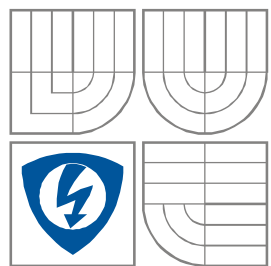


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ S TERMOVIZNÍ KAMEROU

THE EXPERIMENTAL MEASURING BY THE THERMOVISION CAMERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Oldřich Jakl

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Petr Petyovský

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Automatizační a měřicí technika**

**Student:** Oldřich Jakl

**ID:** 106490

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Experimentální měření s termovizní kamerou**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem studenta je seznámit se s principem měření pomocí termovizní kamery a s charakterem získaných dat. Student sám navrhne a provede minimálně pět experimentů, které budou demonstrovat vlastnosti kamery (např. snímání za různých světelných podmínek, při různé okolní teplotě, vlhkosti, z různé vzdálenosti, skrze překážky, těles s různou emisivitou či povrchovými vlastnostmi atd.). Provedené experimenty zpracuje a naměřené výsledky vyhodnotí.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

HLAVÁČ, V., ŠONKA, M. Počítačové vidění. Praha: Grada, 1992.

HAUßECKER, H. - GEIßLER, P. Handbook of Computer Vision and Applications. San Diego: Academic press, 1999.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 30.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Petyovský

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřená na vlastnosti a princip měření termovizních kamer. V první části práce je seznámení se základními pojmy a fyzikálními zákony, na jejichž principu je založeno fungování termovizní kamery. V druhé části jsou popsány funkce detektorů infračerveného záření a charakter výstupních dat termovizní kamery. Dále jsou prezentovány experimenty a pozorování, které nám přiblíží vlastnosti termovizní kamery a pomohou interpretovat data získaná kamerou.

## **Klíčová slova**

Termovizní kamera, Termokamera, bolometr, kvantové detektory, termovizní měření

## **Abstract**

This work is focused on the features and the principles of the measuring of the thermovision cameras. There is the identification of the basic notions and physical laws on which is based the operation of the thermovision cameras in the first part of my work. In the second part there is description of the function of the detectors of infrared radiation and the character of the output data of the thermovision camera. Further there are presented the experiments and the observations which bring us closer to the features of the thermovision cameras and help us interpret the data gained by camera.

## **Keywords**

Thermographic camera, Thermocamera, the bolometer, quantum detectors, thermal measurement

## **Bibliografická citace:**

Jakl, O. *Experimentální měření s termovizní kamerou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 85s. Vedoucí balářské práce byl Ing. Petr Petyovský.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Experimentální měření s termovizní kamerou jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **30. května 2011**

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	12
2	Fyzikální zákony .....	13
2.1	Základní pojmy .....	13
2.1.1	Zářivá energie.....	13
2.1.2	Zářivý tok .....	13
2.1.3	Spektrální zářivý tok .....	13
2.1.4	Intenzita vyzařování .....	13
2.1.5	Spektrální intenzita vyzařování.....	13
2.1.6	Pohltivost (absorpce).....	14
2.1.7	Spektrální pohltivost (absorpce).....	14
2.1.8	Emisivita .....	14
2.1.9	Spektrální emisivita.....	14
2.1.10	Odrazivost (reflexe) .....	14
2.1.11	Spektrální odrazivost (reflexe).....	14
2.1.12	Propustnost (transmitance).....	15
2.1.13	Spektrální propustnost (transmitance).....	15
2.2	Kirchhoffův zákon .....	15
2.3	Ritchieův pokus.....	15
2.4	Absolutně černé těleso .....	17
2.5	Stefanův-Boltzmannův zákon .....	18
2.6	Wienův zákon .....	18
2.7	Planckův zákon .....	19
2.8	Elektromagnetická emise a absorpce .....	21
2.8.1	Absorpce .....	22
2.8.2	Emise.....	22
3	Termovizní kamera.....	23
3.1	Vývoj termovizních systémů.....	23
3.2	Kvantové detektory .....	24
3.3	Tepelné detektory.....	24
3.3.1	Pyroelektrický vidikon .....	24
3.3.2	Bolometry.....	25
3.4	Skenovací systém .....	26
4	Experimentální měření .....	27

4.1	Použité měřicí přístroje .....	27
4.2	Experiment č. 1: Měření vlivů vlhkosti.....	29
4.2.1	Měření při různé vlhkosti .....	29
4.2.2	Měření při stejné vlhkosti.....	31
4.3	Experiment č. 2: Měření na různou vzdálenost.....	34
4.4	Experiment č. 3: Odražené tepelné záření.....	36
4.5	Experiment č. 4: Měření přes překážku .....	38
4.5.1	Papír .....	38
4.5.2	Karton.....	39
4.5.3	Dřevo.....	40
4.5.4	Zdivo .....	40
4.5.5	Sklo .....	41
4.5.6	Polyetylen.....	42
4.6	Experiment č. 5: Měření za zhoršené viditelnosti .....	44
5	Závěr.....	46

# Seznam obrázků

Obr. 2.1: Ritchieův pokus .....	16
Obr. 2.2: Tmavý kruh na chladném kovu (a) září na žhavém kovu s větším jasem než kov (b) .....	16
Obr. 2.3: Realizace absolutně černého tělesa .....	17
Obr. 2.4: Černý zářič podle Holborna a Kurlbauma [1].....	17
Obr. 2.5: Grafické znázornění Planckova vyzařovacího zákona [4] .....	21
Obr. 2.6: Princip absorpce.....	22
Obr. 2.7: Princip emise elektromagnetického záření .....	22
Obr. 3.1: Detail bolometrického detektoru (elementu) [3].....	25
Obr. 3.2: Skenovací systém [7].....	26
Obr. 4.1: Přejít od otevřeného kmitavého obvodu k dipólu.....	27
Obr. 4.2: Pracoviště při měření na plotýnce.....	29
Obr. 4.3: Zaostrěný a nezaostřený tepelný obraz .....	30
Obr. 4.4: Korekční křivky .....	30
Obr. 4.5: Průběh měření .....	31
Obr. 4.6: Průběh měření .....	32
Obr. 4.7: Korekční křivky .....	32
Obr. 4.8: Korekční křivky .....	33
Obr. 4.9: Průběh měření .....	34
Obr. 4.10: Korekční křivky .....	35
Obr. 4.11: Měření vzdálenosti a zorného pole [9].....	35
Obr. 4.12: Pracoviště.....	36
Obr. 4.13: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu při 45° odrazu na skle ...	37
Obr. 4.14: Tepelné obrazy plotýnky a odrazu při úhlu 45° pro sklo (nahore) a ocel (dole) .....	37
Obr. 4.15: Proložení viditelného a tepelného obrazu při 60° (vlevo) a 25° (vpravo) odrazu na papíře.....	38
Obr. 4.16: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu .....	38
Obr. 4.17: Tepelný obraz .....	39
Obr. 4.18: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu .....	39
Obr. 4.19: Tepelný obraz .....	39
Obr. 4.20: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu .....	40
Obr. 4.21: Tepelný obraz .....	40
Obr. 4.22: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu .....	40
Obr. 4.23: Tepelný obraz .....	41



Obr. 4.24: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu .....	41
Obr. 4.25: Tepelný obraz .....	41
Obr. 4.26: Pracoviště.....	42
Obr. 4.27: Grafická závislost chyby při měření přes polyetylen.....	42
Obr. 4.28: Tepelný obraz přes 7, 8 a 8 vrstev (uprostřed při teplotě zdroje 100°C a vpravo při 250°C).....	43
Obr. 4.29: Pracoviště při použití mlhovače.....	44
Obr. 4.30: Plotýnka ve viditelné a tepelném obraze při různém stupni zamlženém .....	45
Obr. 4.31: Záznam z termokamery při snímání plotýnky pod mlhou .....	45

## Seznam tabulek

Tab. 4.1: Parametry termokamery EasIR 4 .....	28
Tab. 4.2: Parametry infrateploměru IR 1200-50D .....	28
Tab. 4.3: Podmínky měření .....	29
Tab. 4.4: Podmínky měření .....	31
Tab. 4.5: Podmínky měření .....	34
Tab. 4.6: Naměřené hodnoty při různě nastavené vzdálenosti.....	36
Tab. 4.7: Měření přes polyetylenové folie .....	43

## Seznam použitých symbolů a značek

Značka	Jednotka	Název
$W_e$	$J$	Zářivá energie
$\Phi_e$	$W$	Zářivý tok
$\Phi_{e\lambda}$	$W \cdot m^{-1}$	Spektrální zářivý tok
$H_e$	$W \cdot m^{-2}$	Intenzita vyzařování
$H_{e\lambda}$	$W \cdot m^{-3}$	Spektrální intenzita vyzařování
$\alpha$	-	Pohltivost (absorpce)
$\alpha_\lambda$	-	Spektrální pohltivost (absorpce)
$\varepsilon$	-	Emisivita
$\varepsilon_\lambda$	-	Spektrální emisivita
$\rho$	-	Odrazivost (reflexe)
$\rho_\lambda$	-	Spektrální odrazivost (reflexe)
$\tau$	-	Propustnost (transmitance)
$\tau_\lambda$	-	Spektrální propustnost (transmitance)
$\lambda$	$m$	Vlnová délka
$T$	$^{\circ}C$	Teplota
$\sigma$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$	Stefanova-Boltzmannova konstanta
$b$	$m \cdot K$	Hodnota konstanty Wienova zákona posuvu
$c_1$	$J \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	První konstanta Planckova vyzařovacího zákona
$c_2$	$m \cdot K$	Druhá konstanta Planckova vyzařovacího zákona
$c$	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost světla
$\bar{w}$	$J$	Střední hodnota energie zářičů
$L_0$	$kg \cdot s^{-3}$	Zář
$L_{0\lambda}$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-3}$	Spektrální zář
$S1$	$^{\circ}C$	Hodnota získaná termokamerou
$IR(C)$	$^{\circ}C$	Hodnota získaná infrateploměrem bezdotykově
$TK(C)$	$^{\circ}C$	Hodnota získaná infrateploměrem pomocí drátového čidla

# 1 ÚVOD

Není tomu tak dávno, kdy bylo zcela nemyslitelné měřit teplotu bezdotykovou metodou. V dnešní moderní době, kdy vývoj techniky a technologií postupuje velmi rychle kupředu, je tato metoda celkem běžně rozšířena.

V této bakalářské práci se budeme zabývat principem fungování termovizních kamer. Pro porozumění problematiky tepelného záření je potřeba si vysvětlit několik pojmů, proto se seznámíme se základními fyzikálními zákony a veličinami, na nichž je založen způsob bezdotykového měření teplot termovizními kamerami. Dále se dozvíme několik informací o detektorech používaných v termovizních kamerách. Zabývat se budeme rozdělením těchto detektorů a jejich vlastnostmi. Zároveň získáme všeobecný přehled o vývoji termovizní techniky. Dále si řekneme, co představuje obraz pořízený termovizní kamerou a jak z něj odečítat teplotu.

Ve 21. století má termovizní kamera široké uplatnění. S její pomocí můžeme odhalovat úniky tepla, měřit povrchové teploty těles současně na celém jejich povrchu, hledat osoby nebo zvířata v přírodě, měřit elektrická zařízení pod napětím a mnoho dalšího. Termovizní měření je bezkontaktní měření povrchový teplot. Využívá k tomu elektromagnetické záření, pro lidské oko neviditelné, které vydává každé těleso o větší teplotě než 0 K. Proto je možné realizovat měření termovizní kamerou i za naprosté tmy, tj. bez zbytkového viditelného záření.

Cílem této práce je ověřit vlastnosti termovizní kamery v praxi provedením různých experimentů. Například vliv zamlženého prostředí na vlastnosti měření. Dále vliv vlhkosti a vzdálenosti na přesnost měření a další. Dalším cílem je vyhodnotit výsledky těchto experimentů.

## 2 FYZIKÁLNÍ ZÁKONY

### 2.1 Základní pojmy

Abychom porozuměli problematice tepelného záření, je třeba si ujasnit několik základních pojmů.

#### 2.1.1 Zářivá energie

Zářivá energie je energie přenášená zářením. Ze zdroje se šíří do všech směrů. Ve vakuu se pohybuje rychlostí světla. Její označení a jednotka je

$$W_e \quad [J] \quad [m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}] \quad (2.1)$$

#### 2.1.2 Zářivý tok

Zářivý tok je zářivá energie, kterou vysílá povrch zářícího tělesa určitou plochou za jednotku času. Můžeme tedy říct, že se jedná o výkon přenášený zářením. Označován bývá  $\Phi_e$ .

$$\Phi_e = \frac{dW_e}{dt} \quad [W] \quad [m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}] \quad (2.2)$$

#### 2.1.3 Spektrální zářivý tok

Spektrální zářivý tok je definován jako diferenciální podíl zářivého toku a vlnové délky. Udává zářivý tok daného intervalu vlnové délky.

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad [W \cdot m^{-1}] \quad [m \cdot kg \cdot s^{-3}] \quad (2.3)$$

#### 2.1.4 Intenzita vyzařování

Intenzitu vyzařování daného místa zdroje je definována jako diferenciální podíl zářivého toku a elementární plochy, ze které zářivý tok vyzařuje. Označována bývá  $H_e$  nebo také  $M_e$ .

$$H_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad [kg \cdot s^{-3}] \quad (2.4)$$

#### 2.1.5 Spektrální intenzita vyzařování

Spektrální intenzita vyzařování je definována jako diferenciální podíl intenzity vyzařování a vlnové délky. Udává intenzitu vyzařování daného intervalu vlnové délky.

$$H_{e\lambda} = \frac{dH_e}{d\lambda} = \frac{d\Phi_{e\lambda}}{dS} \quad [W \cdot m^{-3}] \quad [m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-3}] \quad (2.5)$$

## 2.1.6 Pohltivost (absorpce)

Pohltivost je poměr zářivého toku pohlceného povrchovou plochou k zářivému toku dopadajícího na tutéž plochu. Označuje se  $\alpha$  a nabývá hodnot od 0 do 1.

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_d} \quad [-] \quad (2.6)$$

## 2.1.7 Spektrální pohltivost (absorpce)

Spektrální pohltivost je definována jako podíl spektrálního zářivého toku pohlceného povrchovou plochou a spektrálního zářivého toku dopadajícího na tutéž plochu. Udává pohltivost materiálu pro danou vlnovou délku.

$$\alpha_\lambda = \frac{\Phi_{a\lambda}}{\Phi_{d\lambda}} \quad [-] \quad (2.7)$$

## 2.1.8 Emisivita

Emisivita je poměr intenzity vyzařování tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Označuje se  $\varepsilon$  a nabývá hodnot od 0 do 1.

$$\varepsilon = \frac{H_e}{H_0} \quad [-] \quad (2.8)$$

## 2.1.9 Spektrální emisivita

Spektrální emisivita je definována jako podíl spektrální intenzity vyzařování a spektrální intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{H_{e\lambda}}{H_{0\lambda}} \quad [-] \quad (2.9)$$

## 2.1.10 Odrazivost (reflexe)

Odrazivost je poměr odraženého zářivého toku povrchovou plochou k zářivému toku dopadajícímu na tutéž plochu. Označuje se  $\rho$  a nabývá hodnot od 0 do 1.

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_d} \quad [-] \quad (2.10)$$

## 2.1.11 Spektrální odrazivost (reflexe)

Spektrální odrazivost je definována jako podíl odraženého spektrálního zářivého toku povrchovou plochou a spektrálního zářivého toku dopadajícího na tutéž plochu. Udává odrazivost materiálu pro danou vlnovou délku.

$$\rho_\lambda = \frac{\Phi_{r\lambda}}{\Phi_{d\lambda}} \quad [-] \quad (2.11)$$

### 2.1.12 Propustnost (transmittance)

Pohltivost je poměr propuštěného zářivého toku materiálem (prostředím) k dopadajícímu zářivému toku. Označuje se  $\tau$  a nabývá hodnot od 0 do 1.

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_d} [-] \quad (2.12)$$

### 2.1.13 Spektrální propustnost (transmittance)

Spektrální propustnost je definována jako podíl propuštěného spektrálního zářivého toku materiálem (prostředím) a spektrálního zářivého toku dopadajícího. Udává propustnost materiálu pro danou vlnovou délku.

$$\tau_\lambda = \frac{\Phi_{t\lambda}}{\Phi_{d\lambda}} [-] \quad (2.13)$$

## 2.2 Kirchhoffův zákon

Kirchhoff ve své práci došel v roce 1860 k důležitému zákonu, který říká, že poměr intenzity vyzařování  $H_e$  k pohltivosti  $\alpha$  závisí jen na absolutní teplotě tělesa. Tento Kirchhoffův zákon o úhrnném vyzařování lze vyjádřit rovnicí

$$\frac{H_e}{\alpha} = f(T) \quad (2.14)$$

kteřá udává, že tento poměr je funkcí pouze jediné proměnné teploty  $T$  a tedy nezávislý na vlastnostech tělesa (např. chemické složení, úpravě povrchu apod.), na které je uplatňován.

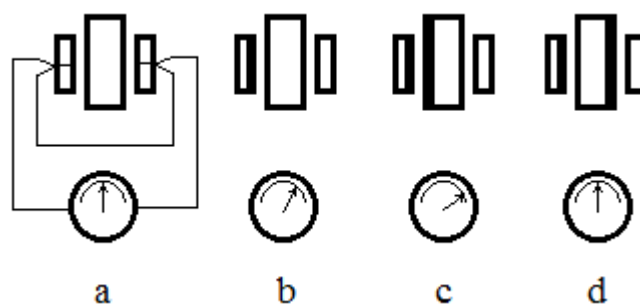
Tento Kirchhoffův zákon platí pro každou vlnovou délku spektra zvlášť, tudíž i pro monochromatické vyzařování a monochromatickou pohltivost. Poměr těchto dvou veličin popisuje Kirchhoffův zákon pro monochromatické záření, který má tvar

$$\frac{H_\lambda}{\alpha_\lambda} = F(T, \lambda) \quad (2.15)$$

a je funkcí dvou proměnných teploty  $T$  a příslušné vlnové délky  $\lambda$ . Z tohoto zákona nám vyplívá velmi důležitá skutečnost, že těleso nejvíce pohlcuje záření o té vlnové délce, kterou samo nejsilněji vyzařuje. Platnost Kirchhoffova zákona se dá potvrdit jednoduchým Ritchieovým pokusem.

## 2.3 Ritchieův pokus

Lesklý (např. poniklovaný) kovový válec udržujeme horkou vodou nebo elektrickým



Obr. 2.1: Ritchieův pokus

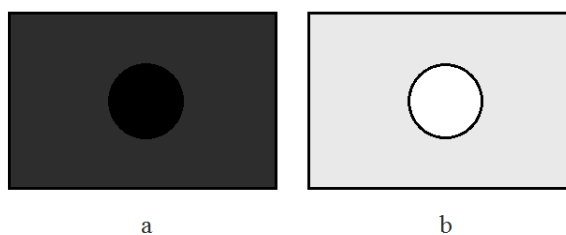
proudem na vyšší teplotě než okolí. Po obou stranách válce jsou souměrně postaveny dva stejné lesklé plechové kotouče a na každém z nich je připevněn jeden spoj termoelektrického článku, takže připojený galvanoměr se vychýlí, když plechové kotouče nemají stejnou teplotu. Zahříváme-li střední válec, galvanoměr se nevychýlí, protože obě základny válce vyzařují stejně (Obr. 2.1 a). Pokryjeme-li však pravou plochu levého kotouče vrstvou sazí, vychýlí se galvanoměr, protože černý povrch kotouče silněji absorbuje než lesklý povrch pravého kotouče (Obr. 2.1 b). Výchylka galvanoměru ještě vzroste, když začerníme také levou základnu středního válce, protože jeho černý povrch vyzařuje silněji, než lesklý povrch (Obr. 2.1 c). Otočíme-li však topný válec o  $180^\circ$  do polohy (Obr. 2.1 d), vrátí se galvanoměr na nulu. Z posledního případu pak soudíme, že množství tepla, která si střední válec vyměňuje s oběma kotouči, jsou stejná. Označíme-li tedy  $H_1$ ,  $\alpha_1$  intenzitu vyzařování a pohltivost lesklého povrchu a  $H_\zeta$ ,  $\alpha_\zeta$  tytéž veličiny pro černý povrch, je výsledek pokusu vyjádřen vztahem

$$\alpha_\zeta \cdot H_1 = \alpha_1 \cdot H_\zeta \quad (2.16)$$

čili

$$\frac{H_1}{\alpha_1} = \frac{H_\zeta}{\alpha_\zeta} \quad (2.17)$$

Z toho plyne, že poměr intenzity vyzařování k pohltivosti je pro lesklou i černou plochu stejný v soulase se vztahem (2.15).



