační schopnosti objektu, z tohoto důvodu lze doporučit izolaci o síle 10 cm, která má dvojnásobný tepelný odpor oproti izolaci o síle 5 cm, jako vhodnou pro zateplení objektu. Z hlediska trendu vývoje cen energií, je v současné době kladen vysoký důraz na co možná nejnižší energetické náročnosti budov a je doporučeno odborníky na základě tohoto vývoje zateplovat budovy izolacemi o síle alespoň 10 cm. Fasádní izolaci lze chápat jako druh investice do budoucna.

## **Závěr**

Práce pojednává o problematice termovizního měření. V práci je uveden historický vývoj tohoto oboru s možným využitím této technologie v budoucnu. Byla zde uvedena základní teoretická podstata termovizního měření a fyzikálních jevů s ním souvisejících. Rovněž je v práci uvedena termografie ve stavebnictví a funkce moderních radiometrických termogramů, které souvisí s praktickou částí diplomové práce.

Cílem praktické části práce bylo porovnání praktického měření infrakamerou s teoretickým výpočtem a výpočtem v příslušném softwaru. Teoretický výpočet byl proveden v programu Agros2D, který byl vyvinut na FEL ZČU a slouží pro výpočet tepelných polí. Výsledky tohoto výpočtu byly porovnány s praktickým měřením, které probíhalo na rodinném domu v okrese Beroun infrakamerou zapůjčenou z inventáře ZČU FEL FLIR model T335 za podpory asistenta ZČU FEL Ing. Stanislava Jiřince. Po zpracování údajů bylo zjištěno, že teoretický výpočet pomocí software Agros2D i pomocí klasické analytické metody byl velice přesný a téměř se shodoval s údaji získanými při praktickém měření. Přesnost teoretického výpočtu lze přisuzovat přesně nadeklarovaným parametrům měřeného objektu.

## Použitá literatura a internetové zdroje

- [1] Rada, Josef, Elektrotepelná technika , Praha : SNTL 1985
- [2] Lysenko, Vladimír, Detektory pro bezdotykové měření teploty, Praha: BEN 2005
- [3] Kreidl, Marcel, Měření teploty senzory a měřící obvody, Praha: BEN 2004
- [4] John H. Lienhard IV / V, A heat transfer textbook, Phlogiston Press:2005
- [5] Manuál k infrakameře FLIR T335
- [6] <http://www.hvezdaren.sk/buxus/images/2010/fyzikovia/Planck/03.jpg>
- [7] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/d/d0/FLIR\\_logo.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/d/d0/FLIR_logo.png)
- [8] [http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie\\_brynda.pdf](http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie_brynda.pdf)
- [9] <http://energetika.tzb-info.cz/docu/clanky/0058/005802o10.jpg>
- [10] <http://energetika.tzb-info.cz/docu/clanky/0058/>
- [11] [http://www.powerwiki.cz/attach/OOEET\\_PlanckuvZakon/PlanckuvZakon.png](http://www.powerwiki.cz/attach/OOEET_PlanckuvZakon/PlanckuvZakon.png)
- [12] [http://www.klz.cz/Etalony/Teplota/007etalony\\_PE071\\_cerneteleso.jpg](http://www.klz.cz/Etalony/Teplota/007etalony_PE071_cerneteleso.jpg)
- [13] Manuál k infrakameře FLIR T335
- [14] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0700-z01.pdf>
- [15] <http://automatizace.hw.cz/images/thermopile/pyrometrie.gif>
- [16] <http://eshop.micronix.cz/data/cz/img/original/002/1968-2540>
- [17] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/>
- [18] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0700-o01.gif>
- [19] [http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/LBMT/BMT-priprava\\_lab\\_v4.pdf](http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/LBMT/BMT-priprava_lab_v4.pdf)
- [20] <http://energetika.tzb-info.cz/docu/clanky/0058/>
- [21] [http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/5249/icela\\_2008\\_bp.pdf?sequence=1](http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/5249/icela_2008_bp.pdf?sequence=1)
- [22] [http://katedry.fmfi.vsb.cz/635/pracoviste\\_lab\\_mer\\_tepLOT.html](http://katedry.fmfi.vsb.cz/635/pracoviste_lab_mer_tepLOT.html)
- [23] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Termografie>
- [24] <http://www.x20.org/thermal/>
- [25] [http://www.ir55.com/images/061004\\_022.jpg](http://www.ir55.com/images/061004_022.jpg)
- [26] <http://www.stavarina.cz/poruchy/tepelne-mosty.htm>
- [27] [http://www.nazeleno.cz/Files/FckGallery/Termoviznimereni.zip/0560\\_8752\\_03.jpg](http://www.nazeleno.cz/Files/FckGallery/Termoviznimereni.zip/0560_8752_03.jpg)
- [28] <http://www.nbth.cz/download.php>
- [29] [www.wienerberger.cz/technický-list-porotherm-44-pd.html](http://www.wienerberger.cz/technický-list-porotherm-44-pd.html)
- [30] <http://www.centrum-zatepleni.cz/files/e/297/fasadni-polystyren-isover-eps-70f.jpeg?watermark=1>

- [31] Nákres vytvořený v programu Google SketchUp
- [32] Snímek pořízený infrakamerou FLIR T335
- [33] Snímek pořízený infrakamerou FLIR T335
- [34] Manuál k infrakameře FLIR T335
- [35] Termogram pořízený infrakamerou FLIR T335
- [36] Termogram pořízený infrakamerou FLIR T335
- [37] Termogram pořízený infrakamerou FLIR T335
- [38] Termogram pořízený infrakamerou FLIR T335
- [39] Termogram pořízený infrakamerou FLIR T335
- [40] <http://www.agros2d.org/>
- [41] Tepelný výpočet vytvořený v programu Agros2D
- [42] Tepelný výpočet vytvořený v programu Agros2D
- [43] Tepelný výpočet vytvořený v programu Agros2D
- [44] Tepelný výpočet vytvořený v programu Agros2D
- [45] Graf vytvořený v programu Agros2D
- [46] Tepelný výpočet vytvořený v programu Agros2D
- [47] Tepelný výpočet vytvořený v programu Agros2D
- [48] Graf vytvořený v programu Agros2D
- [49] Tepelný výpočet vytvořený v programu Agros2D
- [50] Tepelný výpočet vytvořený v programu Agros2D
- [51] Graf vytvořený v programu Agros2D
- [52] Tabulka vytvořená na základě dat z programu Agros2D
- [53] Graf vytvořený na základě dat z programu Agros2D
- [54] Tabulka vytvořená na základě dat z programu Agros2D