



# Termovizní měření teplotních polí

přednáška pro FEL ČVUT

Jan Sova, Workswell s.r.o.

<http://www.termogram.cz>

<http://www.workswell.cz>

# Základní seznámení s problematikou

- ▶ Termovizní měření teplotních polí (dále termovize) je jednou z metod nedestruktivní diagnostiky.
- ▶ Zabývá se zobrazováním teplotních polí z povrchů měřených objektů.
- ▶ K tomu se používá tzv. **termovizní kamera**. Princip termovizní kamery je velmi podobný klasické kameře od které se liší především:
  - ▶ typem (případně i principem) detektoru,
  - ▶ optikou (sklo klasických čoček špatně propuští IR záření).
- ▶ Jaký je princip vyzařování předmětů v infračerveném spektru? Jak souvisí teplota objektu s tímto vyzařováním.

# Vyzařování předmětů v infračerveném spektru

- ▶ Velice obecně si můžeme představit, že každý objekt se skládá z tzv. kvantových systémů (tj. atomů a jiných částic v různém stavu a uspořádání).
- ▶ Tyto kvantové systémy na základě různých principů a dějů generují fotony, tj. elementární částice elektromagnetického záření.
- ▶ Max Planck kolem roku 1900 odvodil spektrální hustotu vyzařování absolutně černého tělesa (k tomuto pojmu se vrátíme).
- ▶ **Pozn.** *analýza vyzařování objektů stála u zrodu kvantové fyziky a vedla Maxe Plancka a Alberta Einsteina k položení teoretických základů tohoto oboru.*

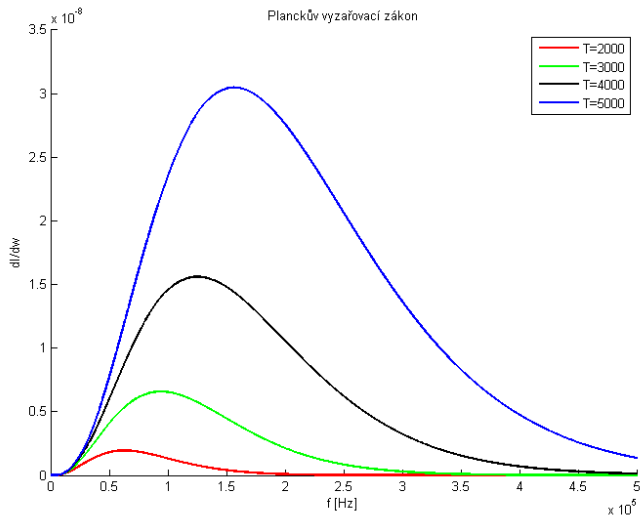
# Planckův vyzařovací zákon

- ▶ **Tepelné vyzařování** je převážně důsledkem děje, při němž atomy látky získávají vlivem tepelného pohybu vyšší energii a tu pak v podobě fotonů vyzařují. V případě tzv. černých a šedých těles je spektrální intenzita tohoto záření závislá na povrchové teplotě tělesa podle **Planckova vyzařovacího zákona**:

$$M_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)}, \quad \text{kde} \quad (1)$$

- ▶  $M_{0\lambda}$  je spektrální hustota intenzity záření černého tělesa,
- ▶  $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ,
- ▶  $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ,
- ▶  $\lambda$  je vlnová délka záření,
- ▶  $T$  je teplota povrchu tělesa.

# Vyzařování absolutně černého tělesa



Obrázek: Vyzařování absolutně černého tělesa pro různé teploty  $T$ .

## Infračervená kamera (termokamera)

- ▶ Vytváří obraz (termogram) na základě povrchem tělesa emitovaného infračerveného záření.
- ▶ Vlastní měření záření emitovaného povrchem objektu se provádí pomocí speciálních fotodetektorů (tzv. bolometrů a polovodičových detektorů) pracujících v oblatech 7,5 až 13  $\mu\text{m}$ .