Obr. 2.2: Tmavý kruh na chladném kovu (a) září na žhavém kovu s větším jasem než kov (b)

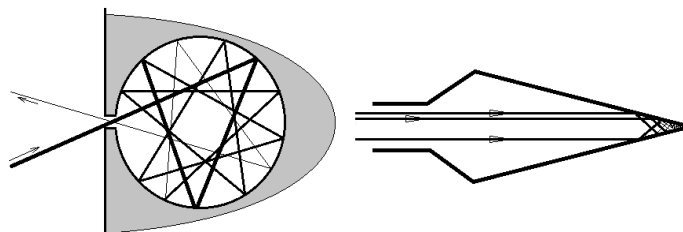
Ritchieův pokus dokazuje, že těleso, které se při obvyklém osvětlení jeví černým (má pro viditelné záření pohltivost blízkou jedné), skutečně také pohlcuje a vyzařuje i v oboru infračerveném. Lze to pozorovat na platinovém plíšku, na němž je tuší



namalován černý kruh. Při teplotě místnosti jeví se nám kruh tmavší než plíšek, poněvadž pohlcuje více světla. Rozžhavíme-li však plíšek plamenem, jeví se nám zase kruh jasnější než ostatní části plíšku, což svědčí o tom, že pohltivější plocha kruhu září s větší intenzitou než méně pohltivá plocha plíšku při téže teplotě (Obr. 2.2). [1]

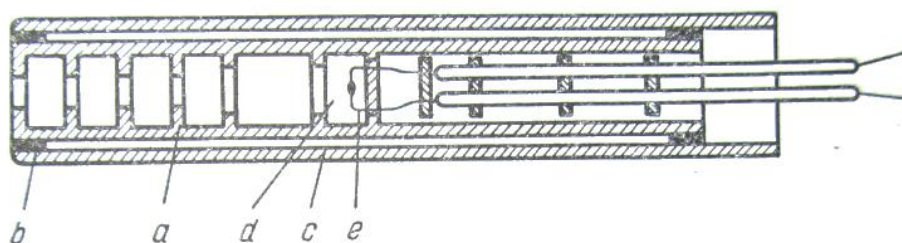
## 2.4 Absolutně černé těleso

Pojem černého tělesa je spojen s pohltivostí  $\alpha$ . Můžeme si všimnout, že čím je větší pohltivost v oboru viditelného světla, tím tmavší se zdá povrch tělesa při osvětlení. Absolutně černé těleso je takové těleso, které má  $\alpha = 1$ . Taková tělesa ovšem neexistují, avšak „dokonalou černost“ lze udělat. Nápovědou, jak absolutní černost napodobit, nám může být jev, se kterým se běžně setkáváme. A to, že se nám zdají okna v ulici tmavá až černá, nehledě na barvu interiéru. Tento jev je zapříčiněn tím, že jsou okna poměrně malá, vůči velikosti místnosti. Tím se vstupující zářivý tok opakovaným odražením i na dosti dobře odrážejících stěnách z velké části pohltí. Černé těleso tedy můžeme realizovat jako malý otvor dutiny, jejíž povrch je matně černě natřený a pokrytý sazemi. Nejvhodnější je úzká válcová, kulová nebo kuželovitá dutina s malým otvorem, v níž se vstupující záření opakovanými odrazy zcela pohltí.



Obr. 2.3: Realizace absolutně černého tělesa

Záření černého tělesa se prakticky realizuje různými elektrickými pískami. Fyzikové Holborn a Kurlbaum zrealizovali černý zářič jako elektrickou pec znázorněnou na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Černý zářič podle Holborna a Kurlbauma [1]

Tvoří ji trubka  $a$  z ohnivzdorného materiálu, potažená na vnější straně tenkou topnou folií, žhavenou elektrickým proudem. Sousose s azbestovým izolačním pláštěm  $c$

je trubka  $a$  udržována azbestovými manžetami  $b$ . Vlastní zářící dutina, chráněna několika clonami, je označena písmenem  $d$ . Teplota dutiny se měří termoelektrickým článkem z Pt a PtRh. [1]

Jelikož má otvor pícky pohltivost velmi blízkou 1, tak při vysoké teplotě vytápění, září otvor největší možnou intenzitou, jaká je při dané teplotě možná. Proto je toto záření prakticky stejné jako záření černého tělesa.

## 2.5 Stefanův-Boltzmannův zákon

Označíme-li si  $H_0$  jako intenzitu vyzařování černého tělesa, dostaneme rovnici

$$H_0 = f(T) \quad (2.18)$$

V roce 1879 Stefan experimentálně zjistil funkci  $f(T)$  za pomoci kuželové dutiny a došel ke vztahu

$$H_0 = \sigma T^4 \quad (2.19)$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \quad (2.20)$$

kde  $\sigma$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta. Boltzmann tento vztah odvodil teoreticky za použití termodynamických zákonů. Pomocí černé dutiny uzavřené dokonale odražejícím pístem zjistil, že posunutím pístu proti tlaku záření, vykoná se práce podle prvního zákona termodynamiky. Úpravami došel k tomu, že energie dutiny je úměrná čtvrté mocnině teploty. Jelikož je tato energie úměrná intenzitě vyzařování, vysvětluje vztah (2.18). Praktický význam Stefanova-Boltzmannova zákona je opravdu velký. Díky němu jsme schopni určit teplotu zářících těles, která můžeme považovat za přibližně černá. Ze známé tzv. *solární konstanty*  $1,35 \text{ kWm}^{-2}$ , která nám udává ozáření zemského povrchu Sluncem, jsme tedy schopni určit povrchovou teplotu Slunce na  $5900^\circ\text{K}$ .

## 2.6 Wienův zákon

Stefanův-Boltzmannův zákon neřeší záření tělesa úplně. Podle Kirchhoffova zákona má monochromatické záření tvar

$$H_{0\lambda} = F(T, \lambda) \quad (2.21)$$

Wienovo snažení spočívalo v určení neznámé funkce  $F(T, \lambda)$ , která říká, že monochromatické vyzařování černého tělesa je funkcí absolutní teploty  $T$  a vlnové délky  $\lambda$ . Určení této funkce bylo velice obtížné. V roce 1860 se Wienovi podařilo zjistit pomocí termodynamických vět upravený vztah funkce

$$H_{0\lambda} = \frac{1}{\lambda^5} \varphi(\lambda T) \quad (2.22)$$

kde  $\varphi$  je funkce již jen jedné proměnné a to součinu  $T\lambda$ . Toto neúplné řešení vedlo Wiena k řešení otázky, jakou vlnovou délkou září těleso nejsilněji při vybrané teplotě.

Jinými slovy můžeme říci jaká barva má ve spojitém spektru největší monochromatické vyzařování. Hledaná vlnová délka je dána podmínkou

$$\frac{\partial H_{0\lambda}}{\partial \lambda} = 0 \quad (2.23)$$

Potom podle

$$-\frac{5}{\lambda^6} \varphi(\lambda T) + \frac{1}{\lambda^5} \varphi'(\lambda T) \Rightarrow \lambda T \cdot \varphi'(\lambda T) - 5\varphi(\lambda T) = 0 \quad (2.24)$$

kde  $\varphi'$  značí derivaci funkce  $\varphi$  podle  $\lambda$ .

Z neznámé rovnice  $\varphi$  si můžeme určit délku vlny s maximálním monochromatickým vyzařováním  $\lambda^*$ . A za předpokladu, že známe aspoň jeden reálný kořen poslední rovnice pro součin  $\lambda T$ , označíme si ho  $b$ . Pak

$$\lambda^* T = b \quad (2.25)$$

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (2.26)$$

Z Wienova zákona posuvu (2.25) plyne, že s rostoucí teplotou objektu se zkracuje vlnová délka maximálního monochromatického vyzařování. To můžeme sledovat na tělese o teplotách vyšších než 525 °C. Těleso při takovéto teplotě září tmavě rudou barvou a se stoupající teplotou mění barvu od rudé ke žluté. Dále se těleso stává stále bělejší, až se při několika tisíc stupňů téměř neliší od „bílého“ slunečního světla. Ve slunečním světle je nejsilněji zastoupená žlutozelená barva o vlnové délce  $\lambda^* \approx 0,5 \mu\text{m} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ . Povrchovou teplotu Slunce můžeme podle Wienova zákona spočítat jako

$$T = \frac{b}{\lambda^*} \Rightarrow T = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-7}} = 5796 \text{ °K} \quad (2.27)$$

což je přibližně stejná hodnota jako hodnota povrchové teploty podle Stefanova-Boltzmannova zákona.

Dále Wien odvodil, vycházejíc z klasické statistiky, tvar funkce  $\varphi(\lambda T)$

$$\varphi(\lambda T) = c_1 e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (2.28)$$

kde  $c_1$  a  $c_2$  jsou konstanty. Tato závislost se stala známou pod názvem Wienův zákon. Ukázalo se, že tento zákon souhlasí se skutečností pouze pro malé hodnoty součinu  $\lambda T$  a tedy pro krátké vlnové délky viditelného a ultrafialového spektra. Pro dlouhovlnnou část spektra odvodili Rayleigh a Jeans funkci

$$\varphi(\lambda T) = c_3 \lambda T \quad (2.29)$$

kde  $c_3$  je konstanta. Tato funkce se osvědčila hlavně při vyšších teplotách a dlouhé vlnové délky.

## 2.7 Planckův zákon

Planck v roce 1900 spojil funkce  $\varphi(\lambda T)$  pro krátké a dlouhé vlny v jednu funkci, popisující celé spektrum. Jeho řešení má tvar

$$\varphi(\lambda T) = \frac{c_1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (2.30)$$

Pro malé hodnoty  $\lambda T$  má exponenciální funkce mnohem větší hodnoty než 1 a tak můžeme jedničku ve jmenovateli zanedbat, čímž dostaneme Wienovu funkci. Pro velké hodnoty  $\lambda T$  se můžeme omezit na první dva členy rozvoje exponenciální funkce, čímž dostaneme

$$\varphi(\lambda T) = \frac{c_1}{1 + \frac{c_2}{\lambda T} + \dots - 1} = \frac{c_1}{c_2} \lambda T \quad (2.31)$$

Položíme-li  $c_3 = \frac{c_1}{c_2}$ , dostaneme funkci Rayleigha a Jeanse.

Planck svoji experimentálně potvrzenou funkci vysvětlil za zcela převratného předpokladu, který se z počátku nazýval *Planckova kvantová hypotéza*. Touto hypotézou vyvrátil předpoklad o neomezené dělitelnosti (plynulé měnitelnosti) energie. Planckova hypotéza říká: „Emise a absorpce zářivé energie se může probíhat pouze po celistvých násobcích energie, *kvantech*

$$\varepsilon = h\nu \quad (2.32)$$

kde  $\nu$  je kmitočet záření a  $h$  je účinkové kvantum (Planckova konstanta). Z toho plyne, že střední hodnota energie zářičů, označena jako  $\bar{w}$ , závisí na jejich frekvenci podle vztahu

$$\bar{w} = \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/kT} - 1} \quad (2.33)$$

Položíme-li  $\nu = c/\lambda$ , kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu, dostaneme pro konstanty v rovnici (2.30) vztahy

$$c_1 = 2\pi h c^2 \quad (2.34)$$

$$c_2 = \frac{hc}{k} \quad (2.35)$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta. Číselně vyjádřené konstanty pak mají hodnoty

$$c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.36)$$

$$c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (2.37)$$

Konečný tvar Planckova zákona spektrálního rozdělení monochromatického vyzařování zní

$$H_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/k\lambda T} - 1)} \quad (2.38)$$

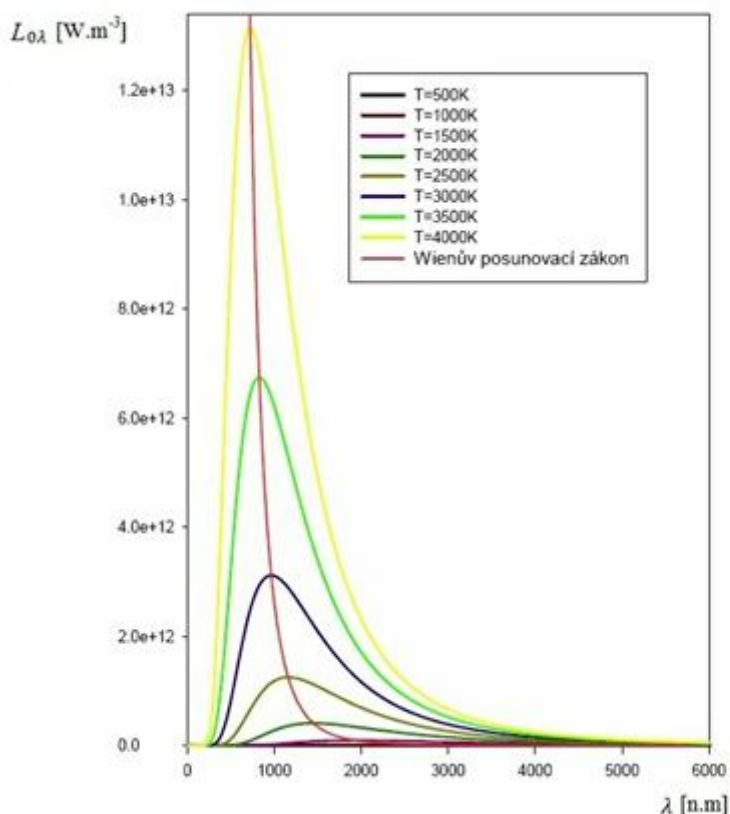
Jelikož je černé těleso kosinusový zářič, platí pro něj, mezi září  $L_0$  a intenzitou vyzařování  $H_0$ , vztah

$$L_0 = \frac{1}{\pi} H_0 \quad (2.39)$$

stejně tak pro monochromatickou zář  $L_{0\lambda}$  a monochromatické vyzařování  $H_{0\lambda}$  platí vztah

$$L_{0\lambda} = \frac{1}{\pi} H_{0\lambda} \quad (2.40)$$

Přítom rozumíme monochromatickou zář elementární monochromatický tok, vycházející z plochy ve vyšetřovaném směru do malého prostorového úhlu a připadající na vlny obsažené v nekonečně malém intervalu vlnových délek, dělený šířkou tohoto intervalu, příslušným prostorovým úhlem a zdánlivou velikostí plošky. Jednotka monochromatické záře je  $W \cdot m^{-3} \cdot steradián^{-1}$ . Spektrální rozdělení monochromatické záře je tedy přímo úměrné rozložení monochromatického vyzařování určenému vztahem (2.38) a liší se jen v konstantě  $c_1$ , která má pro monochromatickou zář hodnotu  $c_1 = 2hc^2 = 1,191 \cdot 10^{-6} J \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ . [1]



Obr. 2.5: Grafické znázornění Planckova vyzařovacího zákona [4]

Na obrázku 2.5 je znázorněna grafická závislost Planckova vyzařovacího zákona a křivka Wienova zákona posuvu. Je z něho zřejmé, že maximum křivky se posouvá ke kratším vlnovým délkám, což odpovídá Wienovu zákonu i se správnou hodnotou konstanty  $b$ . Dále plocha pod křivkou se úměrně zvětšuje s rostoucí teplotou a je rovna úhrnné záři, což souhlasí se Stefanovým-Boltzmannovým zákonem.

Planckův zákon se osvědčil na celém známém spektru vlnových délek a teplot.

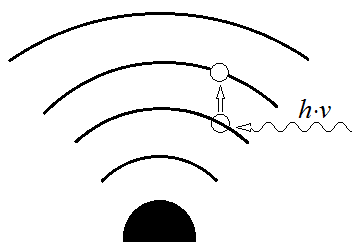
## 2.8 Elektromagnetická emise a absorpce

Ve zjednodušeném modelu atomu máme jádro a elektrony nacházející se okolo jádra na určitých energetických hladinách. Elektrony, které se nacházejí nejbližší jádru, mají

nejnižší energii a naopak elektrony, které se nacházejí na energetických hladinách nejdále od jádra, mají nejvyšší energii.

### 2.8.1 Absorpce

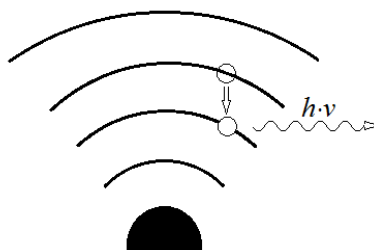
Elektromagnetické záření dopadající na atom, předává svá kvanta energie elektronům atomu a zaniká. Elektrony, jimž byla energie předána, se přenesou na vyšší energetické hladiny. Přenos probíhá skokem. V podstatě elektron přestane existovat na jedné energetické hladině a objeví se na druhé. Celkově se to projeví zvýšením kinetické a potenciální energie atomu.



Obr. 2.6: Princip absorpce

### 2.8.2 Emise

Přejde-li elektron z vyšší energetické hladiny skokem na nižší, vyzáří se energetický rozdíl hladin v podobě elektromagnetického záření. Protože každý prvek má od sebe jinak vzdálené energetické hladiny, emituje tak elektromagnetické záření o jiné vlnové délce. Například atom uhlíku emituje elektromagnetické záření o jiné frekvenci než třeba atom kyslíku.



Obr. 2.7: Princip emise elektromagnetického záření

Planck popisuje emisi a absorpci jako monochromatické děje, protože každému vyzářenému nebo pohlcenému kvantu přísluší určitá vlnová délka. Spojité spektrum elektromagnetického záření vzniká až při složení mnoha emisních pochodů.

Vyzářená energie v infračerveném spektru má za příčinu chladnutí tělesa, jež záření vyzařuje.

## 3 TERMORIZNÍ KAMERA

Název termovizní kamera vznikl z názvu prvního výrobce infračervených kamer, firmy Thermovision. Obecně se vžil zkrácený název termokamera. Termokamery můžeme rozdělit podle způsobu použití na přenosné a stacionární.

**Přenosné** termokamery se využívají například při diagnostice a kontrole strojů či zařízení, ve stavebnictví, zdravotnictví atd. Kdežto **stacionární** termokamery se zejména využívají při kontrole teplot online, dále při výrobních procesech nebo v bezpečnostních aplikacích.

Termovizní systém pracuje na principu přeměny tepelného záření na viditelný obraz. Snímá intenzity infračerveného záření a pomocí detektoru je převádí na elektrické signály. Ty pak vyhodnocuje a zobrazuje na displeji v takzvané falešných barvách. Tepelný obraz pořízený termokamerou znázorňuje rozložení teplot na povrchu snímaného objektu. Jednotlivým rozmezím teplot jsou přiřazovány různé barvy. Vedle obrazu objektu je stupnice, která ukazuje přiřazení barev k jednotlivým zobrazeným teplotám.

Kamery disponují sadou palet, které vyobrazí stejný snímek v různých barvách. Podle potřeby se volí příslušná paleta. V příloze je přehled palet demonstrován na jednom snímku.

Podle způsobu přeměny infračerveného záření dělíme detektory na tepelné a kvantové.

### 3.1 Vývoj termovizních systémů

V roce 1965 byla představena první termovizní technika na nevojenské účely, určená především pro komerční a vědecké zaměření. V roce 1973 vznikl první přenosný skenovací systém napájený z baterie. Byl určený pro predikční údržbu průmyslových aplikací. O deset let později, v roce 1983, vznikl první teplotní zobrazovací a měřicí systém s možností zobrazení měřené teploty na obrazovce. S rokem 1989 se objevily na trhu infračervené kamery se zabudovanou digitální pamětí. V roce 1993 vznikl první FPA (Focal Plane Array) detektor, což je maticový detektor s velkým množstvím detekčních plošek, které najednou snímají infračervené záření cele viditelné plochy. O dva roky později byly představeny přenosné termokamery s FPA detektory a s možností nahrávání. Roku 1997 vznikl první nechlazený systém s FPA (nechlazeným) mikrobolometrem. V roce 2002 byl představen první automatizovaný termovizní systém s odpojitelným panelem dálkového ovládání s LCD displejem, pamětí na obrazy ve formátu JPEG, rozšířenou konektivitou (rozhraní USB, IrDA) a možností záznamu teplotních, vizuálních, hlasových a textových dat. Tentýž rok se na scéně objevily první cenově příznivé a velmi kompaktní příruční termovizní kamery. V roce 2003 vznikly kompaktní infračervené kamery pro pevnou instalaci. Tyto kamery byly určeny pro automatizaci a zabezpečení. Rok na to vznikly kamery speciálně zkonstruované pro

termovizní sledování budov. V dnešní době představují termovizní systémy velice perspektivní obor. Vznikají různé specializované kamerové systémy a do budoucna lze očekávat další vývoj.

