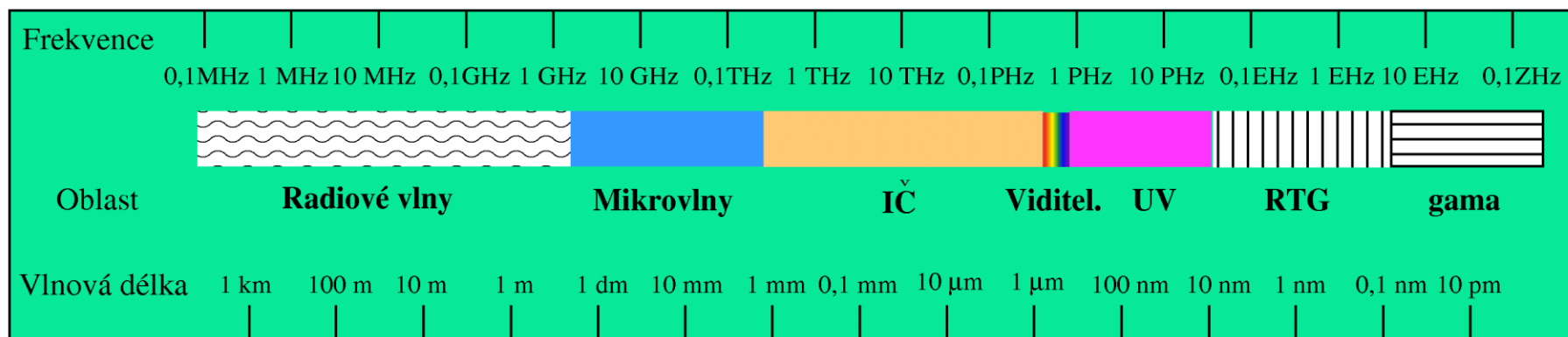


Bezkontaktní termografie

Biofyzikální ústav LF MU

Projekt FRVŠ 911/2013

Elektromagnetické spektrum



<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:ElmgSpektrum.png>

Zdroje infračerveného záření

- **Infračervené záření je elektromagnetické vlnění (tok fotonů), které se vyzařuje každý objekt, který má teplotu vyšší než absolutní nula (0 K).**
 - vlnová délka v rozmezí 10^{-6} až 10^{-3} m
 - energie 1 až 10^{-3} eV
- **Velikost zářivého toku generovaného tepelným zdrojem, spektrální složení a směr šíření závisejí na vlastnostech a teplotě zdroje.**

Energie fotonu

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,986 \cdot 10^{-19}}{\lambda}$$

E ... energie fotonu [J]

h ... Planckova konstanta [J.s]

v ... frekvence [s^{-1}]

c ... rychlost světla [$m.s^{-1}$]

λ ... vlnová délka [m]