Obrázek: Termovizní kamera Flir T335

# Parametry kamery Flir T335

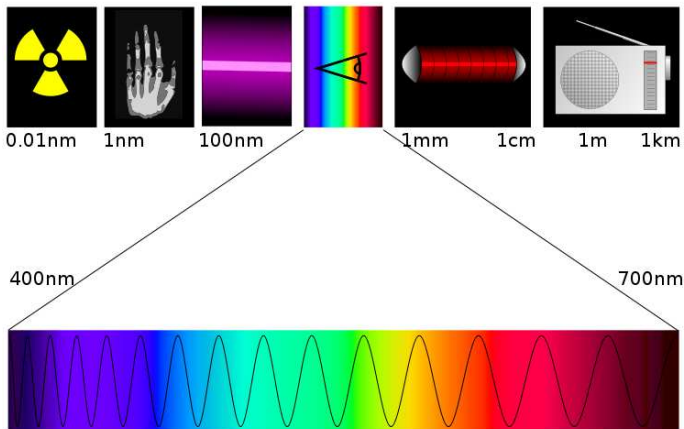
- ▶ **Zorné pole:**  $25^{\circ} \times 19^{\circ}$
- ▶ **Teplotní citlivost:**  $< 0.05^{\circ}\text{C}$
- ▶ **Detektor:**  $320 \times 240$  pixelů (bolometr)
- ▶ **Teplotní rozsah:**  $-20$  až  $+650^{\circ}\text{C}$  (s vysokoteplotním filtrem až  $+1200^{\circ}\text{C}$ )
- ▶ **Spektrální rozsah:**  $7,5$  až  $13\ \mu\text{m}$
- ▶ **Doba výdrže baterie:** 4 hodiny v nepřetržitém provozu
- ▶ **Hmotnost:** 880 g včetně akumulátoru
- ▶ vestavěná digitální videokamera 3,1 Mpix, laserový zaměřovač, světlo pro přisvícení, funkce obraz v obraze, dotykový displej

# Je čas na praktickou ukázkou!

Další výklad bude následovat po této ukázkce



# Spektrum elektromagnetického záření



Obrázek: Spektrum elektromagnetického záření.

► kvantem je foton, viz fotoelektrický jev dále



## Vybrané pojmy a jevy

- ▶ emisivita, spektrální emisivita
- ▶ absolutně černé těleso, šedé těleso, selektivní zářič
- ▶ bolometr, detektor záření
- ▶ termogram, termovizní snímek, protokol o termovizním měření
- ▶ spektrální pohltivost atmosféry a plynů,
- ▶ elektromagnetické záření a jeho spektrum, foton, infračervené záření
- ▶ tepelný odraz, radiační teplota okolí

# Základní fyzikální zákony

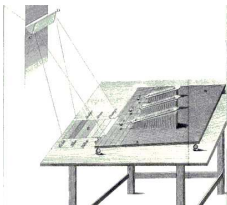
- ▶ **Kirchhoffův zákon termální radiace**
- ▶ **Planckův vyzařovací zákon (Stefan-Boltzmannův zákon, Wienův posunovací zákon)**
- ▶ Radiometrie a radiometrické veličiny
- ▶ Lambertův zákon
- ▶ Maxwellova teorie elektromagnetického pole
- ▶ **Fotoelektrický jev**
- ▶ Zákony popisující chování tepla a ochlazování (Newtonův ochlazovací zákon, Fourierův zákon apod.)

# Vybrané aplikace termovize

- ▶ stavebnictví
- ▶ hledání hot-spotů na fotovoltaických panelech
- ▶ medicína, veterinární medicína
- ▶ diagnostika elektrických strojů a zařízení
- ▶ teplovody, rozvody tepla
- ▶ ekologie
- ▶ a řada dalších

## Počátky měření v IR oblasti

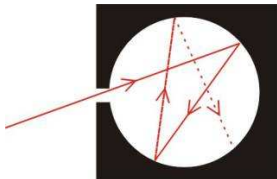
- ▶ Kolem roku 1800 experimentoval Herschel v Anglii se slunečním světlem, kdy pozoroval Slunce přes různě barevná skla a všiml si, že tepelný vjem není vždy stejný.
- ▶ Při pokusu posunul teploměr až za konec červené složky světa teplota vzrostla ještě více než v kterémkoliv z předchozích případů. Tato „neviditelná složka“ světla byla pojmenována infračervená (tj. pod červenou).