## 3.2 Kvantové detektory

Kvantové detektory dosahují výborných elektrických vlastností. Využívají přímé přeměny dopadajícího záření na elektrický náboj, respektive elektrický proud. Jedná se o polovodičové systémy, ve kterých dochází k interakci s dopadajícím tepelným zářením. Elektronové detektory (nosiče elektrického náboje) absorbují kvanta energie tohoto záření a přecházejí na vyšší energetickou hladinu. Počet elektronů, tedy i velikost elektrického signálu je přímo úměrný intenzitě infračerveného záření. Díky tomu se časová konstanta kvantových detektorů pohybuje v mikrosekundové oblasti.

Nejčastějším materiálem využívaným na výrobu kvantových detektorů je tellurid rtuťnokademnatý HgCdTe, také označovaný jako CMT (Cadmium Mercury Telluride). Změnou složení této sloučeniny se nastavuje maximální citlivost v rozmezí  $3 - 5 \mu\text{m}$  nebo  $8 - 14 \mu\text{m}$ . Což je nesporná výhoda tohoto materiálu. Nevýhoda je jeho nekompatibilita s křemíkem. Důsledkem toho je složitější implementace na křemíkový čip.

Protože je signálový výstup kvantového detektoru malý, je silně ovlivňován šumem vznikajícím uvnitř součástky. Proto je nutné detektor chladit na velmi nízké teploty, aby byl tento šum eliminován. U detekčního pásma  $3 - 5 \mu\text{m}$  se detektor chladí na  $-80 \text{ }^\circ\text{C}$  a u pásma  $8 - 14 \mu\text{m}$  na  $-193 \text{ }^\circ\text{C}$ . Chlazení je tedy hlavní nevýhoda kvantových detektorů.

## 3.3 Tepelné detektory

Tepelné detektory využívají změny některé vlastnosti materiálu na základě absorpce infračerveného záření.

### 3.3.1 Pyroelektrický vidikon

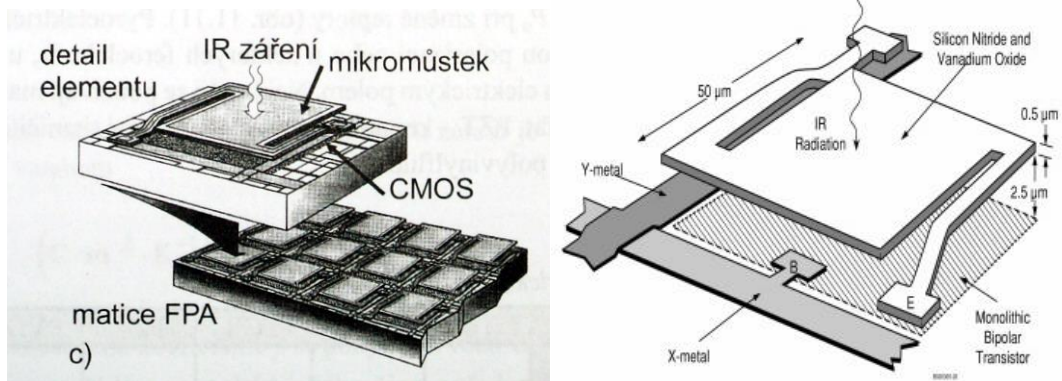
Pyroelektrický vidikon je variace na konvenční vidikonovou kamerovou trubici (elektronku). V této trubici je na přední straně umístěn pyroelektrický materiál ve formě matice. Matice je skenována elektronovým paprskem. Dopadající infračervené záření na matici je měněno na teplotu a pyroelektrickým efektem na změnu množství náboje na elektrodách. Tento detektor byl v termokamerách využíván před více jak 30 lety.



### 3.3.2 Bolometry

Mikrobolometrické obrazové snímače tvoří dvojrozměrné pole miniaturních bolometrických detektorů. Jsou založeny na principu změny elektrického odporu se změnou teploty u materiálů, které mění teplotu v závislosti na absorbovaném množství infračerveného záření. V principu jsou bolometry neselektivní detektory. To znamená, že jsou nezávislé na vlnové délce dopadajícího světla (spektrální rozdělení nemá žádný vliv na teplotní změny). Ve skutečnosti má povrch detektoru rozdílnou absorpci pro různé vlnové délky a nelze tak absolutní neselektivnosti dosáhnout. Používané materiály požadovaných vlastností bývají oxidy vanadu, amorfni křemík a kysličníky MgO, MnO, NiO, TiO<sub>2</sub>.

Bolometrický detektor (element) je realizován jako monolitický křemíkový substrát pokrytý teplotně citlivým odporovým materiálem, který absorbuje infračervené záření. Aby teplota detektoru byla závislá pouze na absorbovaném infračerveném záření, je odporově citlivý materiál tepelně izolovaný od substrátu. Nejčastěji se setkáváme s oddělením vzduchem, kde přívodové vodiče drží mikromůstek ve vzdálenosti přibližně 2,5  $\mu\text{m}$  nad substrátem. Novější snímače mají, pro lepší účinnost, pod jednotlivými elementy nanесenu reflexní vrstvu, která odráží neabsorbované záření zpět do elementu. Tato vrstva také potlačuje vliv teploty substrátu, protože jím emitované infračervené záření odráží zpět. Teplotní změny takového elementu představují poměrně pomalý proces. Časová konstanta bolometrů se podle konstrukce pohybuje mezi 1 až 50 milisekundami.



Obr. 3.1: Detail bolometrického detektoru (elementu) [3]

Řízení bolometrických snímačů je podobné jako třeba u CCD obrazových snímačů. Čtení a adresování pole detektorů probíhá po řádcích. U moderních bolometrů se můžeme setkat s obvodem pro standardizovaný analogový nebo digitální výstup přímo na čipu bolometru.

Nespornou nevýhodou nechlazených bolometrů je rušení zvané *fixed pattern noise*. Jedná se o rušivý obrazec, který vzniká odlišnými vlastnostmi jednotlivých elementů v poli. Mikroskopické rozdíly rozměrů, ale především nerovnoměrné rozložení teploty v ploše čipu a jeho časová změna, má za příčinu chybu na výsledném obrazu. Největší

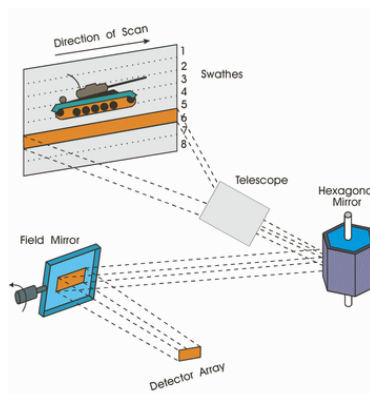
vliv na toto rušení má rozdílný offset jednotlivých elementů snímače. I přes to se v civilních aplikacích využívají zejména nechlazené bolometry. A to z důvodu mnohonásobně nižší ceny. Existují algoritmické metody, které mají za snahu kompenzovat odlišné vlastnosti jednotlivých elementů pouze na základě znalosti výstupního signálu. Fungují však pouze za omezených (laboratorních) podmínek a praxi se zatím nedají využít.

Nejjednodušší způsob kompenzace je použití dvou tepelných clon. Clony musejí být dostatečně homogenní, aby intenzita tepelného záření emitovaného clonou byla pro každý element detektoru stejná. Nejprve se detektor zastíní jednou clonou a poté druhou clonou o jiné teplotě. Díky tomu je možné určit kompenzační koeficienty, aby výstupy všech elementů byly stejné. Levnější termovizní systémy využívají pouze jedné tepelné clony, s jejíž pomocí kompenzují pouze offset výstupních signálů elementů.

Bolometry umístěny na Peltierově elementu (tzv. supravodivé bolometry) jsou mnohem přesnější, rychlejší a méně zatížené chybami. Peltierovým elementem je zajištěna teplota čipu v rozmezí  $\pm 0,1$  °C, čímž je minimalizován vliv nerovnoměrného rozložení teploty uvnitř snímače na výsledný obraz. Není však možné tento vliv úplně eliminovat.

### 3.4 Skenovací systém

Tento systém vznikl v době, kdy ještě nebylo možné vyrábět detektory s velkým počtem snímacích elementů. Ke snímání infračerveného záření používá zpravidla kvantové detektory. Jedná se o vyladěný optický systém, který vzorkuje scénu vhodným krokem a jednotlivé body scény přenáší na jeden snímací element (detektor). K tomuto účelu byly navrženy vhodné skenovací techniky. Ale přesto tato skutečnost v praxi znamenala nutnost extrémně rychlého optického systému. Později tento systém začal využívat detektor se sérií elementů. Tím bylo možné skenovat scénu po větších částech, dokonce až po řádcích.



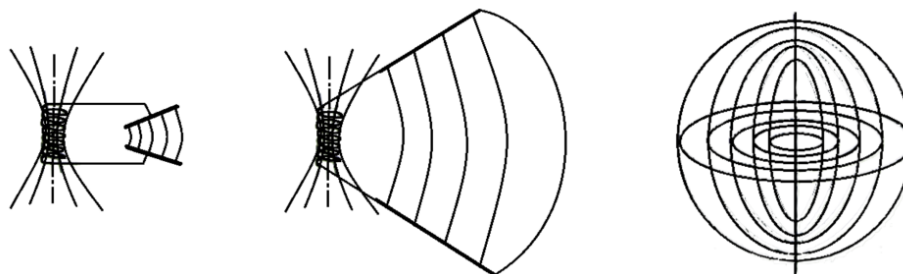
Obr. 3.2: Skenovací systém [7]

Skenovací systém byl u termokamer nejvíce užíván v 2. polovině 80 let až asi do poloviny 90. let.

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Pro začátek uvedeme několik zákonitostí týkajících se měření termovizní kamerou, abychom věděli, co vůbec od takového měření lze očekávat.

Látky všech skupenství vydávají elektromagnetické záření, které má původ v termických pohybech nabitých částic a nazývá se tepelné záření. Zde si vysvětlíme, odkud se záření bere. Spokojme se s představou, vycházející z předpokladu, že se na povrchu objektů nachází velké množství elementárních zářičů (elektromagnetických oscilátorů). Abychom si takovýto elementární zářič dovedli lépe představit, hledme na něj jako na otevřený oscilační obvod s kapacitou a indukčností. Takový obvod, aby udržel netlumené kmity, spotřebuje jistou energii, aby pokryl ztráty na ohmickém odporu. Cívka vytváří magnetické pole a kondenzátor elektrostatické pole. Cívku ponechme bez jádra. Desky kondenzátoru rozevírejte více a více do prostoru, až bude obvod nahrazen rovným vodičem, chceme-li drátem. Tím dostaneme otevřený oscilátor. Ten kolem sebe šíří magnetické a elektrické pole. Nejmenším případem takového vodiče je kmitající dipól, zvaný lineární oscilátor. Jeho kapacita a indukčnost je ovšem tak malá, že podle Thomsnova vzorce, jsou jeho kmity velmi krátké. Mají tedy krátkou dobu kmitu. Tepelné záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou větší než viditelné světlo, ale menší než mikrovlnné záření, též označováno jako infračervené záření.



Obr. 4.1: Přechod od otevřeného kmitavého obvodu k dipólu

### 4.1 Použité měřicí přístroje

Pro měření byla použita termokamera EasIR 4 a jako přesnější měřicí přístroj založený na stejném principu byl použit infrateploměr IR 1200-50D. Pro srovnání s jinou metodou měření bylo použito tepelné sondy typu K připojená k infrateploměru.

Oba přístroje byly při měřeních připojeny k počítači pomocí USB rozhraní a hodnoty z měření byly zaznamenávány každou vteřinu pomocí softwarů dodaných k přístrojům (Guide IrAnalyser pro termokameru a IR Thermometer pro infrateploměr). Zde se vyskytl problém. Guide IrAnalyser při nastavení záznamu po 1 vteřině pořizoval naměřené hodnoty sice po vteřině, ale s výpadky. To znamená, že za deset vteřin zaznamenal 8 až 9 hodnot. Proto se při porovnávání teplot pořízených termokamerou a

infrateploměrem musely záznamy upravit, tak aby obsahovali pouze hodnoty v časech, pro které byly pořízené oběma měřicími přístroji. Aby tyto úpravy nebylo nutné dělat, musela by se k měření použít termokamera s lepší softwarovou podporou.

K získávání teploty okolí, vlhkosti a tlaku byl použit analogový následně digitální vlhkoměr, teploměr, barometr. V následujících obrázcích, kde jsou grafické závislosti, byla použita tato zkratková konvence: S1 - hodnoty získané termokamerou, IR(C) - hodnoty získané infrateploměrem bezdotykově, TK(C) - hodnoty získané infrateploměrem pomocí drátového čidla.

V následujících tabulkách jsou uvedeny důležité technické parametry.

<b>Termokamera EasIR 4</b>	
Detektor typ	FPA nechlazený mikrobolometr 160×120 pix, 25µm
Spektrální rozsah	8 až 14µm
Field of View (FOV )	20,6°×15,5°, manuální i automatické ostření
Teplotní citlivost	≤0,1°K při 30°C
Snímací frekvence	50Hz PAL/60 NTSC
Digitální foto	CMOS senzor, 1600 x 1200 pix, 2 na 24 barev
Externí display	3,6" TFT vysoké rozlišení LCD
Display	Barevný 256 odstínů, 8 palet (duha, ocel, Č&B, atd.)
Video výstup	PAL/ NTSC, kompozitní video
Teplotní rozsah měření	-20°C až +250°C +350 a 1.200°C na přání
Přesnost	±2°C nebo ±2% platí vyšší hodnota
Měřicí módy	Bod, automaticky hot bod, auto alarm
Korekce emisivity	od 0.01 po 1.00
Laserový značkovač	třída 2 semiconductor laser
Pracovní teplota	-10°C až +60°C
Skladovací teplota	-20°C až +60°C
Vlhkost	10% až 95%, nekondenzující při skladování i měření

Tab. 4.1: Parametry termokamery EasIR 4

<b>Infrateploměr IR 1200-50D</b>	
Rozměry	(Š x V x H) 52 x 204 x 155 mm
Kalibrace možná podle	ISO/DKD
Počet pamětí	99
Doba odezvy	150 ms
Stupeň emisivity	0,1 - 1,0
Přesnost	1%
Rozsah měření teploty	-50 až +1200 °C
Optika (8:1 apod.)	2,084027778
Rozlišení teploty	0.1 °C
Další technické parametry	Rozsah měření drátového čidla typu K: -50 až +1350°C
Přesnost čidla	1,5%

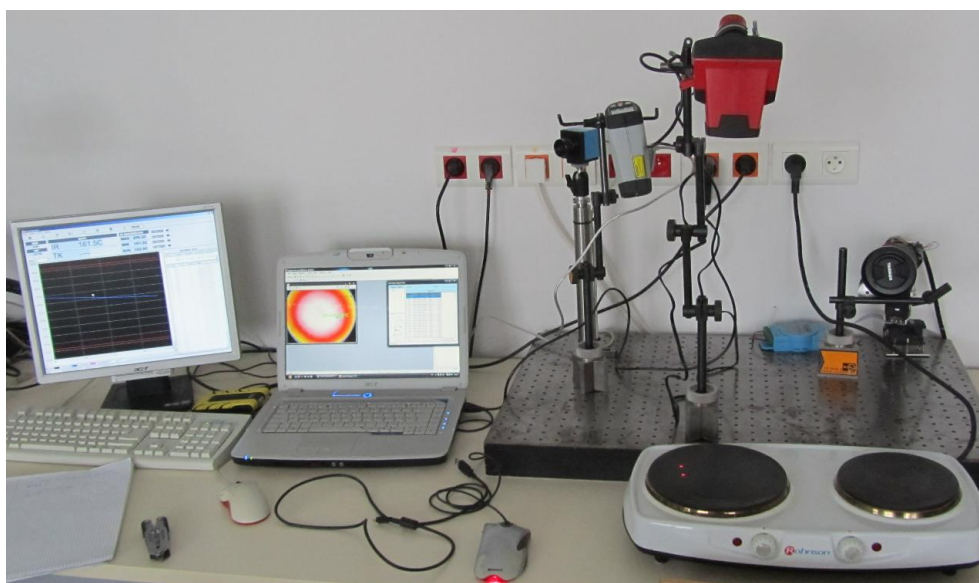
Tab. 4.2: Parametry infrateploměru IR 1200-50D

## 4.2 Experiment č. 1: Měření vlivů vlhkosti

Jedním z nastavitelných parametrů termokamery je vlhkost. Slouží ke korekci měřené teploty v různých vlhkostech prostředí. Cílem prvního experimentu je zjistit vliv vlhkosti prostředí na přesnost měření termokamerou.

### 4.2.1 Měření při různé vlhkosti

V první části jsou provedena měření při různých vlhkostech ve srovnání s infrateploměrem. Za zdroj tepelného záření byla použita litinová plotýnka. Kamera byla upevněna kolmo nad plotýnkou ve výšce 48cm. Vedle kamery byl upevněn infrateploměr tak, aby nezasahoval do snímané scény kamery. Rozložení pracoviště je na obrázku 4.2.



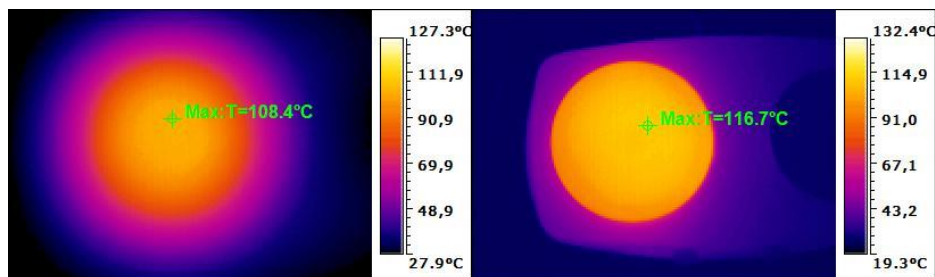
Obr. 4.2: Pracoviště při měření na plotýnce

Na infrateploměru i na termokameře se nastavila emisivita na 0,81. Tato emisivita odpovídá tabulkové hodnotě pro hrubou litinu. Ostatní parametry kamery (teplota okolí, vzdálenost, vlhkost) byly nastaveny pro každé měření individuálně podle tabulky 1.3.

Měření č.	Tlak [hPa]	Teplota okolí [°C]	Vlhkost [%]
1	992	23	41,5
2	994	23	36
3	983	25	30

Tab. 4.3: Podmínky měření

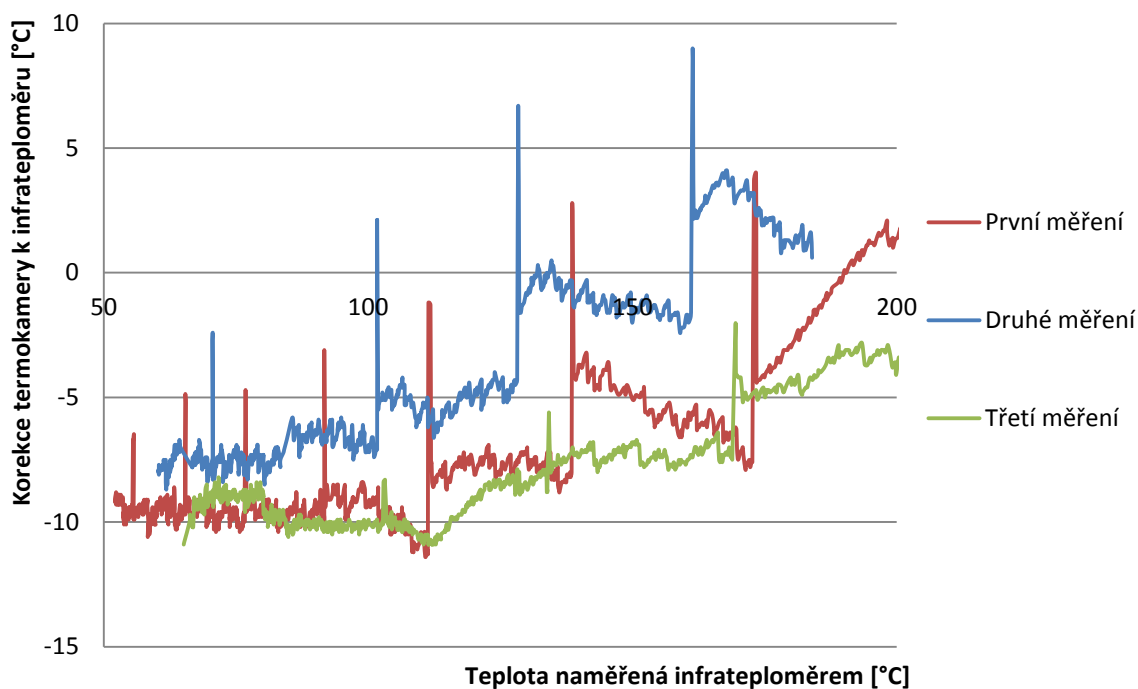
Před vlastním měřením byla plotýnka roztopena na více jak 100 °C a následně na ni byla zaostřena optika kamery. Dobré zaostření je důležité pro získání skutečného tepelného obrazu viz obr. 4.3. Měření bylo realizováno při chladnutí plotýnky.