Základní zákony vyzařování

**Planckův vyzařovací
zákon**

**Stefan-Boltzmannův
zákon**

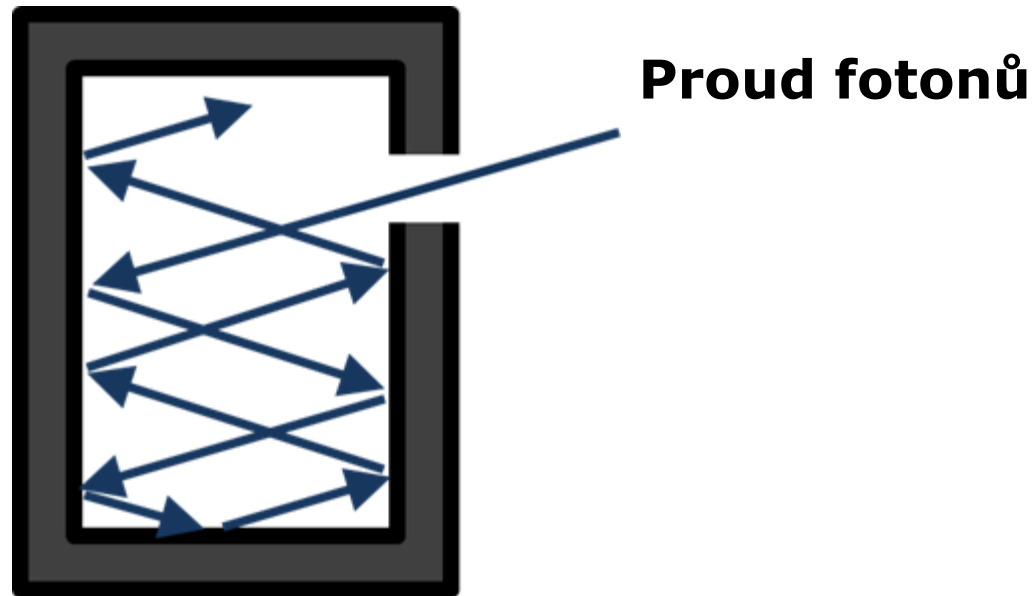
**Wienův posunovací
zákon**

Absolutně černé těleso

Absolutně černé těleso

- **Ideální těleso, které pohlcuje veškerou radiaci na něj dopadající, bez ohledu na vlnovou délku a úhel, pod kterým na těleso dopadá.**
- **Pokud je AČT zdrojem radiace je ideální absorber i emiter radiace.**
- **Vyzařuje na všech vlnových délkách při dané teplotě maximální dosažitelnou energii zářivého toku.**

Absolutně černé těleso



http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Black-body_realization.png

Planckův vyzařovací zákon

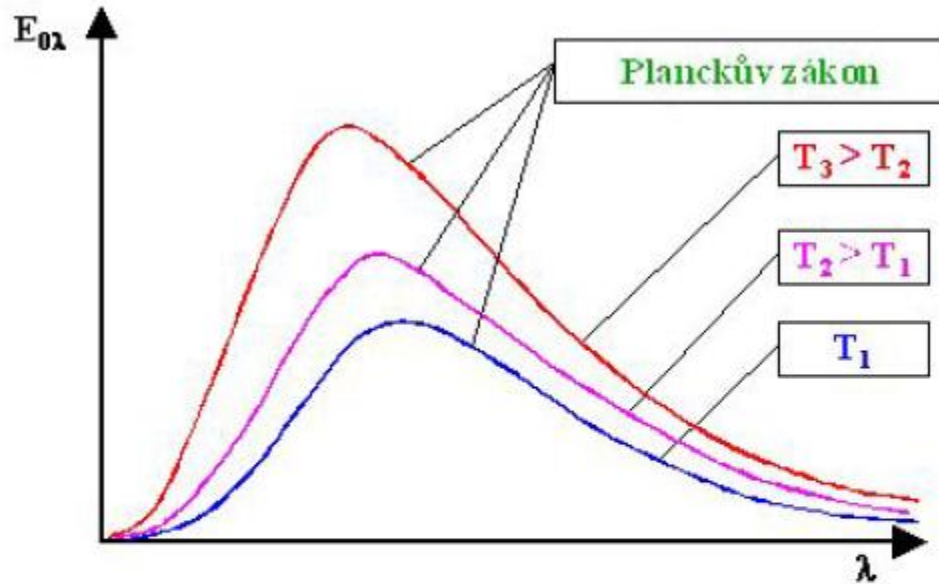
- **Základní zákon tepelného vyzařování AČT.**
- **Záření je vyzařováno po kvantech.**

$$L_{e,\lambda}(T) = \frac{\frac{C_1}{\lambda^5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad [W \cdot sr^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot m^1]$$

$$C_1 = 2hc^2 \quad C_2 = \frac{ch}{k_B}$$

h	Planckova konstanta	(6,6256·10 ⁻³⁴ J·s)
k _B	Boltzmannova konstanta	(1,3807·10 ⁻²³ J·K ⁻¹)
c	rychlost světla	(2,9979·10 ⁸ m·s ⁻¹)
C ₁	1. vyzařovací konstanta	(1,191·10 ⁻¹⁶ W·m ²)
C ₂	2. vyzařovací konstanta	(1,4388·10 ⁻² K·m)