Obrázek: Znázornění Herschelova pokusu.

# Kirchhoffův zákon a absolutně černé těleso

- ▶ **První Kirchhoffův zákon:** součet spektrální odrazivosti  $\rho_\lambda$ , spektrální pohltivosti  $\alpha_\lambda$ , spektrální propustnosti  $\tau_\lambda$  je jedna ( $\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1$ ).
- ▶ **Druhý Kirchhoffův zákon:** předmět je tak dokonalým zářičem, jak dovede záření pohlcovat ( $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$ ).
- ▶ Absolutně černé těleso je definováno, jako těleso, které zcela pohlcuje veškeré elektromagnetické záření, které na něj dopadá.



## Další zákony

- ▶ **Stefan-Boltzmannův zákon:** Stefan-Boltzmannův zákon umožňuje určit celkovou intenzitu záření  $I$  absolutně černého tělesa v závislosti na jeho teplotě:  $I = \sigma T^4$ , kde  $T$  je termodynamická teplota absolutně černého tělesa a  $\sigma = 5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ .
- ▶ **Wienův posunovací zákon:** Diferenciací Planckova vyzařovacího vztahu podle proměnné  $\lambda$  a nalezení maxima této funkce získáme vztah:  $\lambda_{max} = \frac{2898}{T}$ , kde  $T$  je termodynamická teplota absolutně černého tělesa a  $\lambda_{max}$  je poloha maxima intenzity záření absolutně černého tělesa při dané teplotě.
- ▶ **Fotoelektrický jev:**  $E = h\nu$ , kde  $h$  je Planckova konstanta a  $\nu$  je frekvence záření. Kvantem záření je foton.

## Emisivita, černé a šedé těleso, selektivní zářič

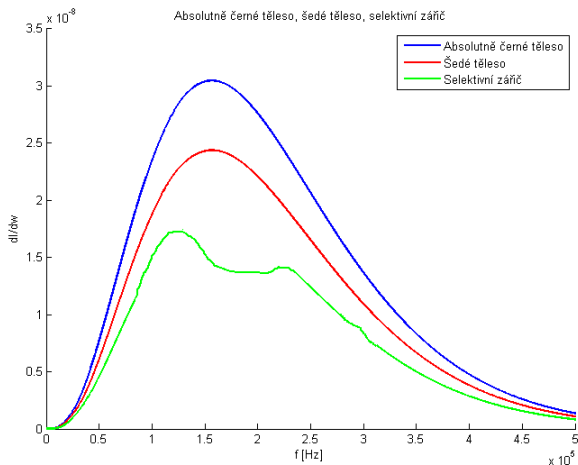
- ▶ Emisivita  $\epsilon_\lambda$  je poměr mezi energií  $W_\lambda$  spektrálního zářiče skutečného (reálného) objektu a energií absolutně černého tělesa  $W_{\lambda 0}$  při stejné vlnové délce a teplotě:

$$\epsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda 0}}. \quad (2)$$

- ▶ **Emisivita** je obecně funkcí vlnové délky. U tzv. **šedých těles** si vystačíme bez uvažování této frekvenční závislosti, u tzv. **selektivních zářičů** je třeba uvažovat emisivitu jako funkci vlnové délky.
- ▶ Mohlo by se zdát (a různé tzv. tabulky emisivit tomuto zdání napomáhají), že emisivita je konstantní. Ve skutečnosti emisivita závisí na všech představitelných parametrech: úhlu odklonu od normály povrchu, teplotě, vlnové délce, barvě povrchu, struktuře povrchu apod.



