

## Termografické měření

## Obsah přednášky:

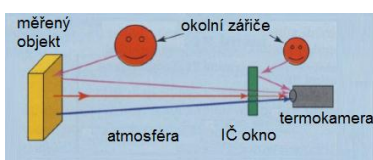
- Měření termokamerou
- Faktory ovlivňující výsledek měření
- Situace při termografickém měření
- Rovnice měření termokamerou
- Výstupní signál termokamery
- Nastavení parametrů měření
- Zásady při práci s termokamerou

1

## Termografické měření

## Měření termokamerou

- Termokamera je moderní měřicí přístroj, který je ve většině případů schopen kvantitativně měřit povrchovou teplotu objektů.
- Pro správné používání této techniky je zapotřebí **znát technické vlastnosti termokamery**, působící **vlivy na výstupní signál**, a způsoby jak získat užitečné **informace z IČ snímku**.
- Faktorů, které mohou ovlivnit výsledek měření a interpretaci termogramů je velmi mnoho.
- Situaci při měření termokamerou zjednodušeně ukazuje schéma:



- odražené záření (růžová)
- záření objektu (červená)
- záření atmosféry (modrá)

[20]

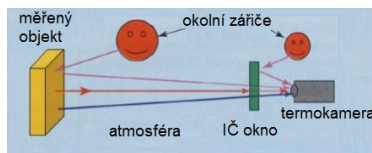
2

## Termografické měření

## Měření termokamerou

## IČ záření objektu

- záření objektu (červená)



- intenzita záření objektu závisí na:
  - ✓ teplotě objektu,
  - ✓ struktuře povrchu, materiálu, emisivitě,
- intenzita může být ovlivněna absorpcí:
  - ✓ v atmosféře,
  - ✓ v IČ oknech, v optice termokamery

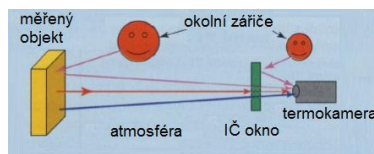
3

## Termografické měření

## Měření termokamerou

## Odražené IČ záření

- odražené záření (růžová)



- záření emitují:
  - ✓ teplé nebo horké objekty v okolí,
  - ✓ optika termokamery,
  - ✓ pouzdro termokamery,
- záření se odráží do termokamery od měřeného objektu, nebo od IČ oken.

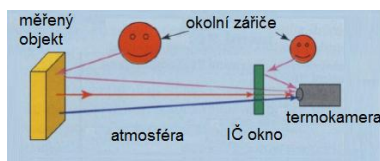
4

## Termografické měření

## Měření termokamerou

## IČ záření atmosféry

- záření atmosféry (modrá)



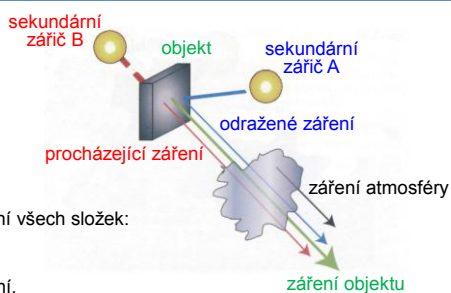
- atmosféra sama o sobě emituje záření díky své teplotě (ovlivnění bude záviset na spektrálním pásmu a na složení)

5

## Termografické měření

## Měření termokamerou

## Vliv atmosféry



- atmosféra **tlumí** záření všech složek:
  - ✓ záření objektu,
  - ✓ odražené záření,
  - ✓ procházející záření,
- sama atmosféra má teplotu vyšší než 0 K a **vyzařuje**,
- vliv atmosféry lze kompenzovat zadáním parametrů:
  - ✓ teplota,
  - ✓ vlhkost,
  - ✓ vzdálenost.