Planckův vyzařovací zákon



Obrázek 8.1: Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa v závislosti na vlnové délce záření a teplotě zářiče. Převzato se svolením autora [66]: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/0202.htm>.

Stefan-Boltzmannův zákon

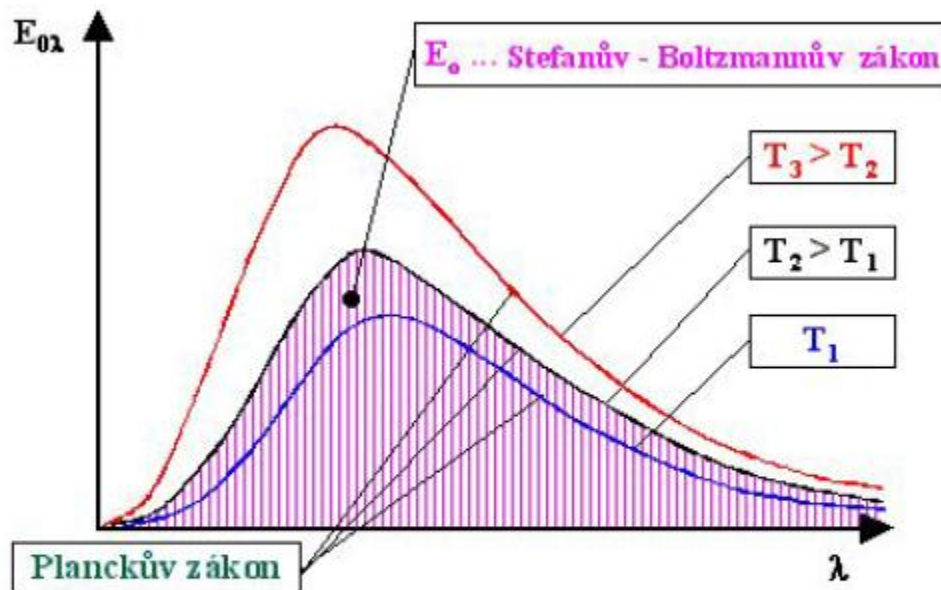
- **Vyjadřuje intenzitu vyzařování AČT.**
- **Výsledná intenzita vyzařování černého tělesa je úměrná čtvrté mocnině jeho absolutní teploty (T):**

$$M_e(T) = \sigma_e T^4 \quad [W \cdot cm^{-2}]$$

- **Lze vyjádřit integrací Planckova vyzařovacího zákona:**

$$M_e(T) = \int_0^{\infty} M_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma_e T^4 \quad [W \cdot cm^{-2}]$$

Stefan-Boltzmannův zákon



Obrázek 8.3: Zobrazení Stefanova – Boltzmannova zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření. Převzato se svolením autora [66]: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/0204.htm>.