# Vyzařování černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče

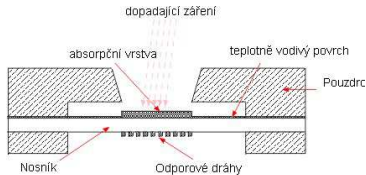


**Obrázek:** Vyzařování absolutně černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče.

## Detektory infračerveného záření

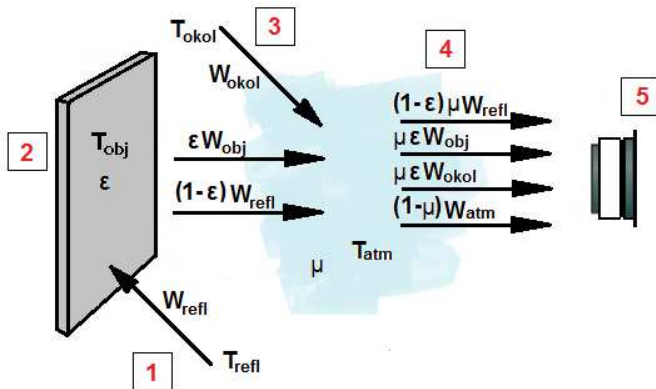
Detektory dle interakce fotonů s materiálem detektoru členíme na tepelné a kvantové. Z tepelných FPA detektorů se používají tzv. mikrobolometry, kdy absorbcí fotonů dochází k oteplení odporové vrstvy, čímž dochází ke změně elektrického odporu, který je následně vyhodnocen.

V případě tzv. kvantových detektorů je princip detekce fotonů v infračervené oblasti založen na fotoelektrickém jevu: tj. přímé přeměně energie fotonů na elektrickou energii. Konstrukce těchto detektorů je však vzhledem k řadě fyzikálních skutečností poměrně náročná.



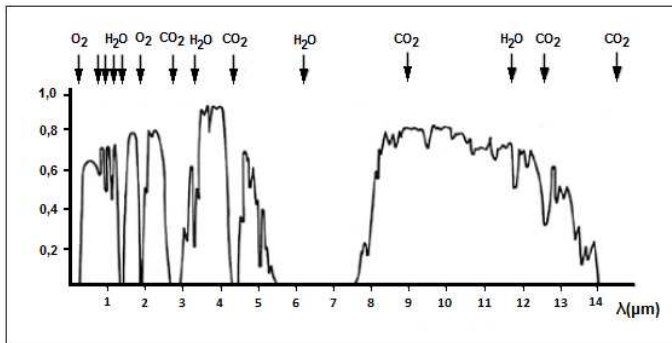
Obrázek: Schematický náčrt bolometru.

# Obecná situace při termovizním měření



Obrázek: Obecná situace při termovizním měření.

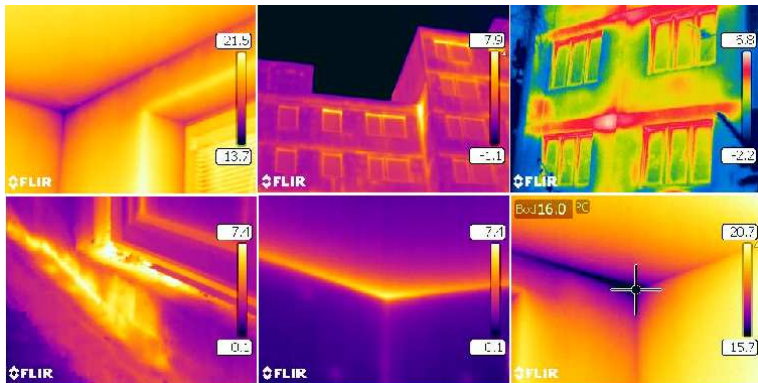
# Spektrální propustnost ovzduší



Obrázek: Spektrální propustnost ovzduší.