6

## Termografické měření

## Faktory ovlivňující výsledek měření

## Faktory ovlivňující výsledek měření termokamerou - 1

- Emisivita objektu
- Vzdálenost kamery k objektu
- Rozměry objektu
- Teplota okolních předmětů
- Teplota atmosféry
- Relativní vlhkost
- Teplota externí optiky
- Propustnost externí optiky

- Červeně vyznačené parametry mohou být upraveny:
  - ✓ při měření softwarem termokamery
  - ✓ při analýze snímků (po přenosu do počítače)



- Teplotní rozsah
- Barevná paleta

- Nevhodná volba může být příčinou, že důležité detaily nebudou na termogramu patrné

7

## Termografické měření

## Faktory ovlivňující výsledek měření

## Faktory ovlivňující výsledek měření termokamerou - 2

- Závislost emisivity na vlnové délce
- Směrová závislost emisivity (úhel pozorování)
- Teplotní závislost emisivity
- Optické vlastnosti látek mezi objektem a termokamerou (použití filtrů apod.)
- Termální odrazy
- Rychlost větru
- Ozáření sluncem
- Stínové efekty blízkých objektů
- Vlhkost objektu
- Tepelné vlastnosti objektů, například časové konstanty

- Rovněž tyto parametry mohou mít značný vliv na výsledek analýzy a interpretaci termogramů.

[20]

8

## Termografické měření

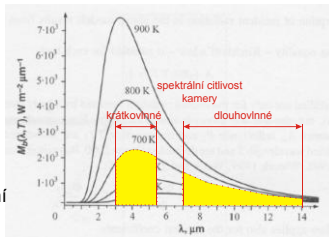
## Situace při termografickém měření

- Širokopásmové IČ detektory vyhodnocují teplotu podle Stefanova-Boltzmannova zákona pro šedé těleso:

$$M = \varepsilon \sigma T^4$$

- Vzhledem k tomu, že detektor kamery snímá záření:
  - ✓ pouze v omezeném rozsahu vlnových délek,
  - ✓ čidlo reaguje na dopadající záření jen s určitou účinností,
- budeme v dalším textu místo intenzity vyzařování  $M$  ( $\text{W m}^{-2}$ ), případně místo zářivého toku  $\phi$  (W), používat veličinu úměrnou intenzitě vyzařování, kterou označíme jako **hustotou zářivého toku**:  $q$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) (zářivý tok vztažený na jednotku plochy)

- Hustota intenzity vyzařování při 700 K pro spektrální citlivost kamery



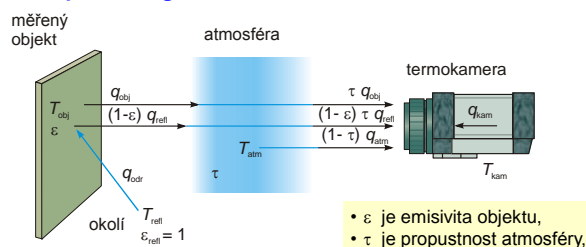
$$q \approx \varepsilon \sigma T^4$$

9

## Termografické měření

## Situace při termografickém měření

## Situace při termografickém měření



- $\varepsilon$  je emisivita objektu,
- $\tau$  je propustnost atmosféry,

- $q_{obj}$  je zářivý tok objektu;  $q_{obj} \approx \varepsilon \sigma T_{obj}^4$ ,
- $q_{refl}$  je zářivý tok okolí, které se odráží od objektu;  $q_{odr} \approx \sigma T_{refl}^4$ ,
- $q_{atm}$  je zářivý tok atmosféry;  $q_{atm} \approx (1-\tau) \sigma T_{atm}^4$ ,
- $q_{kam}$  je zářivý tok detektoru kamery;  $q_{kam} \approx \sigma T_{kam}^4$ ,