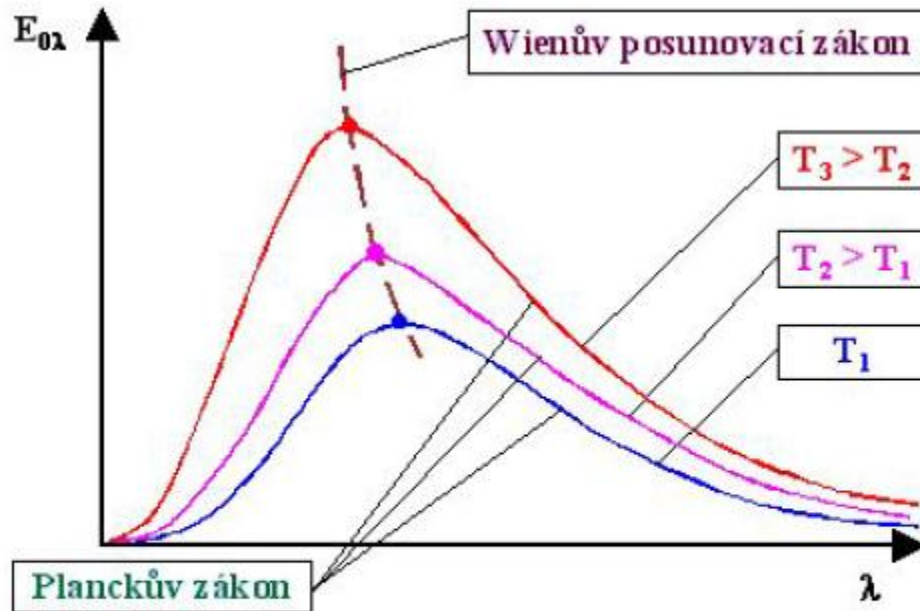
Wienův posunovací zákon

- **Maximum spektrální intenzity vyzařování se mění v závislosti na teplotě, odpovídající vlnovou délku lze stanovit vyhledáním lokálního extrému odpovídajících funkcí:**

$$\frac{\partial M_{e,\lambda}(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0 \quad \rightarrow \quad \lambda_{max} T = 2898 \quad [\mu m \cdot K]$$

- **Z toho vyplývá, že čím je těleso teplejší, tím vyzařuje na kratších vlnových délkách a tedy na vyšších frekvencích.**

Wienův posunovací zákon



Obrázek 8.2: Zobrazení Wienova posunovacího zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření. Převzato se svolením autora [66]: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/0203.htm>.

Kirchhoffovy zákony

- **1. KZ říká, že součet reflektance (r), absorptance (a) a transmittance (t) objektu je vždy roven jedné:**