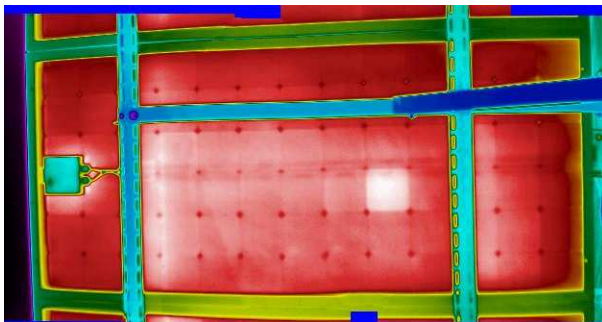
# Termovize ve stavebnictví

- ▶ Detekce a lokalizace tepelných mostů, lokalizace netěsnosti vzduchotěsné obálky budovy.
- ▶ Oteplování a ochlazování konstrukce během různých dějů.
- ▶ Lokalizace rozvodů chlazení a tepla, vyhledávání zkratů v elektrickém vedení.



# Termovize v energetice - fotovoltaické elektrárny

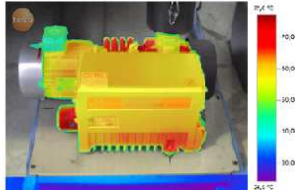
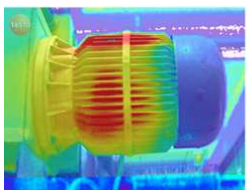
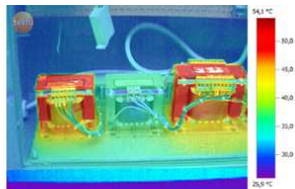
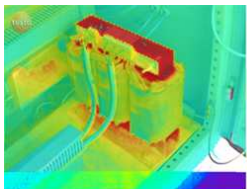
- ▶ Přehřívání na vedení vysokého napětí.
- ▶ Hledání hot-spotů na fotovoltaických panelech.



Obrázek: Termogram solárního panelu s hot-spoty.

# Termovize při diagnostice elektrických strojů a zařízení

- ▶ Velice široké spektrum využití. Měřený objekt musí pracovat při jmenovitém nebo provozním zatížení.
- ▶ Přetěžování, zkrat, přehřívání rozvaděčů a jisticích prvků, mechanické namáhání, přechodové odpory (včetně vysílacích antén), nedostatečné chlazení, stárnutí prvků apod.



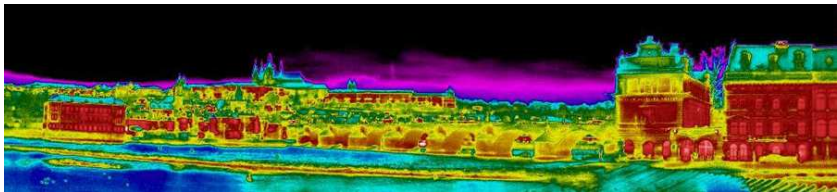
# Termovize v medicíně

- ▶ Tepelná symetrie těla.
- ▶ Hojení ran.
- ▶ Prokrvení tkání, nádorové onemocnění (v současné době především mamografie).
- ▶ Odezva těla na lokální zahřátí.
- ▶ Diagnostika poškození těla z přetížení.
- ▶ Svaly, šlachy, šlachové pochvy, vazy, úpony, kloubní pouzdra, kosti, uzliny, cévy a jiné vnitřní orgány.



# Děkuji vám za pozornost!

Prostor pro diskuzi.



## Pro hloubavé

- ▶ termovize NEMĚŘÍ teplotu
- ▶ termovize NEUKAZUJE tepelné ztráty
- ▶ termovize NEUKAZUJE spotřebu tepla
- ▶ termovize NEUKAZUJE tepelné odpory
- ▶ termovize NEODHALUJE možný výskyt plísní
- ▶ termovize NEUKAZUJE oblasti kondenzace vodní páry
- ▶ termovize NEUKAZUJE tepelné mosty
- ▶ termovize NEPROKAZUJE kvalitu konstrukce
- ▶ termovize NEDIAGNOSTIKUJE rakovinu
- ▶ ...