10

## Termografické měření

## Situace při termografickém měření

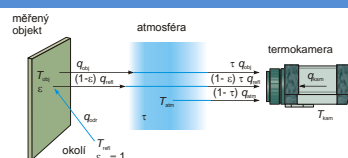
- Při vlastním termografickém měření dochází:
  - ✓ k vzájemnému přenosu a ovlivňování zářivých toků mezi kamerou a měřeným objektem,
  - ✓ mezi okolním prostředím,
  - ✓ je-li transmitance měřeného objektu  $\tau_{obj} \neq 0$ , musíme navíc uvažovat i vliv záření pozadí (za měřeným objektem),
  - ✓ v případě pohlcování záření v atmosféře a vyzařování atmosféry musíme zahrnout i vliv vzdálenosti mezi objektem a termokamerou.
- Termokamera tedy snímá:**
  - ✓ záření objektu, případně záření pozadí za objektem,
  - ✓ odražené záření z okolí na povrch objektu,
  - ✓ vyzařování atmosféry. Průchodem atmosférou je záření zeslabováno.
- V praxi se nejčastěji setkáváme se situací, kdy
  - ✓ propustnost objektu  $\tau_{obj} = 0$  (odpadá záření pozadí),
  - ✓ vyzařování atmosféry  $q_{atm} = 0$

11

## Termografické měření

## Rovnice měření termokamerou

- emisivita objektu  $\varepsilon$
- propustnost atmosféry  $\tau$
- propustnost objektu = 0
- odrazivost atmosféry = 0
- emisivita okolí a kamery = 1



## Záření přijaté detektorem termokamery:

- záření objektu zeslabené průchodem atmosférou:  $\approx \varepsilon \tau \sigma T_{obj}^4$
- záření odražené objektem z okolí:  $\approx (1-\varepsilon) \sigma T_{refl}^4$   
kde  $(1-\varepsilon)$  vyjadřuje odrazivost objektu, předpokládá se, že okolní zdroje mají stejnou teplotu  $T_{refl}$
- vyzařování atmosféry:  $\approx (1-\tau) \sigma T_{atm}^4$   
kde  $(1-\tau)$  vyjadřuje emisivitu atmosféry,
- vyzařování detektoru kamery:  $\approx \sigma T_{kam}^4$

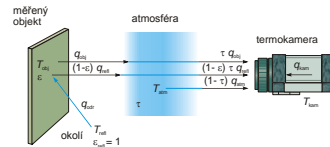
$T_{refl}$  je **zdánlivá odražená teplota** (zdánlivá teplota jiných objektů, jejichž záření se odráží od povrchu měřeného objektu do termokamery)

12

## Termografické měření

## Rovnice měření termokamerou

## Odvození rovnice měření



- Hustoty tepelných toků všech objektů před kamerou lze vyjádřit:

$$q_c = \varepsilon \tau \sigma T_{obj}^4 + (1-\varepsilon) \tau \sigma T_{refl}^4 + (1-\tau) \sigma T_{atm}^4 \quad (1)$$

- Pro vzájemnou hustotu tepelného toku zářením mezi objekty před kamerou a kamerou platí:

$$q_{ck} = \varepsilon \tau \sigma T_{obj}^4 + (1-\varepsilon) \tau \sigma T_{refl}^4 + (1-\tau) \sigma T_{atm}^4 - \sigma T_{kam}^4 \quad (2)$$

- po úpravě dostaneme vztah:

$$q_{ck} = \sigma (\varepsilon \tau T_{obj}^4 + (1-\varepsilon) \tau T_{refl}^4 + (1-\tau) T_{atm}^4 - T_{kam}^4) \quad (3)$$

13

## Termografické měření

## Rovnice měření termokamerou

## Vyjádření teploty z rovnice měření

- z vztahu (3) lze vyjádřit teplotu povrchu měřeného objektu:

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{q_{ck} + T_{kam}^4 - (1-\varepsilon) \tau T_{refl}^4 - (1-\tau) T_{atm}^4}{\varepsilon \tau}} \quad (4)$$

- Jestliže výstupní napětí detektoru bude úměrné tepelnému toku  $q_{ck}$

$$U_{det} = k q_{ck} \quad (5)$$

- pak pro teplotu povrchu objektu dostáváme vztah:

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{K_1 U_{det} + K_2 - (1-\varepsilon) \tau T_{refl}^4 - (1-\tau) T_{atm}^4}{\varepsilon \tau}} \quad (6)$$

- $K_1$  a  $K_2$  jsou kalibrační konstanty detektoru kamery  $K_1 = \frac{k}{\sigma}$   $K_2 = T_{kam}^4$

- Pro nelineární závislost  $U_{det} = f(q_{ck})$  bude konstant více.