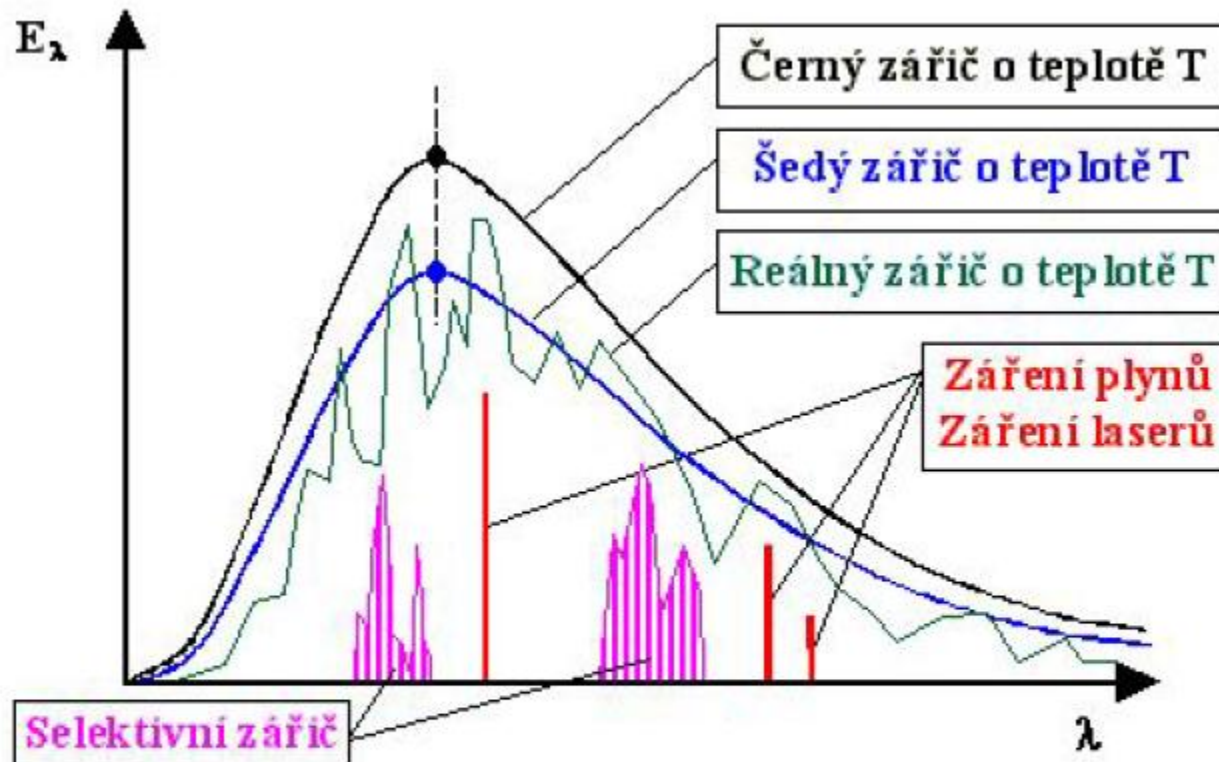
$$r + a + t = 1$$

- **2. KZ říká, že objekt je tak dokonalým zářičem, jak dovede záření pohlcovat:**

$$\epsilon = a$$

- **Emisivita ε vyjadřuje schopnost zářiče vyzařovat.**
- **Koeficient emisivity nabývá hodnot 0 až 1.**
- **Dokonalé zářiče (dokonale černá tělesa) mají $\varepsilon=1$, nedokonalé zářiče (šedá tělesa) mají $0<\varepsilon<1$ a absolutně nedokonalé zářiče (bílá tělesa) mají $\varepsilon=0$.**
- **Koeficient emisivity je závislý na:**
 - typu materiálu zdroje
 - vlastnostech povrchu zdroje
 - vlnové délce
 - teplotě materiálu
 - směru vyzařování