Obr. 4.3: Zaostřený a nezaostřený tepelný obraz

Na obrázku 4.4 jsou vidět výsledky z těchto měření. Graf znázorňuje korekci (hodnotu, kterou musíme přičíst k naměřené hodnotě, abychom získali konvenčně pravou hodnotu) termokamery k infrateploměru. Píky a následné skoky hodnot korekčních křivek jsou způsobené zakrytím snímače termokamery clonou při kompenzaci *fixed pattern noise* rušivého obrazce.

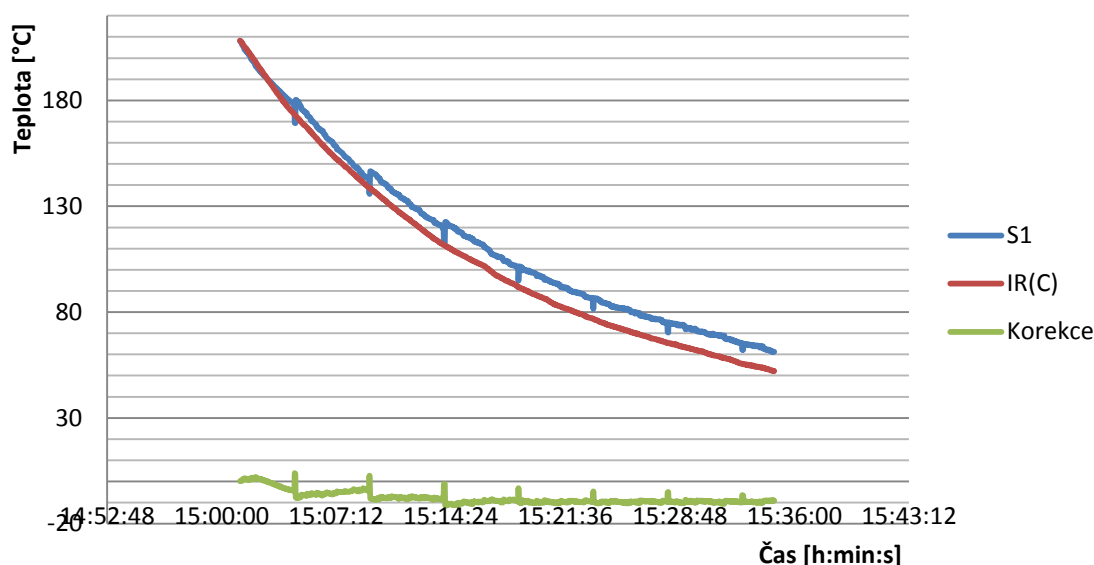
### Korekční křivky



Obr. 4.4: Korekční křivky

Na dalším obrázku 4.5 je vidět průběh prvního měření.

## Průběh měření při vlhkosti 41,5%



Obr. 4.5: Průběh měření

Při měření se nejvíce projevil rušivý obrazec nechlazeného bolometrického snímače termokamery. Z tohoto důvodu není vliv vlhkosti na toto měření průkazný a výsledky slouží spíše pro demonstraci vlivů rušení. Tomu se můžeme vyvarovat použitím termokamery s chlazeným detektorem, kde nedochází k tak velkému rušení a není nutná tak častá kompenzace.

### 4.2.2 Měření při stejné vlhkosti

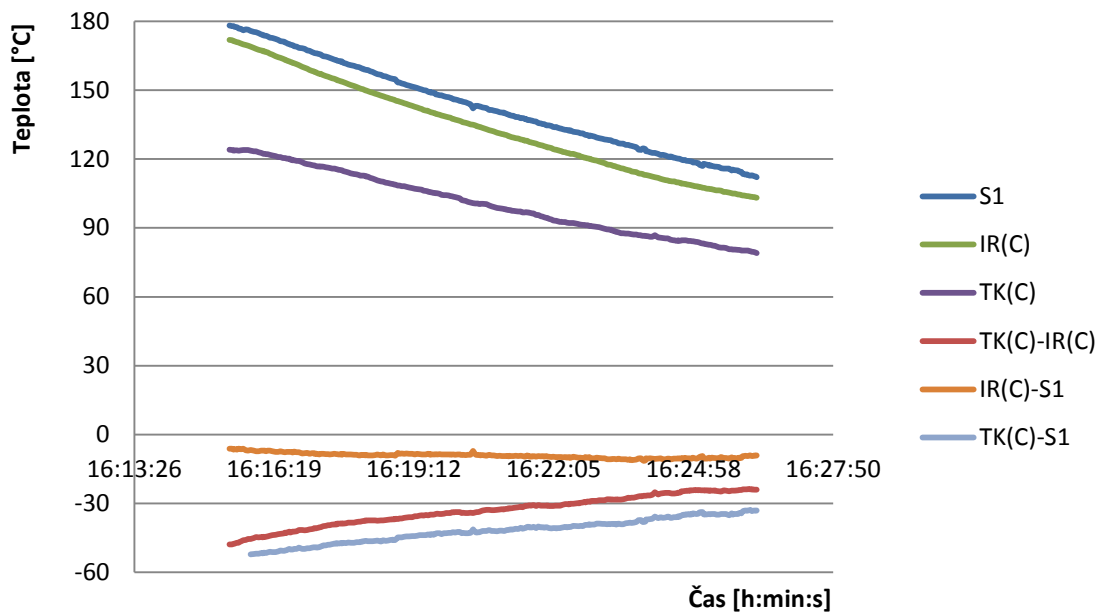
U dalšího zkoumání bylo zvoleno měření za stejné vlhkosti okolí a měněn byl parametr na termokameře. Pro srovnání měření i s jinou metodou, bylo použito drátového čidla typu K. Čidlo bylo přiloženo k místu snímání hodnot termokamerou a infrateploměr zaznamenával hodnoty bezdotykovou i dotykovou metodou. Rozložení pracoviště bylo stejné jako v předchozím případě. Na termokameře byly nastaveny parametry podle tabulky 1.4. Před každým měřením byla měněna již pouze vlhkost.

Podmínky měření	1	2	3	4	5
Tlak: 973,2 hPa					
Teplota okolí: 23,8 °C					
Vlhkost: 33%					
Měření č.	1	2	3	4	5
Nastavená vlhkost [%]	1	33	49	66	99

Tab. 4.4: Podmínky měření

Na následujícím obrázku 4.6 je vidět průběh jednoho měření.

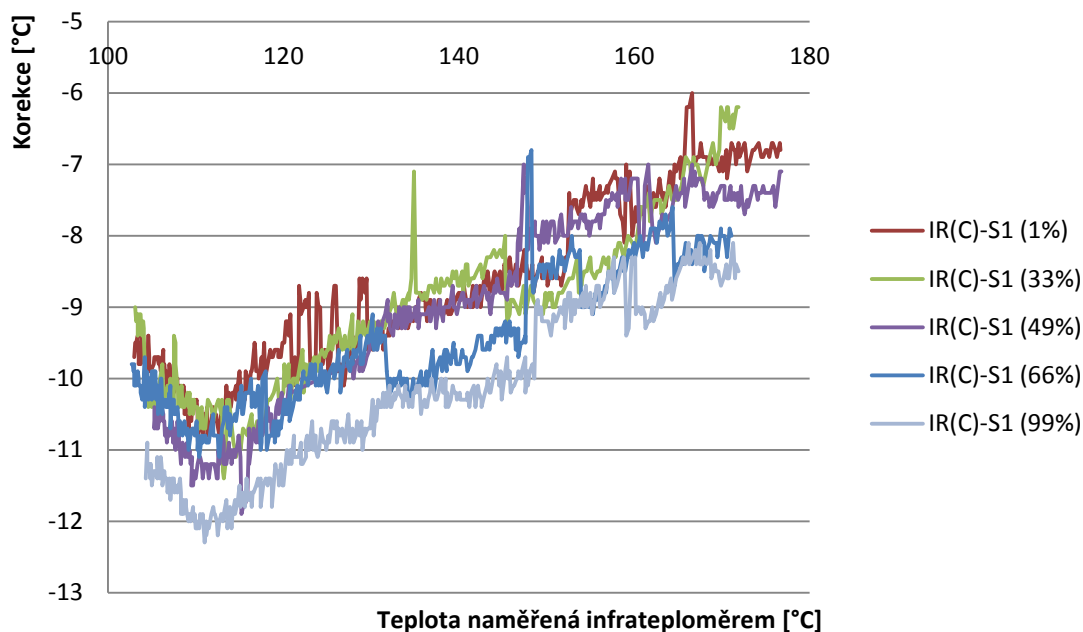
## Průběh měření při nastavené 33% vlhkosti



Obr. 4.6: Průběh měření

Na obrázku 4.7 jsou znázorněny korekční křivky termokamery k infrateploměru pro jednotlivá nastavení vlhkosti.

## Korekční křivky



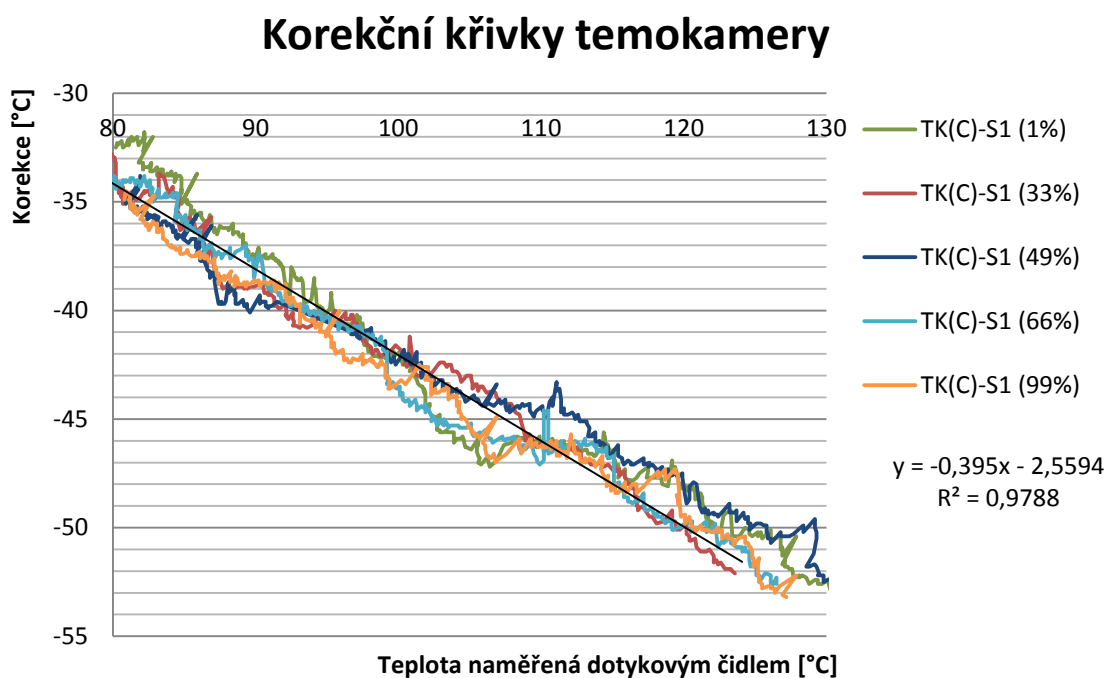
Obr. 4.7: Korekční křivky



U nastavení vlhkosti platí, že čím je větší hodnota nastavené vlhkosti, tím větší je korekční hodnota, kterou termokamera přičítá k naměřené hodnotě. To je vidět u korekčních křivek, pro vlhkosti 1 a 99 procent, které téměř ohraničují ostatní křivky. Z rozsahu 100-110°C, kde jsou korekční křivky nejlineárnější, byla určena hodnota rozdílu křivek, pro vlhkosti 1 a 99 procent, na 1°C.

Vliv nastavení různé vlhkosti, při vzdálenosti kamery 48cm od zdroje, je měřitelný. Zároveň je menší než přesnost obou měřících přístrojů. Z toho důvodu nelze s určitostí říci, že křivky jsou svisle posunuté právě na základě různého nastavení vlhkosti. Za předpokladu, že nastavení vlhkosti na termokameře má plně kompenzovat vliv vlhkosti prostředí na měření, můžeme říci, že vliv vlhkosti na naměřené teploty termokamerou je menší než vlastní přesnost této termokamery. Proto není možné určit vlhkost při znalosti ostatních parametrů a skutečné teploty měřeného objektu. Vlhkost tedy nemá vliv na měření s touto termokamerou. Ovšem u přesnějších termokamer, které dosahují větší přesnosti než  $\pm 1$  °C už vliv má a tedy i nastavení parametru vlhkost má smysl.

Na dalším obrázku 4.8 jsou zobrazeny korekční křivky termokamery k hodnotám získaným pomocí dotykového čidla infrateploměru.



Obr. 4.8: Korekční křivky

U těchto křivek, už není patrný ani posun ve svislé ose v závislosti se změnou nastavení vlhkosti a křivky se mezi sebou protínají v rámci přesností měřících přístrojů. Byla zjištěna pouze multiplikativní a aditivní chyba mezi bezdotykovou a dotykovou metodou tohoto měření. K multiplikativní chybě dochází nejčastěji při nedostatečně přesném nastavení prvků měřícího přístroje. Jelikož jediným společným parametrem nastavovaným u bezdotykového měření na termokameře i infrateploměru je emisivita,

může být skutečná emisivita litinové plotýnky jiná než tabulková hodnota emisivity pro hrubou litinu.

### 4.3 Experiment č. 2: Měření na různou vzdálenost

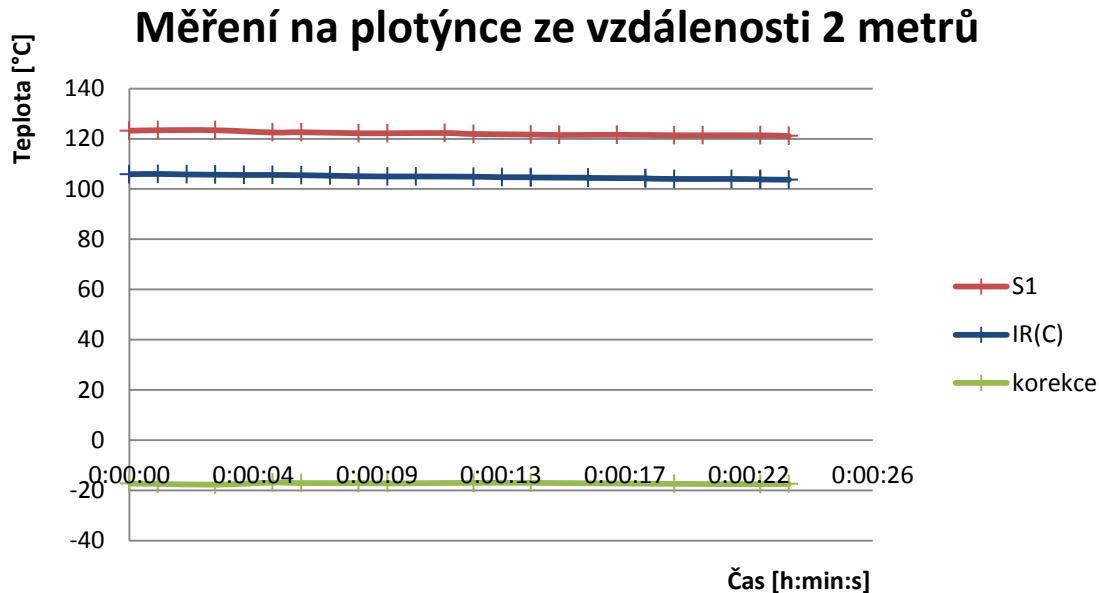
Dalším z nastavitelných parametrů termokamery je vzdálenost. Slouží ke korekci naměřených hodnot podle vzdálenosti měřeného místa od termokamery. Dále jsou popsána měření, jejichž cílem je zjistit, má-li vzdálenost měřeného místa od termokamery vliv na přesnost naměřených hodnot.

Jako měřený zdroj tepelného záření byla použita plotýnka. Její teplota byla měřena termokamerou ze vzdálenosti 2 až 4,5 metru, s krokem vzdálenosti půl metru. Kontrolní teploty plotýnky byly měřeny infratepleměřem z konstantní vzdálenosti. Před měřením byly nastaveny parametry termokamery podle tabulky 1.5 a emisivita byla nastavena na 0,81. Parametr vzdálenost byl měněn pro každé měření zvlášť podle skutečné vzdálenosti mezi termokamerou a zdrojem.

Tlak [hPa]	Teplota okolí [°C]	Vlhkost [%]
993	21	36

Tab. 4.5: Podmínky měření

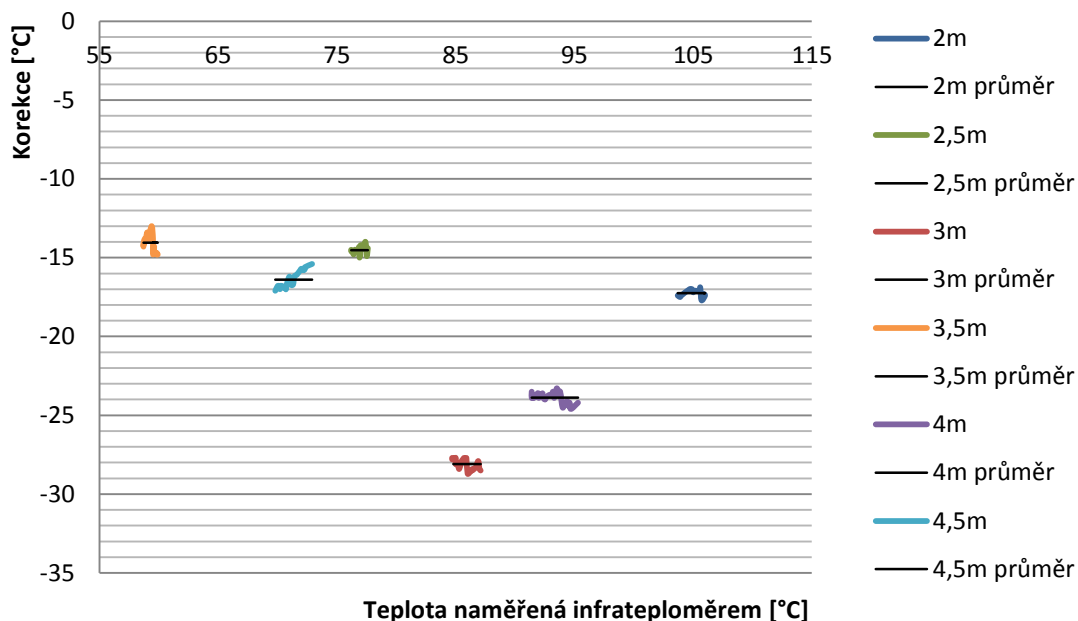
Průběh jednoho měření můžeme vidět na obrázku 4.9



Obr. 4.9: Průběh měření

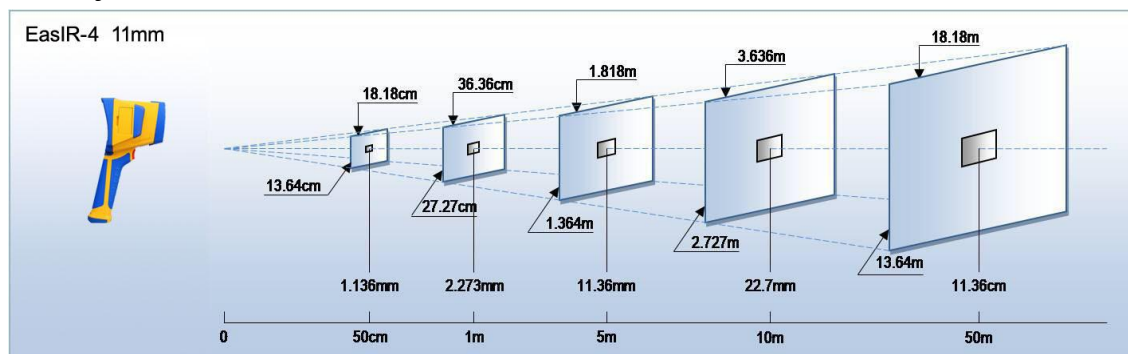
Porovnání korekcí z měření na měřených vzdálenostech je na obrázku 4.10

## Korekční křivky jednotlivých měření



Obr. 4.10: Korekční křivky

Ze získaných dat bylo zjištěno, že vliv vzdálenosti termokamery od místa měření je dostatečně kompenzován parametrem vzdálenost. Z obrázku 4.10 je vidět, že korekční odchylky nejsou závislé na vzdálenosti. Větší korekce, než je v rámci nepřesností měřících přístrojů, u měření na vzdálenost 3 a 4 metrů je způsobená nedokonalým zaměřením obou měřících přístrojů do jednoho bodu. Při správném nastavení parametru, ovlivňuje vzdálenost pouze velikost nejmenší možné měřené plochy, jak demonstruje obrázek 4.11.