14

## Termografické měření

## Výstupní signál termokamery

## Výstupní signál termokamery

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{K_1 U_{det} + K_2 - (1-\varepsilon) \tau T_{refl}^4 - (1-\tau) T_{atm}^4}{\varepsilon \tau}}$$

- podle vztahu (6) vypočítává mikroprocesor termokamery teplotu pro jednotlivé detekční elementy (pixely) maticového detektoru,
- pro úplný výpočet je však zapotřebí zadat parametry měření:
  - ✓ emisivitu objektu  $\varepsilon$ ,
  - ✓ zdánlivou odraženou teplotu  $T_{refl}$ ,
  - ✓ teplotu atmosféry  $T_{atm}$ ,
  - ✓ propustnost atmosféry  $\tau$  (místo  $\tau$  se obvykle zadává relativní vlhkost a vzdálenost kamery od objektu).

- Tyto parametry jsou u kamery přednastaveny na určité hodnoty.

- Pro správné vyhodnocení měřené teploty je však nutno parametry korigovat podle skutečné situace,
- proto každá měřicí (radiometrická) termokamera musí být vybavena možností **korekce těchto parametrů**.

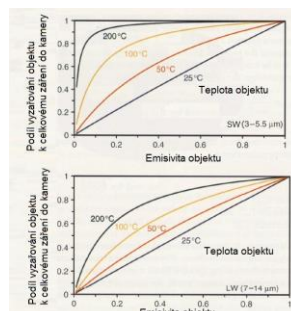
15

## Termografické měření

## Nastavení parametrů měření

## Nastavení emisivity

- Ze vztahu (6) je zřejmé, že při určitém konkrétním signálu kamery, daném napětím na detektoru a kalibračními konstantami, je hodnota údaje o teplotě povrchu objektu závislá významně na jeho emisivitě.
- Jakákoliv změna emisivity měřeného objektu nebo pozadí vyžaduje korekci naměřené radiální energie pro všechny pixely detektoru kamery.
- Nezbytnost přesné korekce se zvyšuje s klesající emisivitou objektu, (stoupá se zvýšením odrazivosti).



- Rozdílné chování krátkovlnných a dlouhovlnných kamer:
  - ✓ podíl vyzařování objektu roste s teplotou,
  - ✓ podíl vyzařování objektu je významnější u krátkovlnných kamer.

16

Termografické měření

**Nastavení parametrů měření**

**Nastavení emisivity**

- Zvláště při velkých teplotních rozdílech mezi měřeným objektem a měřeným okolím je správné nastavení stupně emisivity rozhodující.
- U teploty **měřeného objektu vyšší než je teplota okolí** (viz topení na obr.):
  - ✓ nastavení vysoké emisivity u kamery 2 způsobí zobrazení nižší teploty,
  - ✓ nastavení nízké emisivity na kameře 1 způsobí zobrazení vyšší teploty.
- U teploty měřeného objektu **nižší než je teplota okolí** (viz dveře na obr.):
  - ✓ nastavení vysoké emisivity na kameře 2 způsobí zobrazení vyšší teploty,
  - ✓ nastavení nízké emisivity na kameře 1 způsobí zobrazení nižší teploty.