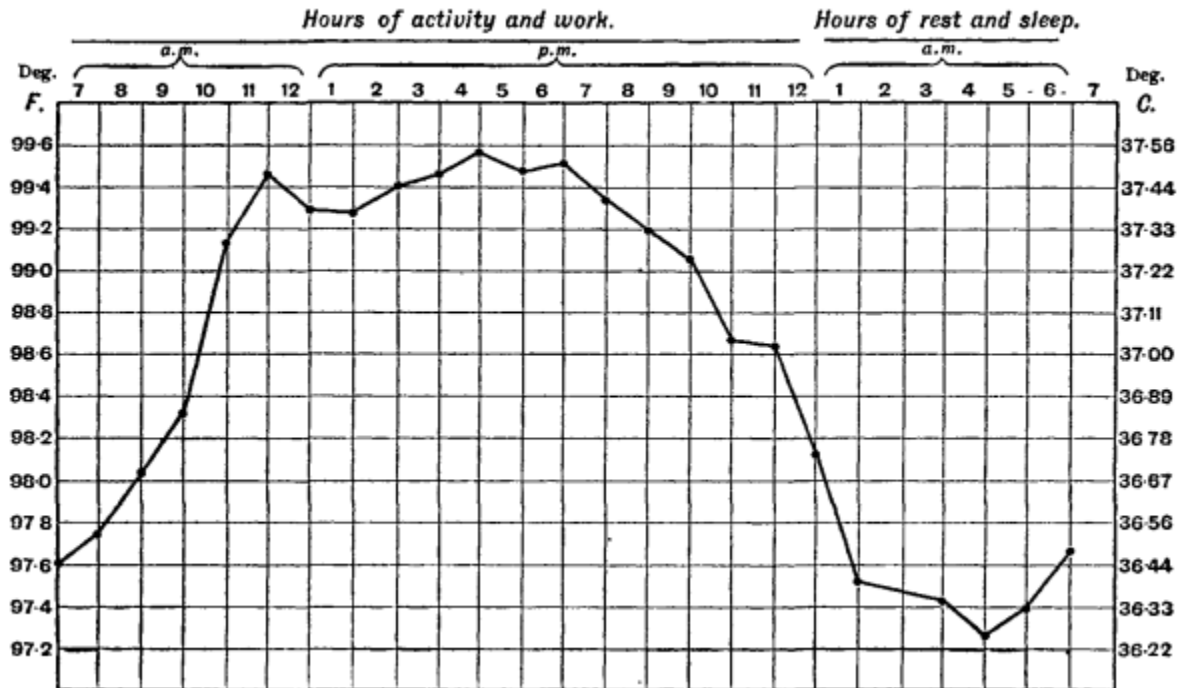
Záření reálných zdrojů



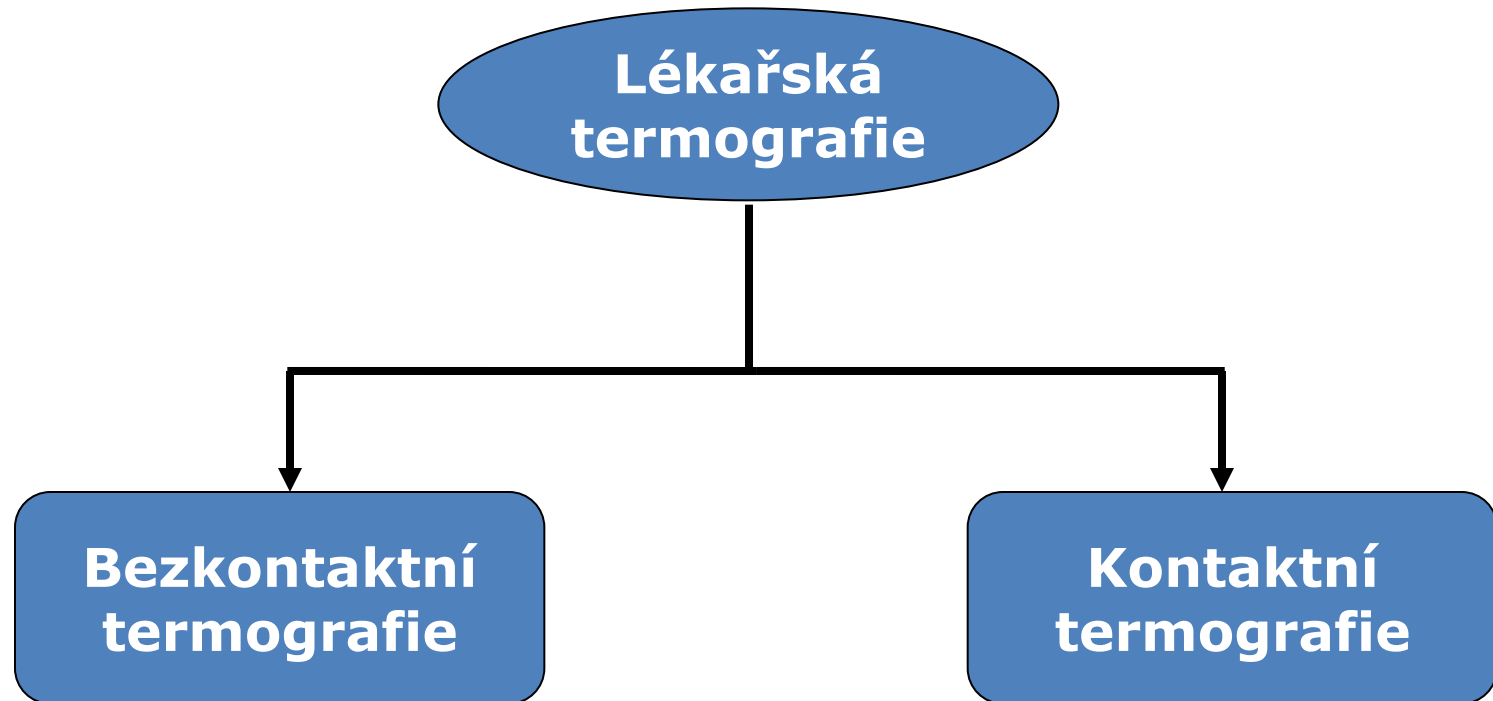
Obrázek 8.4: Závislosti spektrální hustoty zářivého toku různých zdrojů záření na vlnové délce záření. Převzato se svolením autora [66]: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/0205.htm>.