Obr. 4.11: Měření vzdálenosti a zorného pole [9]

Pro představu, jak moc mění parametr vzdálenost naměřenou hodnotu, bylo provedeno měření z konstantní vzdálenosti a měněn byl pouze parametr. Měřeným zdrojem tepelného záření byl bílý kancelářský papír, jehož tabulková hodnota emisivity je 0,9. Vzdálenost termokamery byla 0,6 metru. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 1.6.

Nastavená vzdálenost [m]	0,1	2,5	5,0	7,5	10,0
Naměřená teplota [°C]	25,4	26,1	26,4	27,3	28,0
Rozdíl naměřených teplot [°C]	0,7		0,9		-
	-	0,3		0,7	

Tab. 4.6: Naměřené hodnoty při různě nastavené vzdálenosti

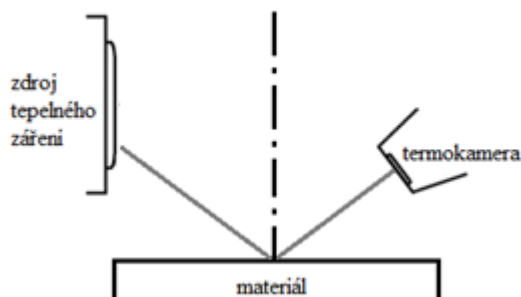
Protože přesnost termokamery na měřeném teplotním rozsahu je  $\pm 2^\circ\text{C}$ , jsou tyto hodnoty pouze orientační.

#### 4.4 Experiment č. 3: Odražené tepelné záření

Pozorováním bylo zjištěno, že při bezdotykovém měření termokamerou můžeme narazit na chybné snímání teploty a obrazu v důsledku odraženého tepelného záření. Cílem tohoto experimentu je seznámit se odraženým zářením a zjistit, jak se chová u různých materiálů a úhlů odrazu.

Pro kompenzaci teploty okolí slouží stejnojmenný parametr, který lze na termokameře nastavit. Ovšem odražené záření z tepelného zdroje, o vyšší teplotě než je teplota okolí, kompenzovat nelze a můžeme se mu pouze vyvarovat.

Pro demonstraci odraženého záření byly vybrány různé materiály různých vlastností, se kterými se běžně setkáváme: ocel, kancelářský papír, lesklý křídový papír, sklo zrcadla. Jako zdroj tepelného záření byla použita plotýnka. Na následujícím obrázku 4.12 je náčrt pracoviště.



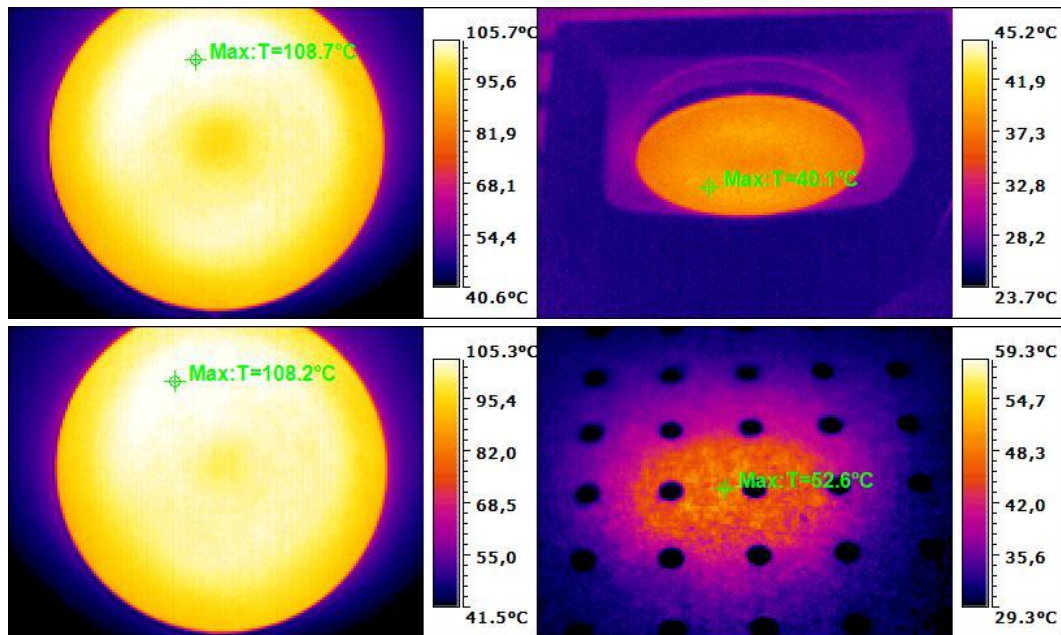
Obr. 4.12: Pracoviště

Způsob, jakým se projeví odražené záření při různých úhlech odrazu, můžeme vidět na obrázcích v příloze **Odražené záření**. Na obrázku 4.13 s odrazem na skle je vidět, jak leštěné povrchy odrážejí tepelné záření bez většího rozptylu. To může být mnohdy matoucí a může vést k záměně rušivého záření za emitované užitečné záření měřeného objektu.



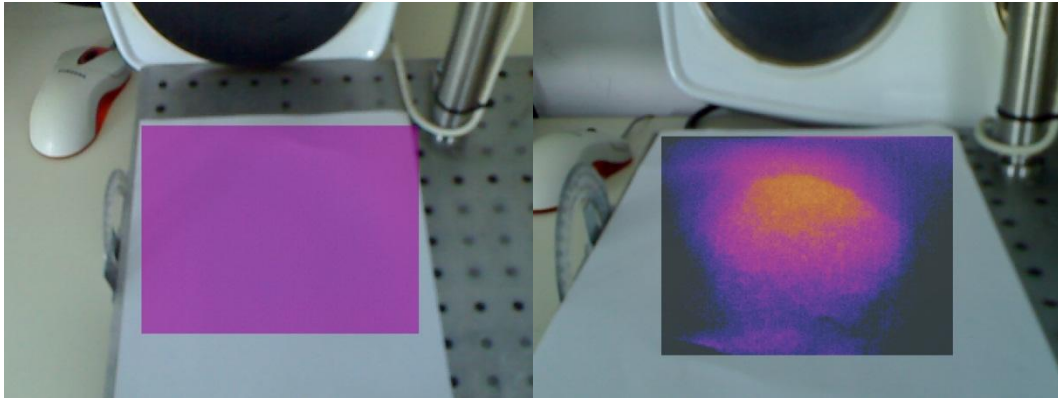
Obr. 4.13: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu při 45° odrazu na skle

U neleštěných povrchů už není odraz takto přesný a může se jevit zkreslený, rozmazaný apod. Přesto neleštěné povrchy mohou odrazet více zářivého toku než leštěné povrchy.



Obr. 4.14: Tepelné obrazy plotýnky a odrazu při úhlu 45° pro sklo (nahore) a ocel (dole)

Dále si můžeme všimnout, že se zmenšujícím se úhlem odrazu roste odrazivost materiálu. To je dobře vidět u kancelářského papíru (obr 4.15). Při snímání pod úhlem 75° a 45° není znát jakékoli odražené záření. Ovšem při snímání pod úhlem 25° a blízkém 0° je odražené záření viditelné.



Obr. 4.15: Proložení viditelného a tepelného obrazu při 60° (vlevo) a 25° (vpravo) odrazu na papíře

Důležité, při měření termokamerou, je si uvědomit, že i osoba provádějící měření je zdrojem tepelného záření, a proto může být při měření i zdrojem chyby v důsledku odraženého záření viz příloha **Odražené záření - odraz fotografa**.

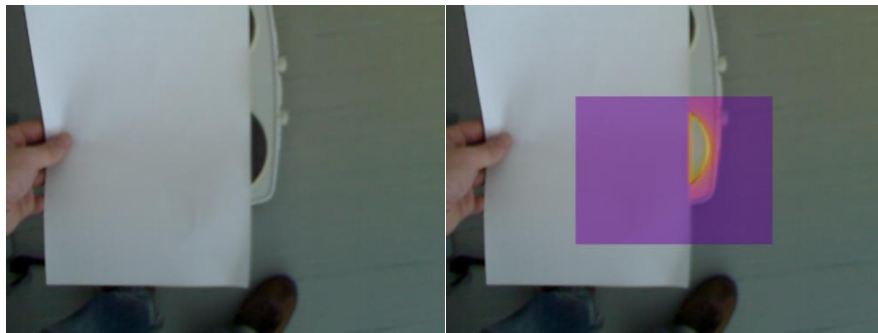
## 4.5 Experiment č. 4: Měření přes překážku

Teorie říká, že záření látek vychází z jejich povrchu a tak můžeme měřit pouze jejich povrchovou teplotu. Z toho důvodu nemůžeme měřit vnitřní teplotu nebo sledovat osoby v objektech. Existují však látky, které jsou pro tepelné záření transparentní, i když pro viditelné světlo být nemusí. Cílem tohoto experimentu je porovnání teorie s praxí a zjištění vlivu transparentní překážky na měření termokamerou.

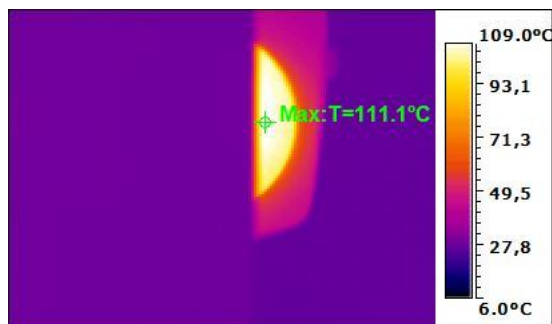
Pro experimentální měření tepla přes překážku byly vybrány materiály různé tloušťky a složení, se kterými se běžně setkáváme: papír, karton, dřevo, sklo, zdivo, polyetylen (v podobě běžně dostupného odpadkové pytle). Jako zdroj tepla za překážkou byla použita plotýnka a v jednom případě napájecí zdroj.

### 4.5.1 Papír

V tomto měření byl zdroj tepla zakryt překážkou z bílého kancelářského papíru.



Obr. 4.16: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu

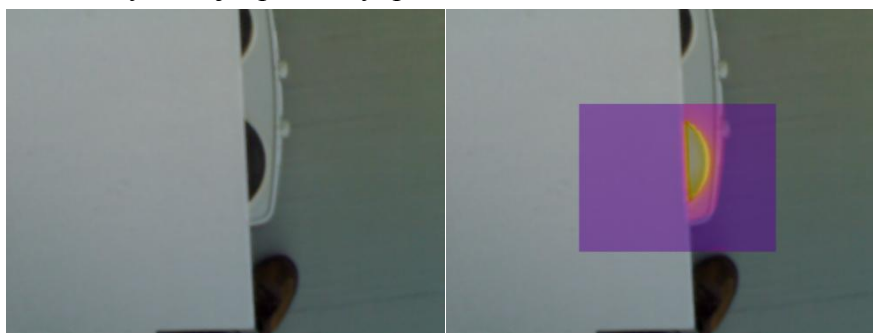


Obr. 4.17: Tepelný obraz

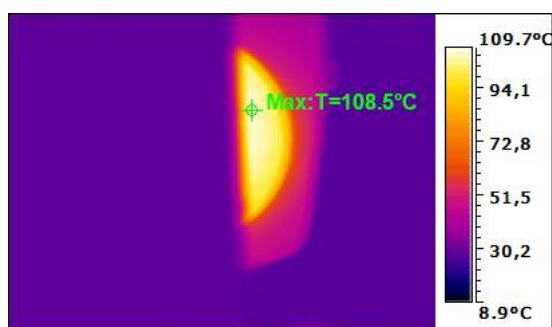
Na obrázcích 4.16 a 4.17 je vidět, že stejně jako ve viditelném spektru, tak i v infračerveném spektru elektromagnetického záření je materiál překážky netransparentní. Lze tedy měřit pouze jeho povrchovou teplotu, nikoli však teplotu objektů za ním. Se stejnými výsledky dopadlo měření přes následující materiály: karton, dřevo, zdivo.

#### 4.5.2 Karton

V tomto měření byl zdroj tepla zakryt překážkou z kartonu.



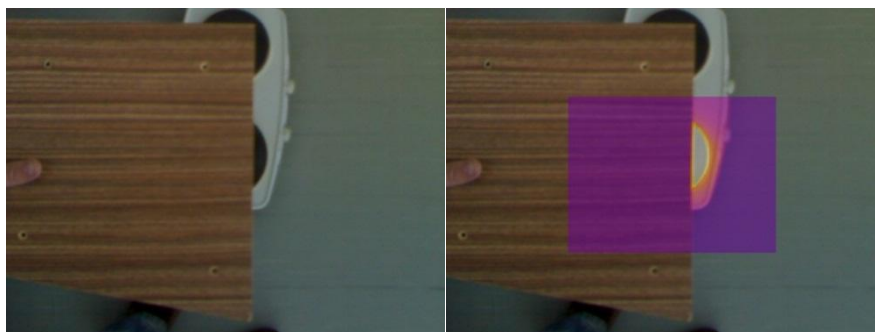
Obr. 4.18: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu



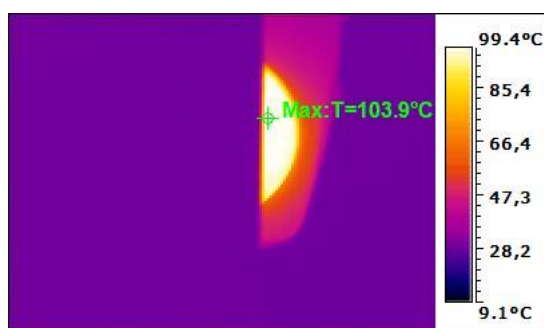
Obr. 4.19: Tepelný obraz

### 4.5.3 Dřevo

V tomto měření byl zdroj tepla zakryt překážkou ze dřeva.



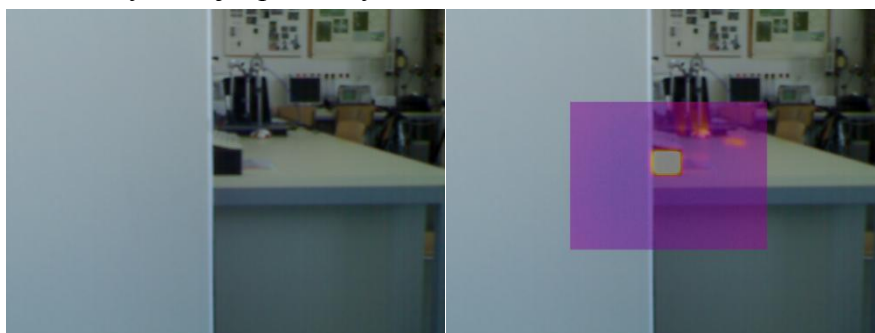
Obr. 4.20: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu



Obr. 4.21: Tepelný obraz

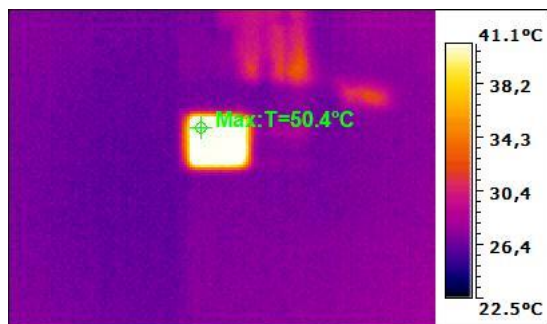
### 4.5.4 Zdivo

V tomto měření byl zdroj tepla zakryt zdí.



Obr. 4.22: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu

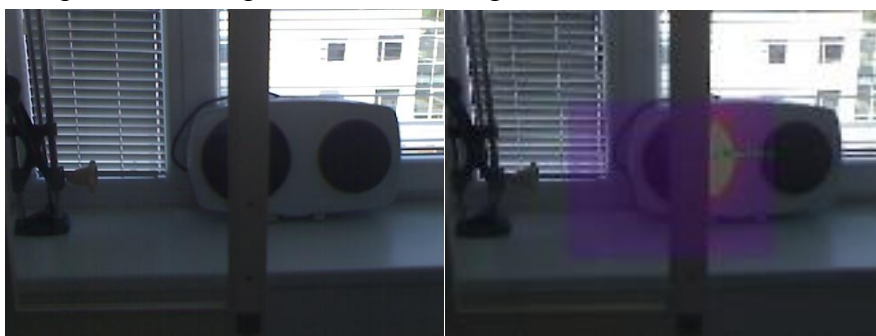




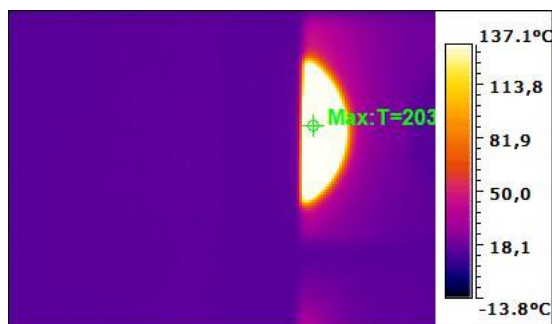
Obr. 4.23: Tepelný obraz

### 4.5.5 Sklo

V tomto měření byl zdroj tepla zakryt sklem, tedy překážkou z materiálu transparentního pro viditelné spektrum elektromagnetického záření.



Obr. 4.24: Viditelný obraz, proložení viditelného a tepelného obrazu



Obr. 4.25: Tepelný obraz

I v tomto případě lze měřit pouze povrchovou teplotu překážky a nikoli teplotu tepelného zdroje za ní. Z obrázků 4.16 až 4.25 je vidět, že se teorie shoduje s praxí. Tedy není možné měřit teplotu objektů, které se nacházejí za překážkou z materiálů netransparentních pro tepelné záření. A to ani v případě, kdy je materiál překážky transparentní pro viditelné záření. Protože sklo pro tepelné záření transparentní není, vyrábějí se optické prvky u termovizních systémů ze speciálních materiálů jako germanium, sfalerit (sulfid zinečnatý), selenid zinku, safír a další.