[21]


17

Termografické měření

**Nastavení parametrů měření**

**Vliv spektrální citlivosti kamery na termovizní měření**

- **Volba spektrálního rozsahu** termokamery podle požadovaného rozsahu měřených teplot
  - ✓ pro **vyšší teploty** jsou vhodné **kratší vlnové délky**,
  - ✓ pro **nižší teploty** jsou vhodnější **delší vlnové délky**.
- **Vlastnosti prostředí mezi termokamerou a měřeným objektem**
  - ✓ Nemělo by docházet k významné absorpci záření.
  - ✓ Pro termografické měření v prostoru se vzduchem jsou vhodné spektrální rozsahy vyznačené na obrázku.



[18]

18

Termografické měření

**Nastavení parametrů měření**

**Měření odražené teploty okolního prostředí**

- Přesná termografická měření vyžadují přesnou znalost odražené (radiační) teploty  $T_{refl}$ .
- Pokud lze **odstranit všechny možné zdroje rušivého záření**, které by mohly ovlivnit termografické měření, pak je teplota odraženého IČ záření rovna okolní teplotě.
- Pro **homogenní okolní prostředí** s rušivým IČ zářením okolních objektů, je postačující znát **střední teplotu  $T_{refl}$** , kterou lze zjistit měřením.
- V **nehomogenním prostředí** je vhodné znát odraženou teplotu z poloprostoru před měřeným objektem.

19

Termografické měření

**Nastavení parametrů měření**

**Měření odražené teploty pomocí improvizovaného Lambertova zářiče**

**Lambertův zářič**

- objekt, který ideálně difúzně odráží dopadající záření (odráží se stejnou intenzitou do všech směrů),
- na Lambertově zářiči lze termokamerou měřit teplotu odraženého záření.
- Vytvoření **improvizovaného Lambertova zářiče**:
  - ✓ hliníková folie se zmačká a opět narovná,
  - ✓ díky vysoké odrazivosti hliníkové folie a díky zmačkané struktuře se záření odráží téměř ideálně difúzně.
- Při měření odražené teploty se umístí Lambertův zářič do blízkosti měřeného objektu (nejlépe na plochu měřeného objektu).
- Termokamerou se změří teplota při nastavené emisivitě 1,00.
- Termokamera z přijatého IČ záření vypočítá teplotu, která odpovídá  $T_{refl}$ .



20

## Termografické měření

## Nastavení parametrů měření

**Podrobnější mapování odražené teploty z poloprostoru**

- Pro detailnější zmapování poloprostoru před měřeným objektem je vhodné měřit radiační teploty
  - ✓ radiačním teploměrem
  - ✓ termokamerou (při nastavení přístrojů na  $\varepsilon = 1$ ).
- Při měření radiačními teploměry můžeme postupně měřit lokální radiační teploty všech důležitých povrchů.
- Při měření odražených teplot pomocí termokamery snímáme rovněž postupně poloprostor před objektem, přičemž z termogramů lze vyhodnotit :
  - ✓ lokální odražené teploty,
  - ✓ průměrné odražené teploty z jisté části prostoru (např. stanovením průměrné teploty z celého termogramu).
- Odražené teploty získané radiačními teploměry nebo termokamerou lze při zkoumání objektů typu Lambertových zdrojů zprůměrovat.

21

## Termografické měření

## Zásady při práci s termokamerou

**Zásady při práci s termokamerou**

- Kameru s objektivy je třeba vždy chránit:
  - ✓ před agresivním prostředím (včetně dotyků prstů),
  - ✓ extrémními teplotami,
  - ✓ znečištěním, před prachem,
  - ✓ nárazy, nepřízní počasí apod.
- Při vlastních termografických měřeních je třeba dodržovat jisté zásady, abychom minimalizovali chyby a nejistoty měření:
  - ✓ nastavit vhodný rozsah teplot, přičemž je nutné měřit dostatečné změny teplot  $\Delta T$ ,
  - ✓ je třeba dbát na to, aby objekt byl v zorném poli kamery co největší, (lze upravit umístěním kamery do vhodné vzdálenosti, použitím vhodného objektivu či předsádky),
  - ✓ je nutno zadat:
    - emisivitu objektu,
    - odraženou teplotu,
    - případně další parametry.

22