- **Neochlupený a suchý povrch lidského těla se chová jako téměř dokonalé černé těleso a to nezávisle na barvě pokožky (spektrální interval nad $6\mu\text{m}$).**
 - **Spektrální interval 3- $6\mu\text{m}$:** selektivní zářič
 - **Spektrální interval menší než $3\mu\text{m}$:** povrch kůže částečně transparentní
- **Pokožka není ideální Lambertovský zářič.**

Rozložení teploty lidského těla během denního cyklu

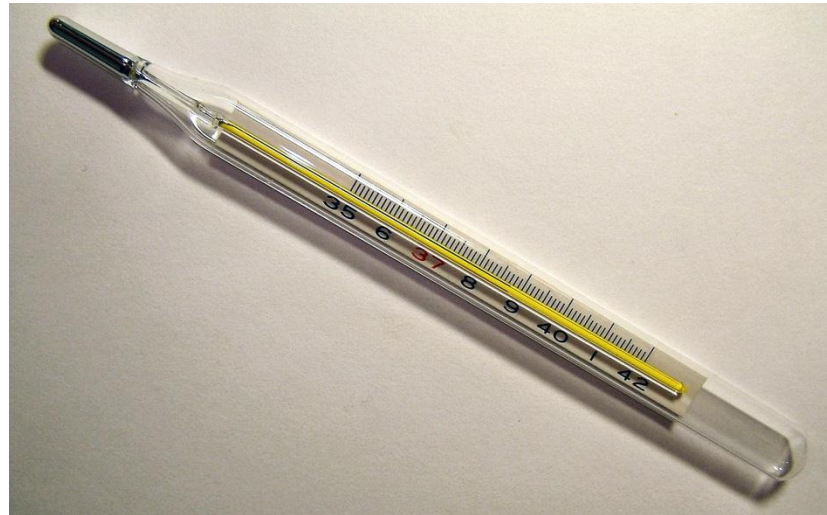


http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/05/Body_Temp_Variation.png



Kontaktní termografie

- **Metody jsou založené na teplotní roztažnosti látek, často kapalin (např. rtuť).**



http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Clinical_thermometer_38.7.JPG