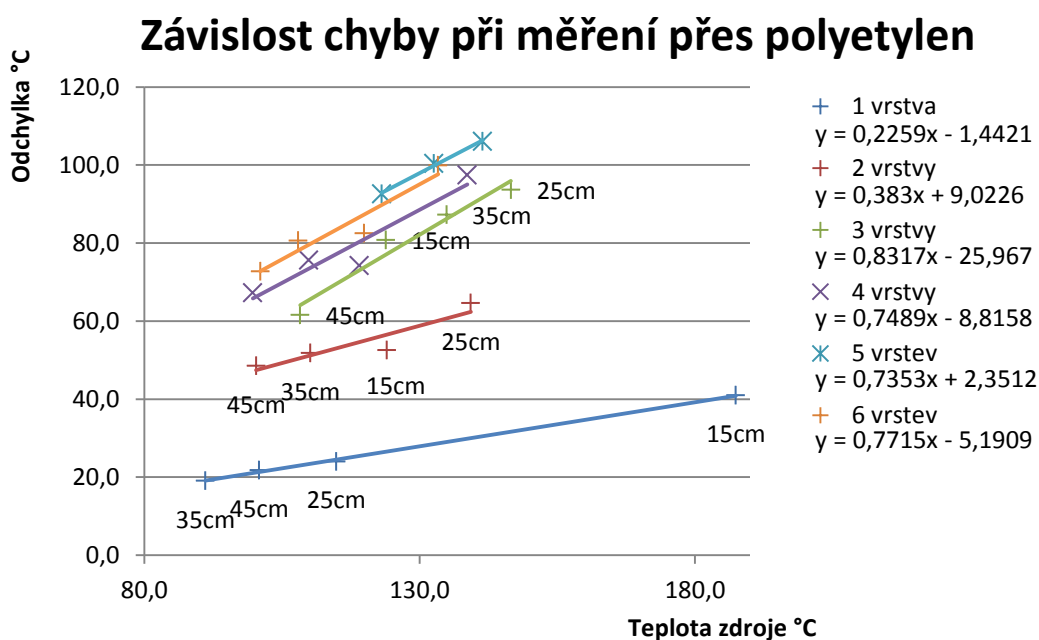
## 4.5.6 Polyetylen

Pro zkoumání vlivů transparentní překážky na vlastnosti měření teploty termokamerou byla použita polyetylenová fólie, jako materiál překážky. Na obrázku 4.26 je sestava pracoviště. Měření bylo provedeno přes clonu ve čtyřech polohách: 15, 25, 35 a 45 cm nad zdrojem tepla, postupně pro jednu až osm vrstev fólie.



Obr. 4.26: Pracoviště

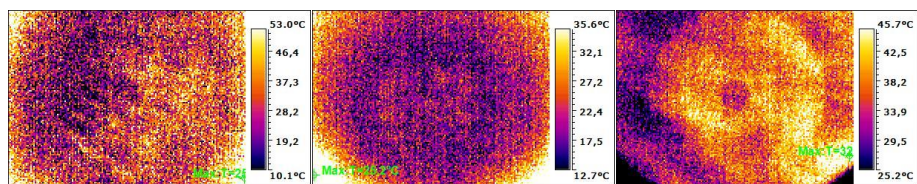
Při takovém měření vzniká mnoho nepřesností v tepelném obraze vlivem nehomogenity materiálu a nedokonalým přitisknutím jednotlivých vrstev fólie na sebe. Z tohoto důvodu je měřená nejvyšší teplota v obraze. Další nepřesnosti má za vinu výše popsaný způsob kalibrace termokamery.



Obr. 4.27: Grafická závislost chyby při měření přes polyetylen

Poloha [cm]	S1 [°C]	IR [°C]	IR-S1 [°C]	IR-S1 [%]	Tepelný obraz
1 vrstva polyetylenové fólie					
15	146,5	187,4	41,0	21,9	
25	90,8	114,8	24,0	20,9	
35	72,0	91,1	19,1	20,9	
45	79,0	100,8	21,8	21,6	
2 vrstvy polyetylenové fólie					
15	71,5	124,1	52,6	42,4	
25	74,7	139,3	64,6	46,4	
35	58,4	110,2	51,8	47,0	
45	51,8	100,3	48,5	48,4	
3 vrstvy polyetylenové fólie					
15	46,7	108,3	61,6	56,8	
25	52,9	146,6	93,7	63,9	
35	47,6	134,9	87,3	64,7	
45	43,1	123,9	80,8	65,2	
4 vrstvy polyetylenové fólie					
15	44,8	119,0	74,3	62,4	
25	41,2	138,7	97,5	70,3	
35	32,4	99,7	67,3	67,5	
45	34,2	109,9	75,7	68,9	
5 vrstev polyetylenové fólie					
15	-	-	-	-	
25	35,4	141,5	106,1	75,0	
35	32,2	132,6	100,4	75,7	
45	30,5	123,1	92,6	75,2	
6 vrstev polyetylenové fólie					
15	37,4	119,9	82,5	68,8	
25	33,4	133,4	99,9	74,9	
35	28,3	101,1	72,8	72,0	
45	27,3	108,0	80,7	74,7	
S1-hodnota měřená termokamerou, IR-hodnota měřená infrateploměrem					

Tab. 4.7: Měření přes polyetylenové fólie



Obr. 4.28: Tepelný obraz přes 7, 8 a 8 vrstev (uprostřed při teplotě zdroje 100°C a vpravo při 250°C)

Na obrázku 4.27 je znázorněna závislost odchylky naměřené teploty přes překážku od teploty zdroje měřené infrateploměrem při různých polohách clony, teplotě zdroje a počtu vrstev polyetylenové fólie. Je patrné, že rozdíl teplot se lineárně zvětšuje

s teplotou zdroje a to nehledě na polohu clony. Z důvodu nepřesností jsou křivky proloženy lineární spojnicí trendu. Dále se rozdíl teplot zvětšuje s počtem vrstev clony. To však není pravidlem. Vlivem nehomogenity materiálu se může stát, hlavně při měření přes více vrstev, že průchod tepelného záření může být v určitém místě lepší než při měření přes méně vrstev. Tohoto jevu si můžeme povšimnout u měření přes šest vrstev. S přibývajícím počtem vrstev se strmost křivek zvětšuje a přibližuje ke 40°. Od sedmi vrstev clony je již tepelný obraz, pro tuto teplotu zdroje, nečitelný.

Závěrem tohoto měření je poznatek, že měřit termokamerou teplotu zdroje přes překážku z transparentního materiálu pro infračervené záření možné je, ale pouze do určité tloušťky překážky. Tato tloušťka je navíc závislá na teplotě zdroje za překážkou. Dále je měření zatíženo chybou, a to tím větší, čím větší je tloušťka překážky.

## 4.6 Experiment č. 5: Měření za zhoršené viditelnosti

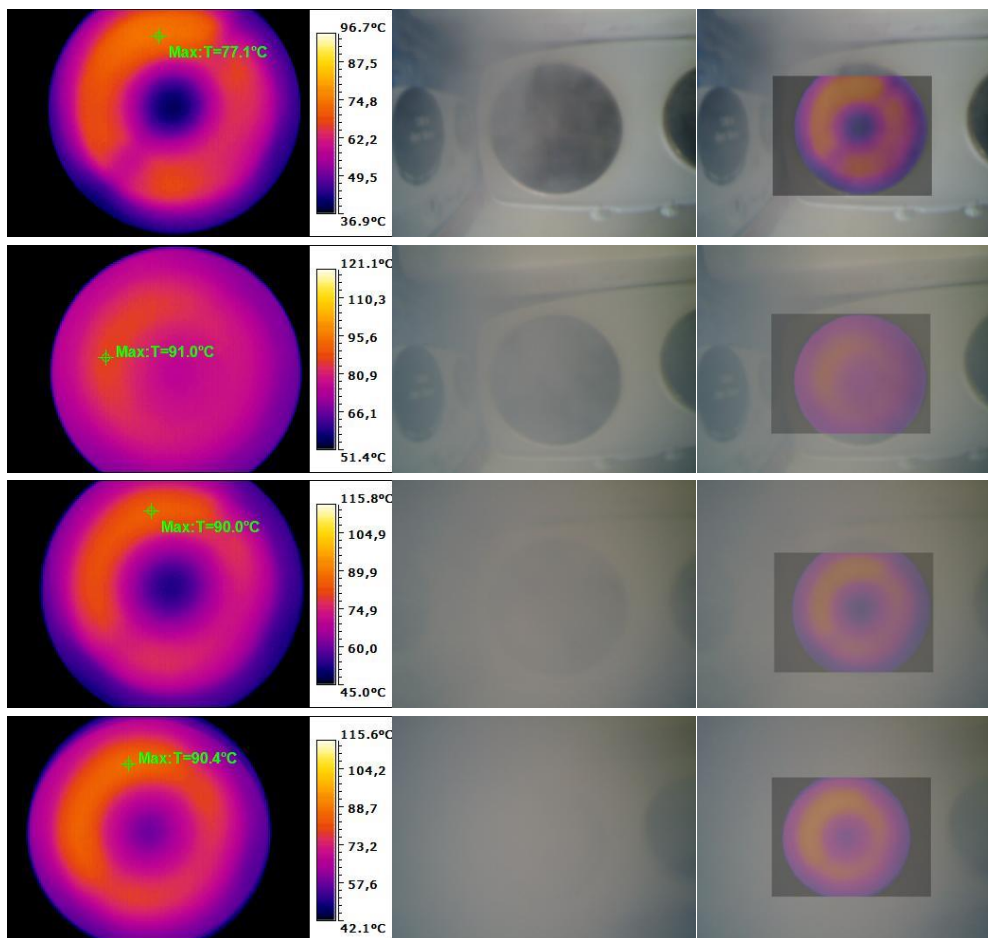
Dále je zkoumán vliv zamlženého prostředí na měření. Cílem tohoto měření je určení, zdali je možné měřit termokamerou v zamlženém prostředí a jaký vliv to má na přesnost měření.

Pro vytvoření mlhy byl použit mlhovač A-900. Mlha z tohoto mlhovače je tvořena vodními parami. Na obrázku 4.29 je vidět pracoviště při použití mlhovače.



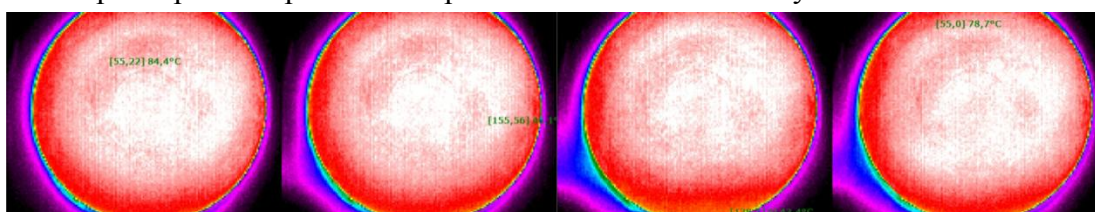
Obr. 4.29: Pracoviště při použití mlhovače

Vytvořením vrstvy mlhy mezi plotýnkou a kamerou bylo zajištěno neprůhledné prostředí pro viditelné záření a zkoumán byl vliv neprůhlednosti prostředí na snímání plotýnky termokamerou.



Obr. 4.30: Plotýnka ve viditelném a tepelném obraze při různém stupni zamlženém

I přes úplnou neprůhlednost prostředí se měřené hodnoty nelišili více než o 1 °C.



Obr. 4.31: Záznam z termokamery při snímání plotýnky pod mlhou

Na obrázku 4.31 je vidět záznam tepelného obrazu plotýnky při vystavení mlhy z mlhovače. Vliv mlhy na rozložení teploty na plotýnce byl pouze malý v důsledku proudění vzduchu při vypouštění mlhy. Z toho vyplývá, že termokameru můžeme bez větších problémů využít i v prostorách se sníženou či nulovou viditelností. Využívají toho zejména záchranné sbory při hledání osob v zakouřených budovách a zabezpečovací kamery.

## 5 ZÁVĚR

Cílem této semestrální práce bylo seznámit se s principem měření pomocí termovizní kamery a s charakterem získaných dat. Dalším cílem bylo navržení experimentů na demonstraci vlastností kamery.

Druhá kapitola objasňuje základní pojmy a fyzikální zákony, na nichž je založen princip fungování termovizní kamery. Dále vysvětluje pojem černého tělesa, což je ideální těleso, které pohlcuje veškeré dopadající záření a podle kterého se posuzují vlastnosti skutečných těles. Jeden z nejdůležitějších pojmů je intenzita záření  $H_e$ , která udává výkon přenesený zářením vyzařovaný definovanou plochou. Kirchhoffův zákon o úhrnném vyzařování [1] určil, že podíl intenzity vyzařování  $H_e$  a pohltivosti  $\alpha$ , která určuje poměr pohlceného záření k dopadajícímu, je závislý pouze na teplotě. Stefan [1] poté určil intenzitu vyzařování černého tělesa vztahem  $H_0 = \sigma T^4$ , kde  $\sigma$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta. Planck [1] později popsal kvantovou povahu světla a zařadil ho do většího souboru elektromagnetického záření. Také určil funkci monochromatického vyzařování černého tělesa.

Termokamera funguje na principu snímání tepelného záření, to je elektromagnetické záření s vlnovou délkou větší než viditelné světlo a menší než mikrovlnné záření. Pomocí detektoru snímá intenzitu tohoto záření a převádí ho na elektrické signály. Ty pak vyhodnocuje a zobrazuje na displeji jako obraz v takzvaných falešných barvách. Každá barva totiž vyjadřuje teplotu nebo teplotní rozsah a lze vybrat ze sady palet různé barevné stupnice. Detektory rozdělujeme podle způsobu přeměny dopadajícího záření na elektrické signály. Kvantové detektory využívají přímé přeměny dopadajícího záření na elektrický náboj. Kdežto tepelné detektory využívají změny některé vlastnosti materiálu na základě absorpce tepelného záření. Nejvíce používanými tepelnými detektory jsou bolometry, které využívají změny elektrického odporu. O tom blíže pojednává třetí kapitola.

Čtvrtá kapitola je věnována experimentům. Pro měření byla použita termokamera EasIR 4 a jako přesnější měřicí přístroj byl použit infrateploměr IR 1200-50D.

První experiment je zaměřen na zkoumání vlivů vlhkosti na měření. V tomto měření bylo zjištěno, že vliv vlhkosti na přesnost měření je menší než vlastní přesnost termokamery a tedy nemá vliv na měření touto kamerou. Z druhé strany, známe-li podmínky měření a skutečnou teplotu měřeného objektu, není možné, v důsledku přesnosti kamery, zjistit skutečnou vlhkost. V případě, že by jsme použili k měření termokameru s přesností menší než  $\pm 1$  °C, měla by vlhkost na měření vliv a nastavení parametru vlhkosti by mělo smysl.

Druhý experiment je zaměřen na zkoumání vlivů vzdálenosti měřeného místa od termokamery na přesnost měření. Měřením bylo zjištěno, že vliv vzdálenosti na přesnost měření je plně kompenzován správným nastavením tohoto parametru na termokameře. Přesné měření touto kamerou je na vzdálenost 0,1 až 10 metrů, což je

také nastavitelná vzdálenost tímto parametrem. Vzdálenost dále ovlivňuje nejmenší možnou měřitelnou plochu, kterou zvětšuje společně se vzdáleností viz obr. 4.11.

Třetí experiment je zaměřen na odražené záření. Pozorováním bylo zjištěno, že odražené záření může způsobit naprosto chybné určení teploty a tepelného obrazu měřeného místa. Pro kompenzaci teploty okolí slouží stejnojmenný parametr, který lze na termokameře nastavit. Ovšem odražené záření z tepelného zdroje, o vyšší teplotě než je teplota okolí, kompenzovat nelze a můžeme se mu pouze vyvarovat. Měřením na různých materiálech a při různých úhlech bylo zjištěno, že odražené záření se projevuje tím více, čím menší je úhel odrazu. Leštěné povrchy odrážejí tepelné záření bez většího rozptylu. To může být mnohdy matoucí a může vést k záměně odraženého rušivého záření za emitované užitečné záření měřeného objektu. V neposlední řadě je nutné si uvědomit, že i osoba provádějící měření je zdrojem tepelného záření, a proto může být při měření i zdrojem chyby v důsledku odraženého záření viz příloha **Odražené záření - odraz fotografa**.

Čtvrtý experiment je zaměřen na měření přes překážku. Teorie říká, že tepelné záření vychází z povrchu objektů a tak není možné měřit vnitřní teplotu objektů, nebo teplotu objektů za překážkou z netransparentních materiálů pro tepelné záření. Měření prokázalo, že teorie souhlasí s praxí. A tedy není možné měřit teplotu objektů za netransparentní překážkou pro tepelné záření a to ani v případě, že propouští viditelné světlo. Protože sklo pro tepelné záření transparentní není, vyrábějí se optické prvky u termovizních systémů ze speciálních materiálů jako germanium, sfalerit (sulfid zinečnatý), selenid zinku, safir a další. Měřit termokamerou teplotu zdroje přes překážku z transparentního materiálu pro infračervené záření možné je, ale pouze do určité tloušťky překážky. Tato tloušťka je navíc závislá na teplotě zdroje za překážkou. Dále je měření zatíženo chybou, a to tím větší, čím větší je tloušťka překážky.

Pátý experiment je zaměřen vliv zhoršené viditelnosti na měření. Ke zhoršení viditelnosti byl použit mlhovač. Vytvořením mlhy mezi plotýnkou a kamerou bylo zajištěno neprůhledné prostředí pro viditelné záření. Měřením bylo zjištěno, že i přes úplnou neprůhlednost prostředí pro viditelné záření se měřené hodnoty nelišili více než o 1 °C. Vliv mlhy na rozložení teploty na měřené plotýnce byl pouze malý v důsledku proudění vzduchu při vypouštění mlhy z mlhovače. Z toho vyplývá, že termokameru můžeme bez větších problémů využít i v prostorách se sníženou či nulovou viditelností. Využívají toho zejména záchranné sbory při hledání osob v zakouřených budovách a zabezpečovací kamery.

Do budoucna by se mohly provést experimenty na ověření teoretického předpokladu, že s termokamerou je možné měřit za úplné tmy a za různých světelných podmínek a to bez vlivu na naměřené hodnoty.

# Literatura

- [1] HOTÁK, Zdeněk; KROUPA, František. *Fyzika : Příručka pro fakulty strojního inženýrství*. Praha 1 : SNTL, 1966. 902 s
- [2] LYSENKO, Vladimír. *Detektory teplot pro bezdotykové měření*. 1. vydání. Praha : BEN-technická literatura, 2005. 153 s
- [3] *Www.Termokamera.cz* [online]. 2003 [cit. 2010-12-31]. Princip termografického měření. Dostupné z WWW: <[http://www.termokamera.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=4&Itemid=9](http://www.termokamera.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=9)>
- [4] Tepelné záření. Záření absolutně černého tělesa - Učební text k přednášce UFY102. Dostupné z WWW: <<http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf>>
- [5] *Http://www.termokamery.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-01-08]. EasiR 4 termokamera Dostupné z WWW: <<http://www.termokamery.cz/cs/produkt/easir-4-termokamera/>>
- [6] *Http://www.termokamery.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-01-08]. Infrateploměr IR 1200-50D USB. Dostupné z WWW: <<http://www.termokamery.cz/cs/produkt/infrateplomer-ir-1200-50d-usb/>>
- [7] *Http://automatizace.hw.cz* [online]. 2007-10-11 [cit. 2011-01-08]. Infračervené kvantové detektory a termokamery - úvod. Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/infracervene-quantove-detektory-termokamery-uvod>>
- [8] *Http://www.fluke.com* [online]. 2005 [cit. 2011-05-22]. Hodnoty emisivity běžných materiálů. Dostupné z WWW: <<http://www.fluke.com/fluke/czcs/Termokamery/Emissivity-table-TI.htm?PID=55967>>
- [9] *Http://www.guide-infrared.com* [online]. 2009 [cit. 2011-05-22]. EasiR-4 Robust & Fast-short Thermographic Camera. Dostupné z WWW: <<http://www.guide-infrared.com/Content.aspx?lang=en&id=195>>



# Seznam příloh

Příloha 1. Odražené záření ...

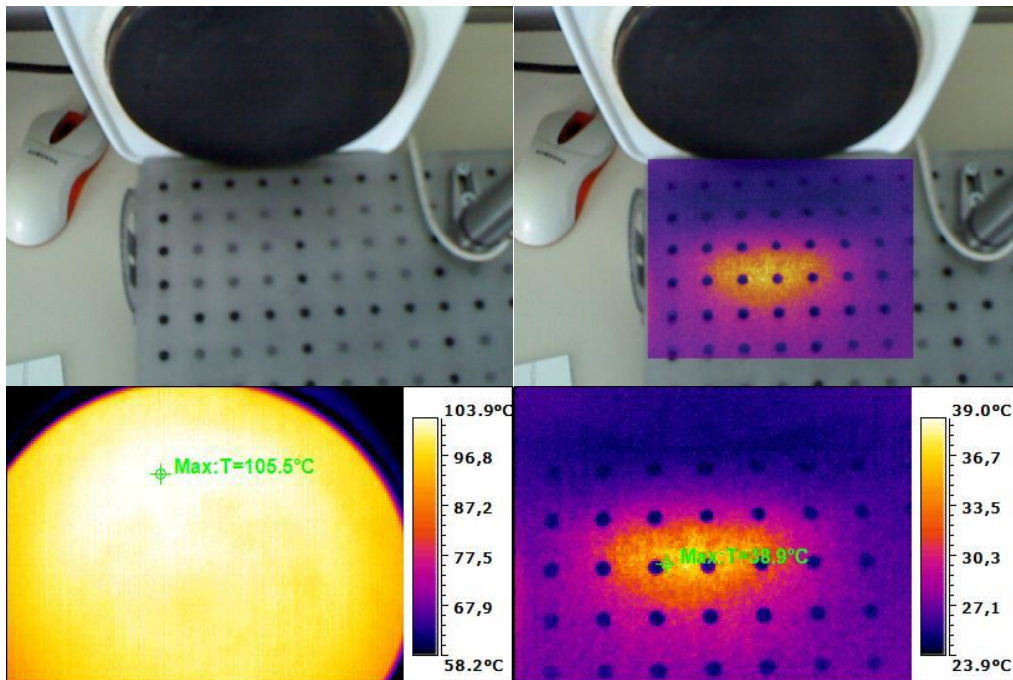
Příloha 2. Přehled barevných palet ...

Příloha 3. CD/DVD ...

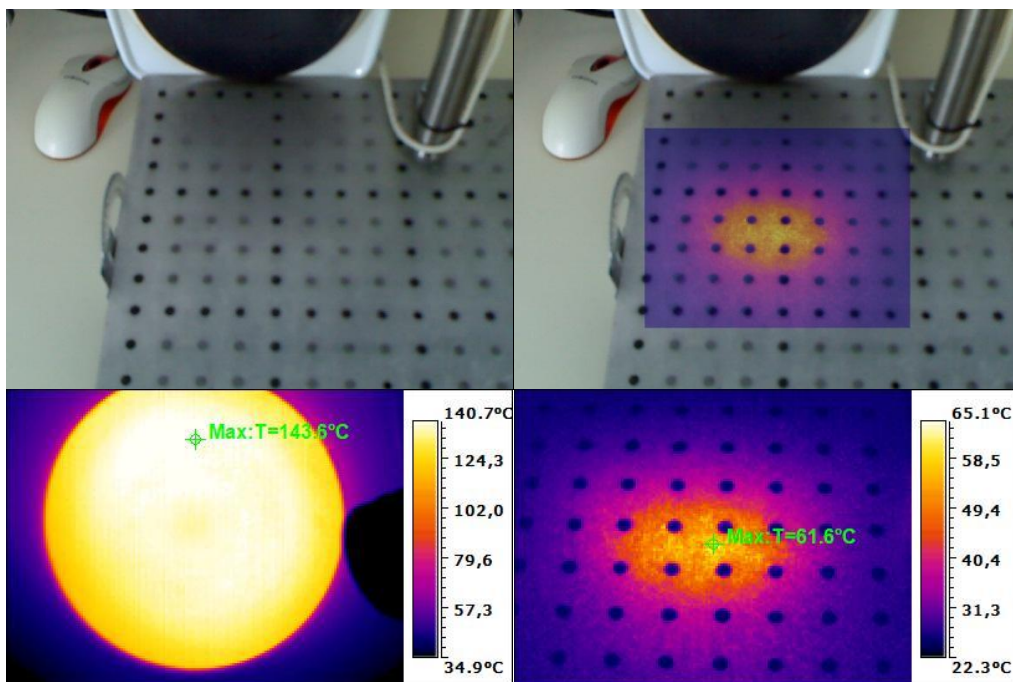
# Odražené záření

## Ocel

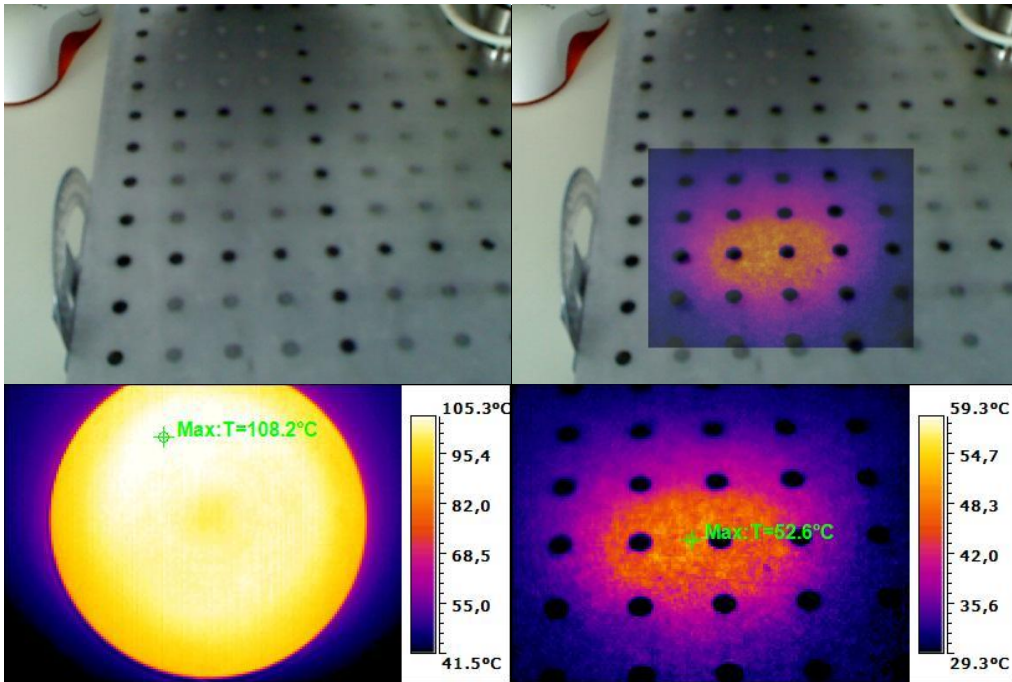
Úhel 75°



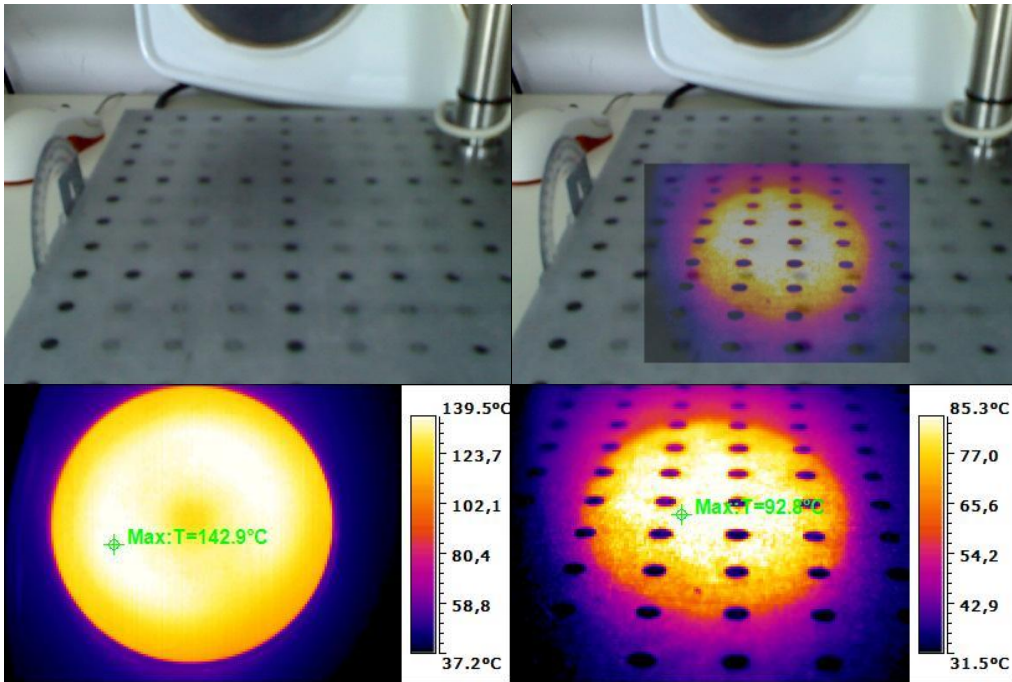
Úhel 60°



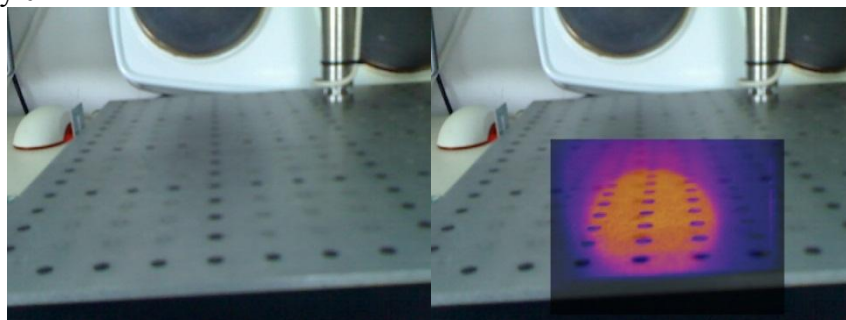
Úhel 45°



Úhel 25°

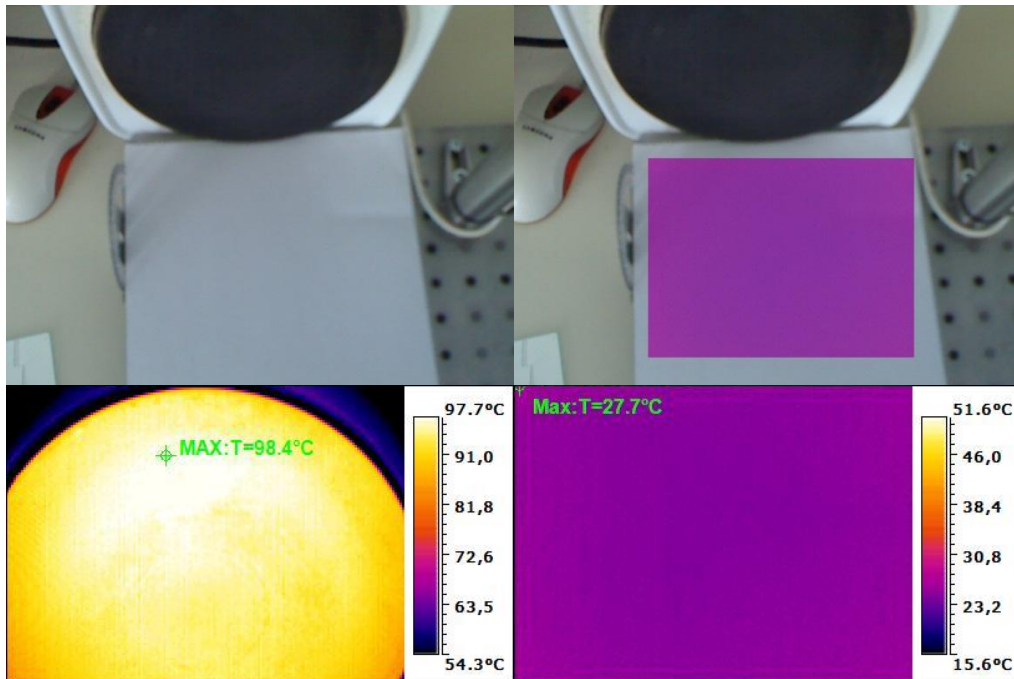


Úhel blížký 0°

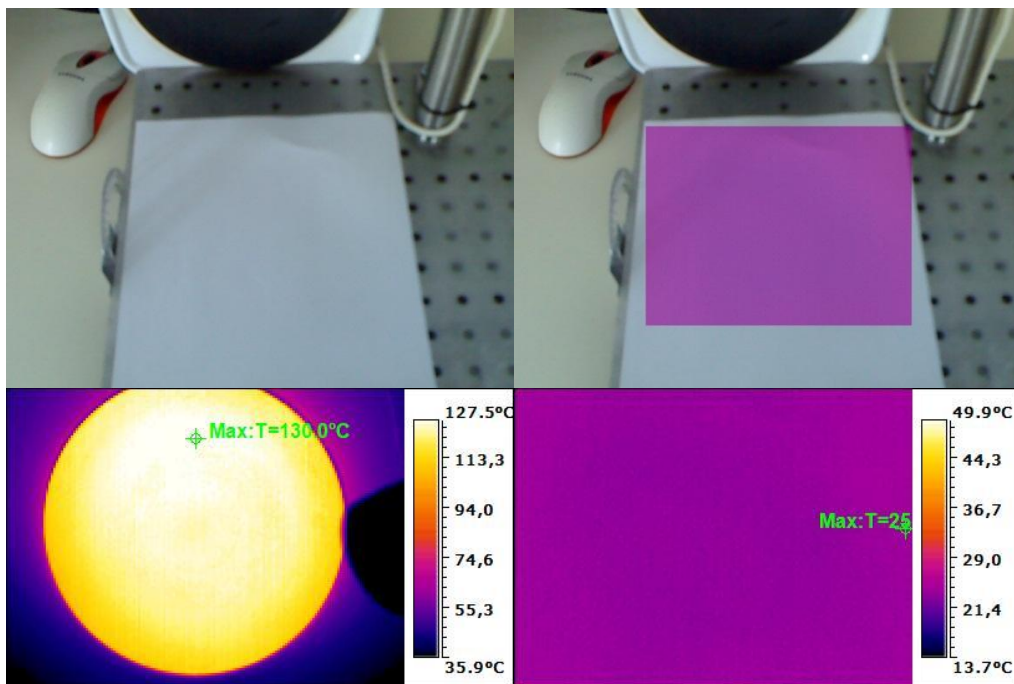


# Kancelářský papír

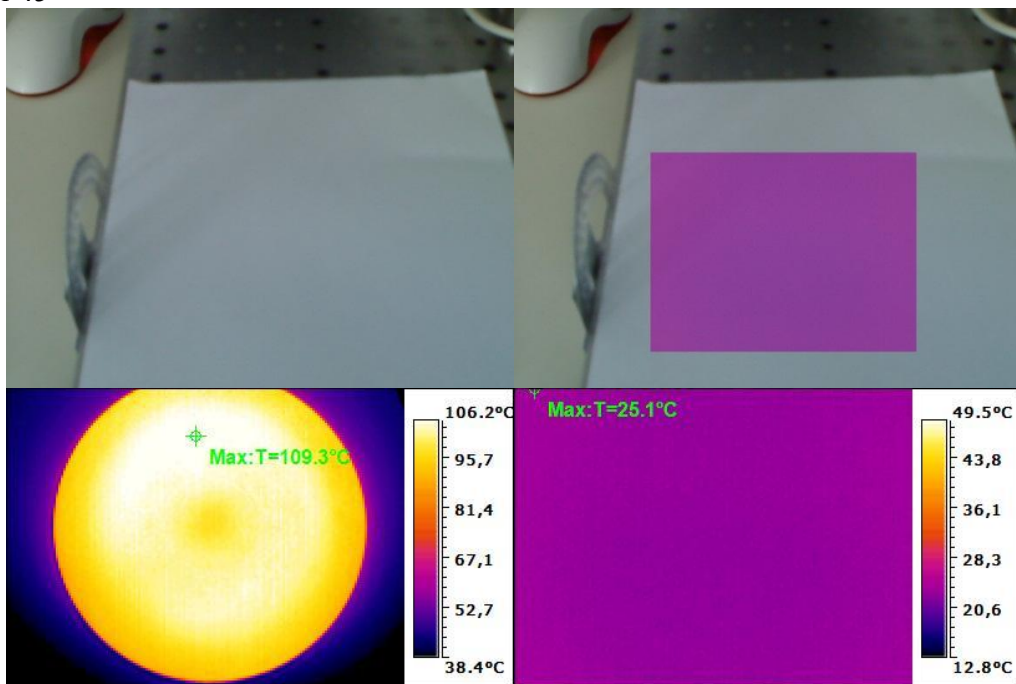
Úhel 75°



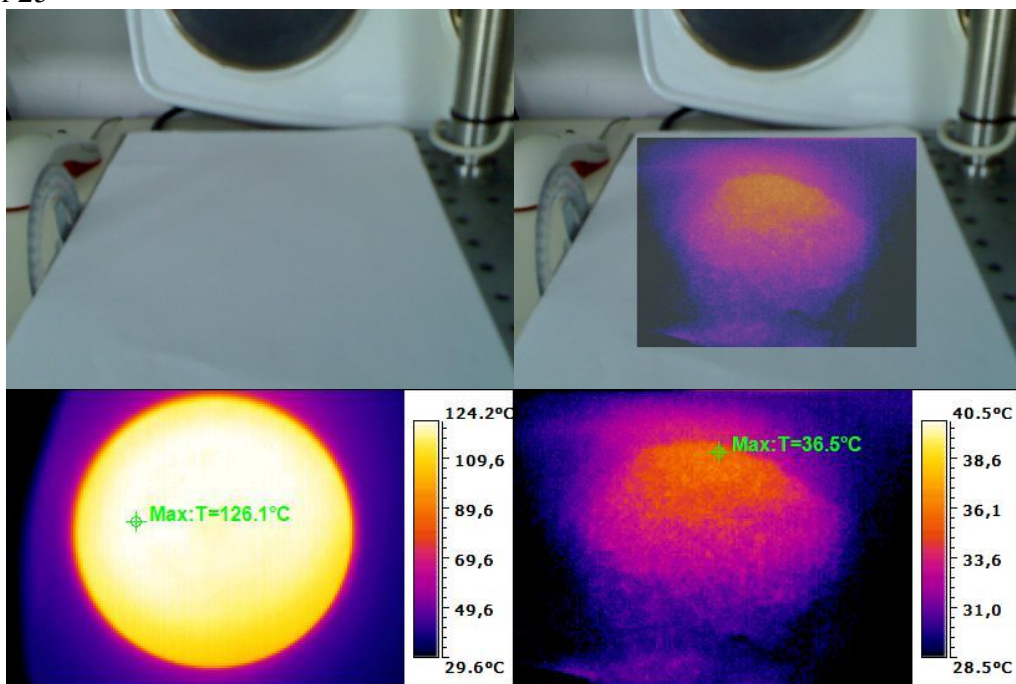
Úhel 60°



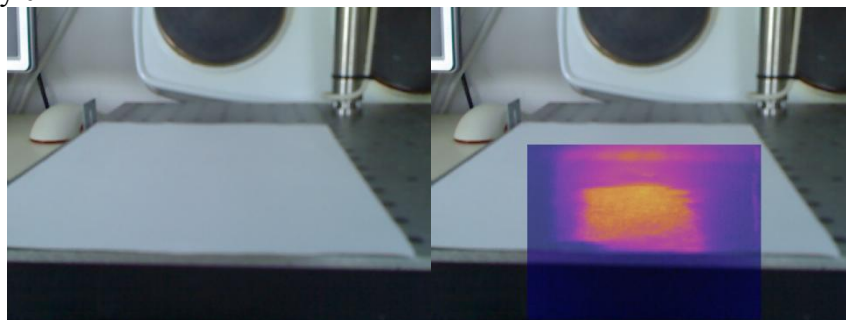
Úhel 45°



Úhel 25°

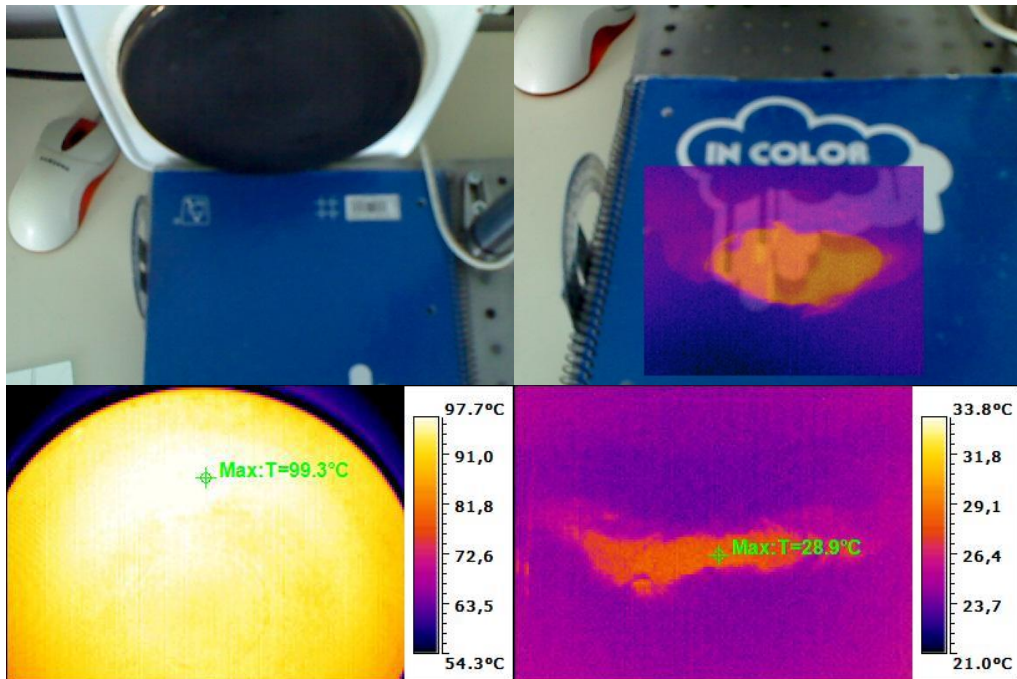


Úhel blížký 0°

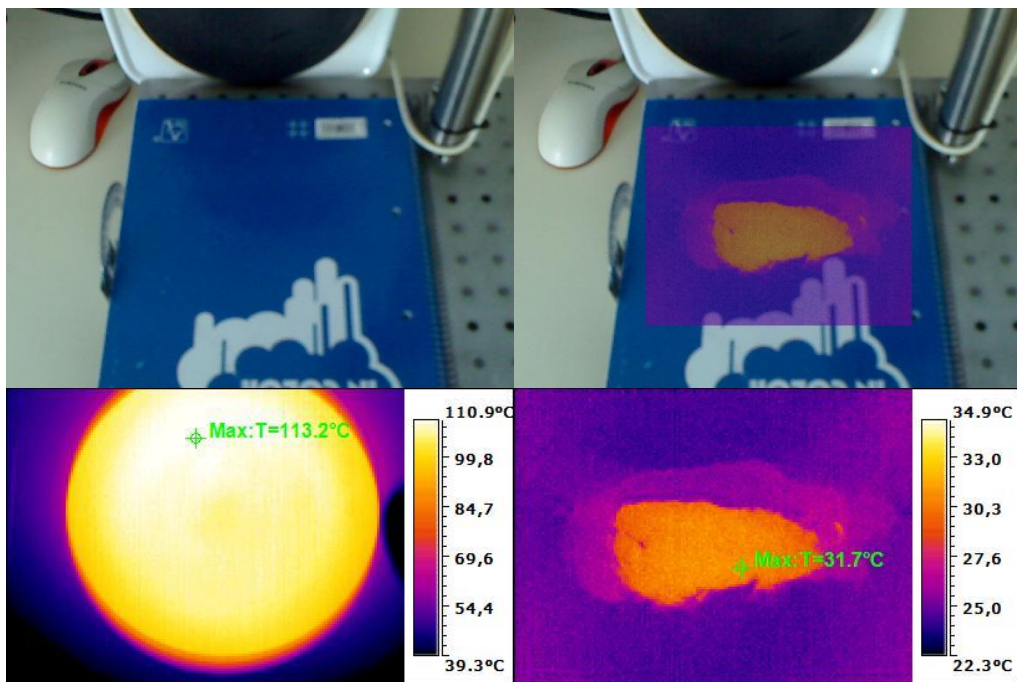


# Lesklý křídový papír

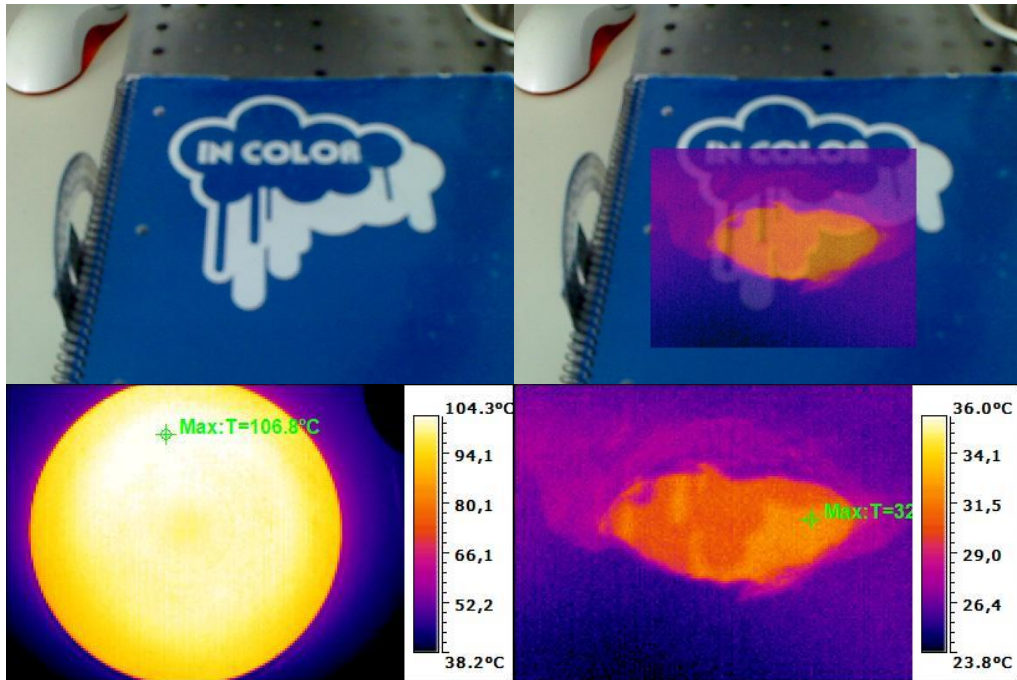
Úhel 75°



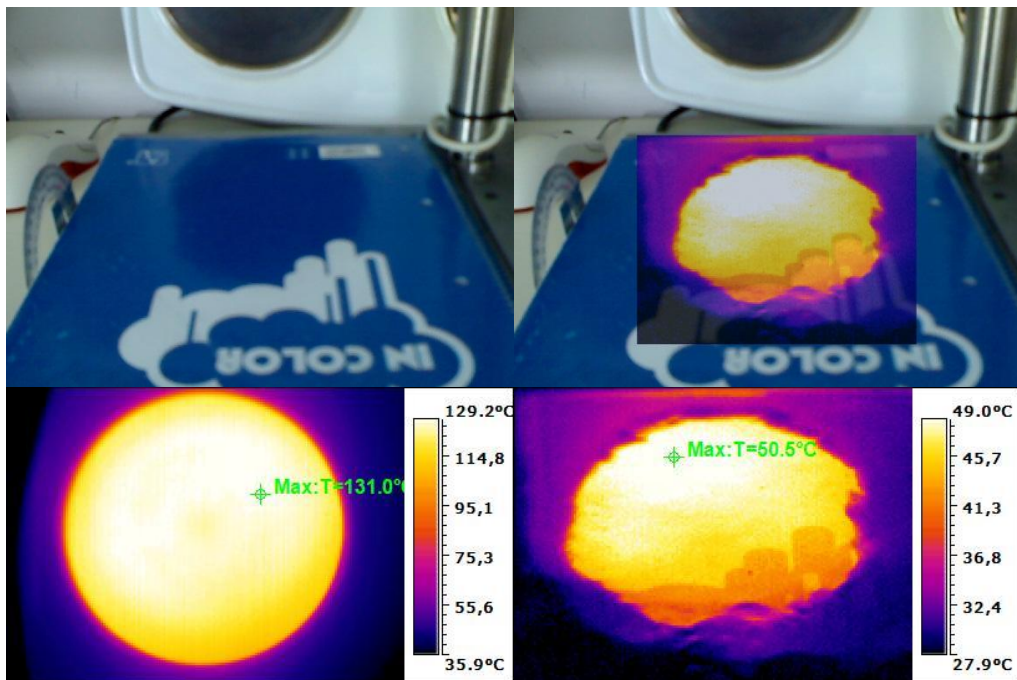
Úhel 60°



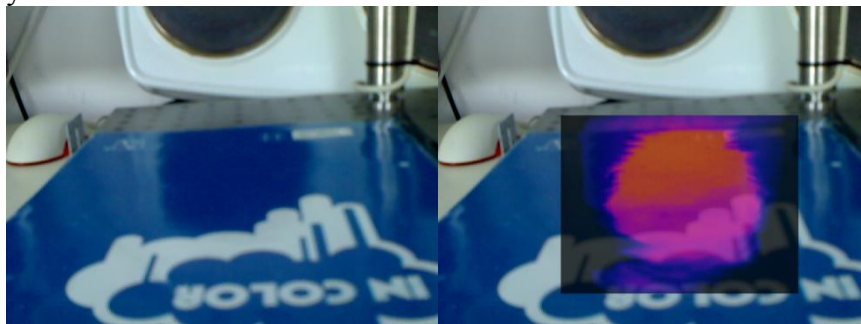
Úhel 45°



Úhel 25°

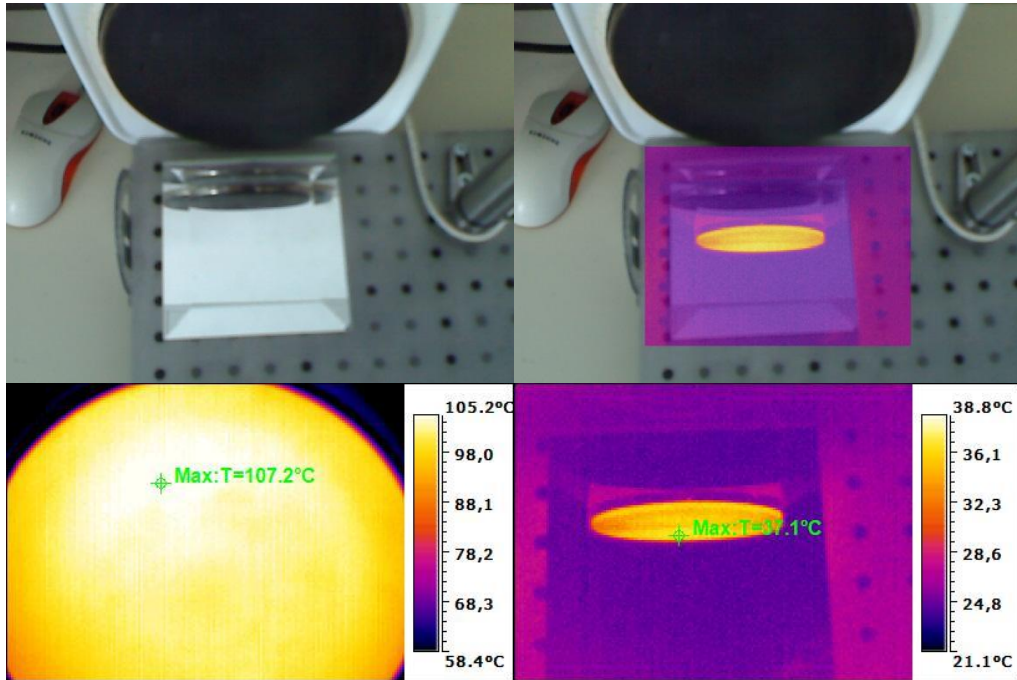


Úhel blízky 0°

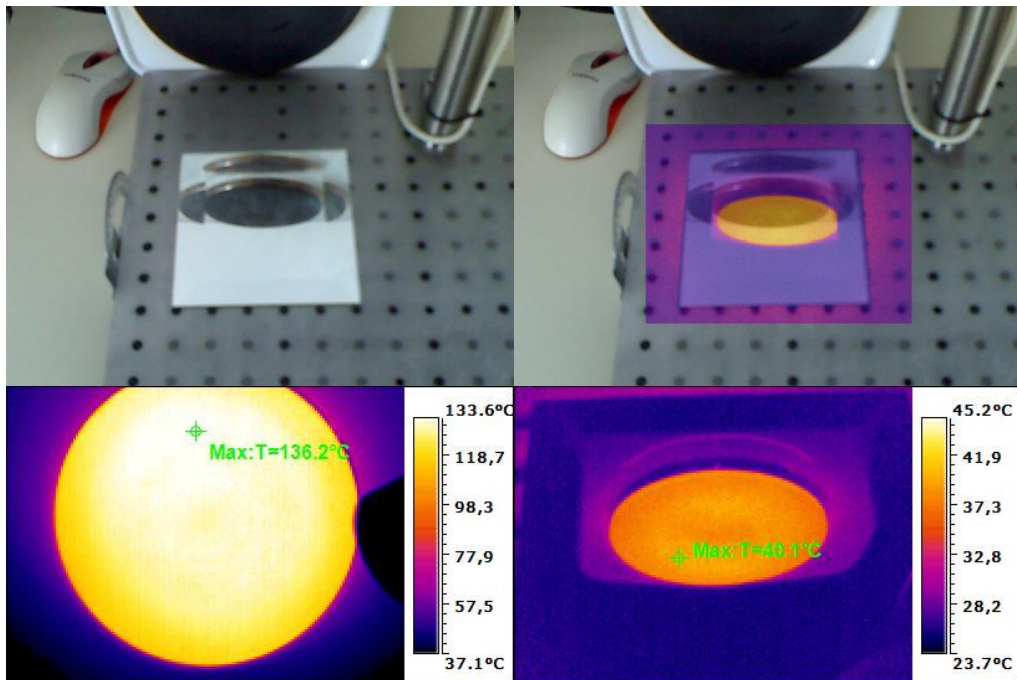


# Sklo

Úhel 75°

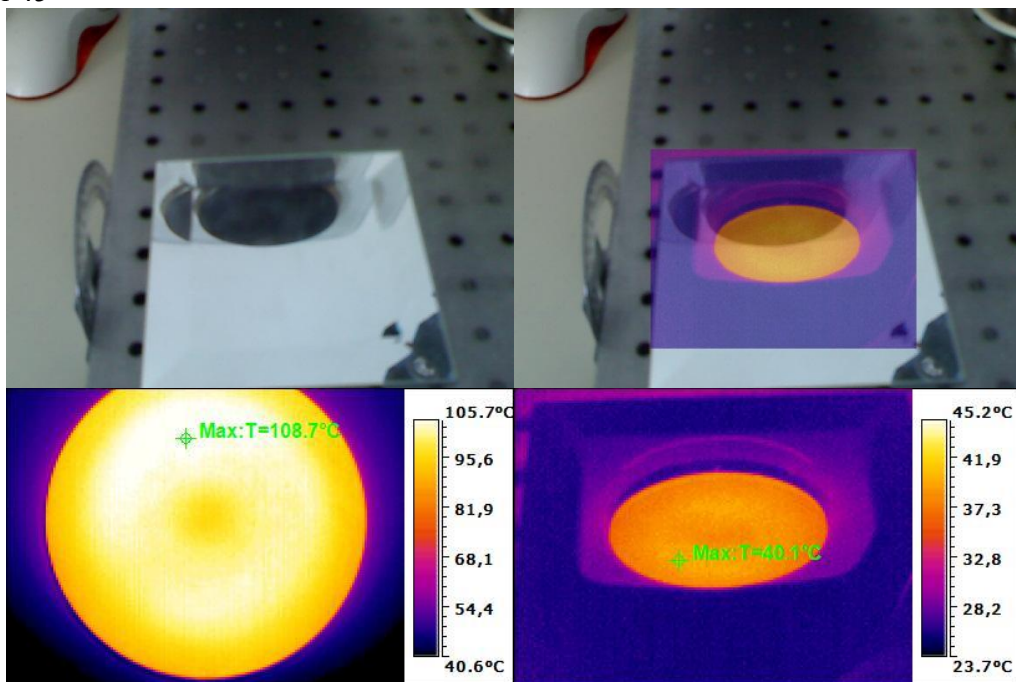


Úhel 60°

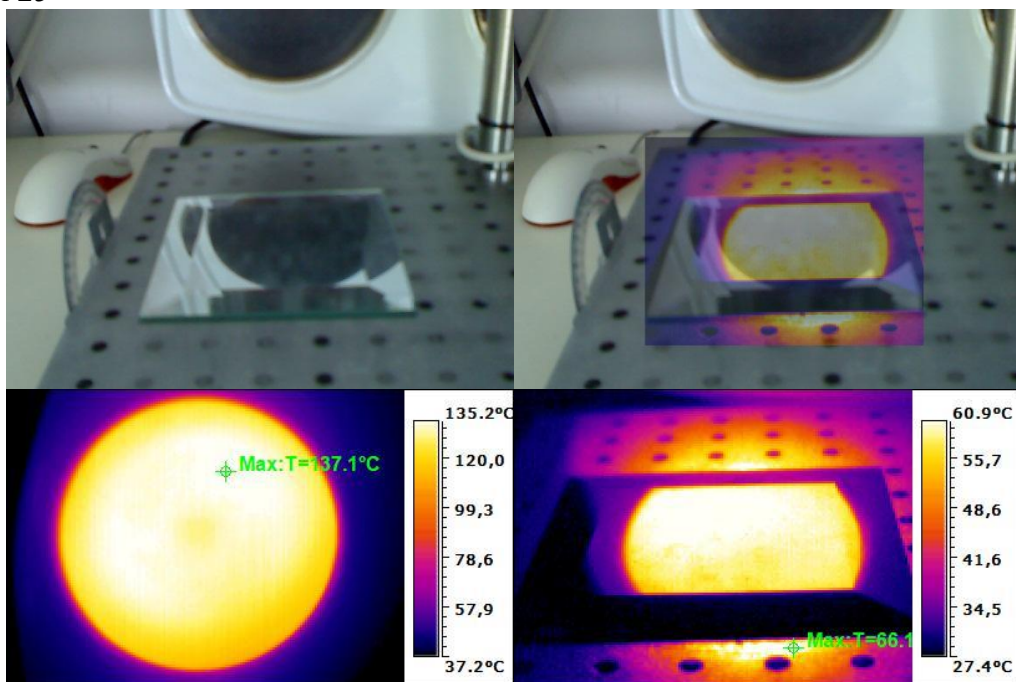




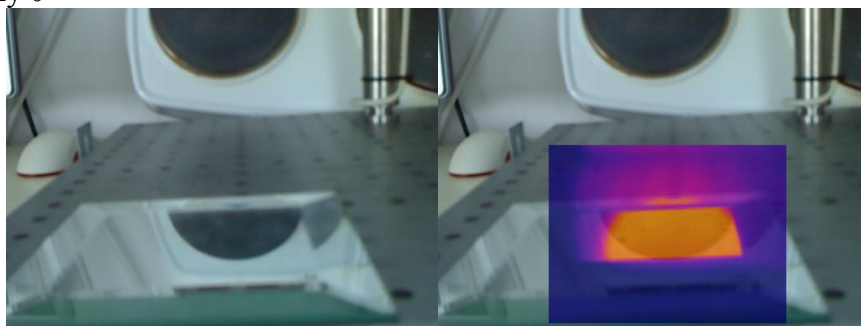
Úhel 45°



Úhel 25°

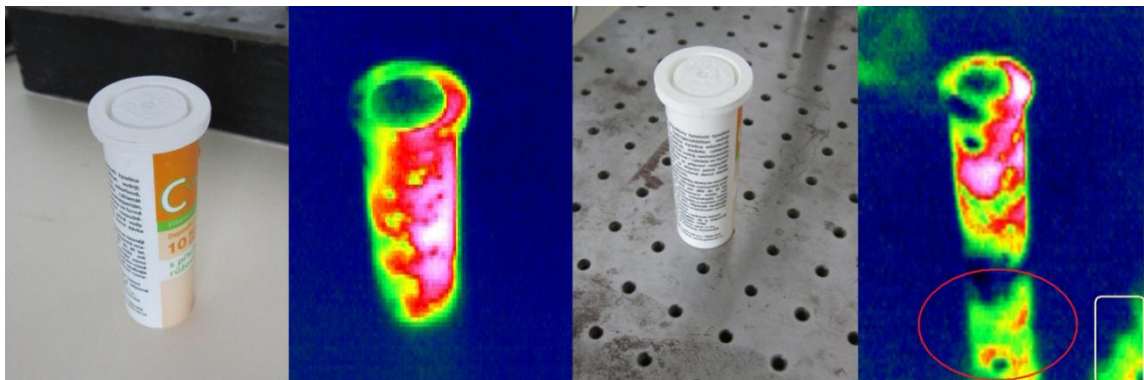


Úhel blížký 0°



## Odraz fotografa

Červeně zakroužkovan je odraz objektu a bíle orámován je odraz fotografa.



Plastová tuba na matném (vlevo) a lesklém (vpravo) povrchu

# Přehled barevných palet