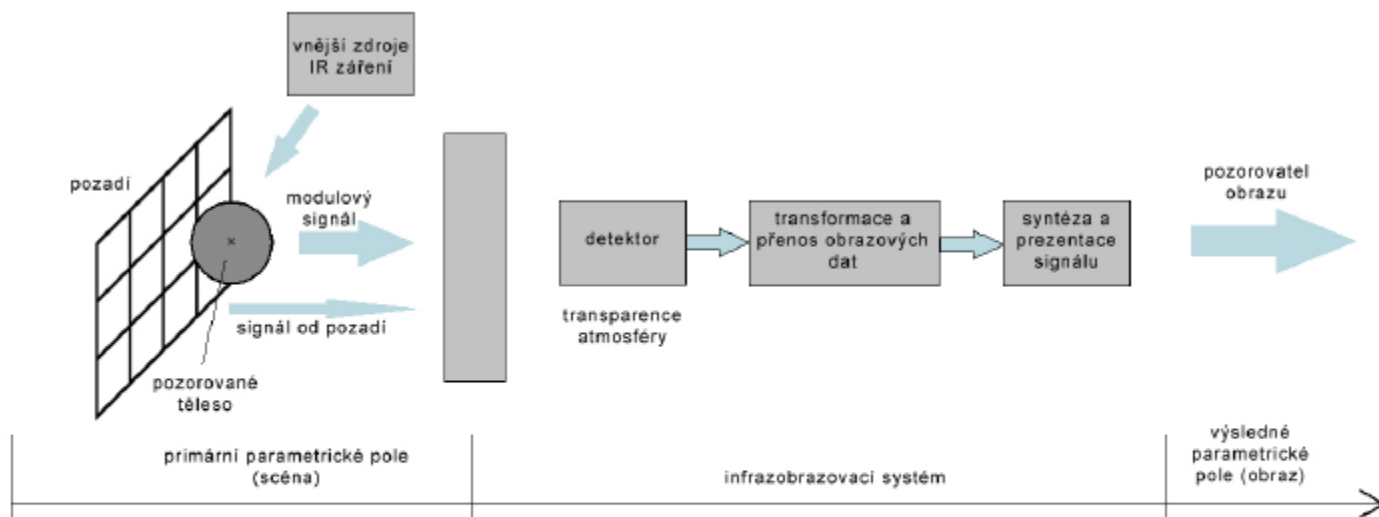
Kontaktní termografie

- **Lékařský rtuťový teploměr**
- **Elektronické kontaktní teploměry**
- **Termistory**
- **Tekuté krystaly**

Proces zobrazení termokamerou

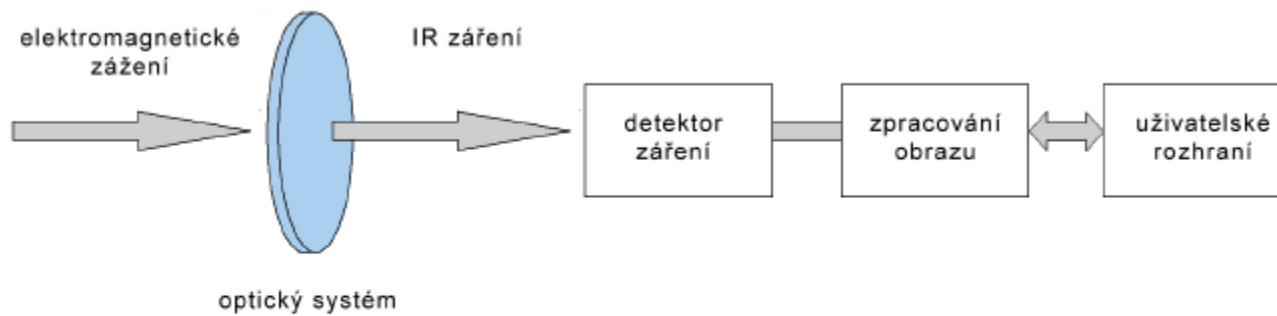
- **Analogie se záznamem pomocí digitálního fotoaparátu, příp. sítnice lidského oka.**
- **Snímání pomocí speciálního čipu citlivého na IR.**
- **Detekovaný radiační tok je ovlivněn tokem od vlastního snímaného objektu, ale také tokem od pozadí a vnějších radiačních zdrojů.**
- **Vliv na výsledek má také teplota a transparence atmosféry, ochlazování povrchu objektu prouděním vzduchu nebo směrovost vyzařování zdrojů záření.**
- **Teplotní profil povrchu je ovlivněn také skladbou snímaného objektu a existencí vnitřních zdrojů tepelné energie.**

Proces zobrazení termokamerou



Obrázek 8.6: Obecné schéma procesu zobrazení pomocí IR záření.

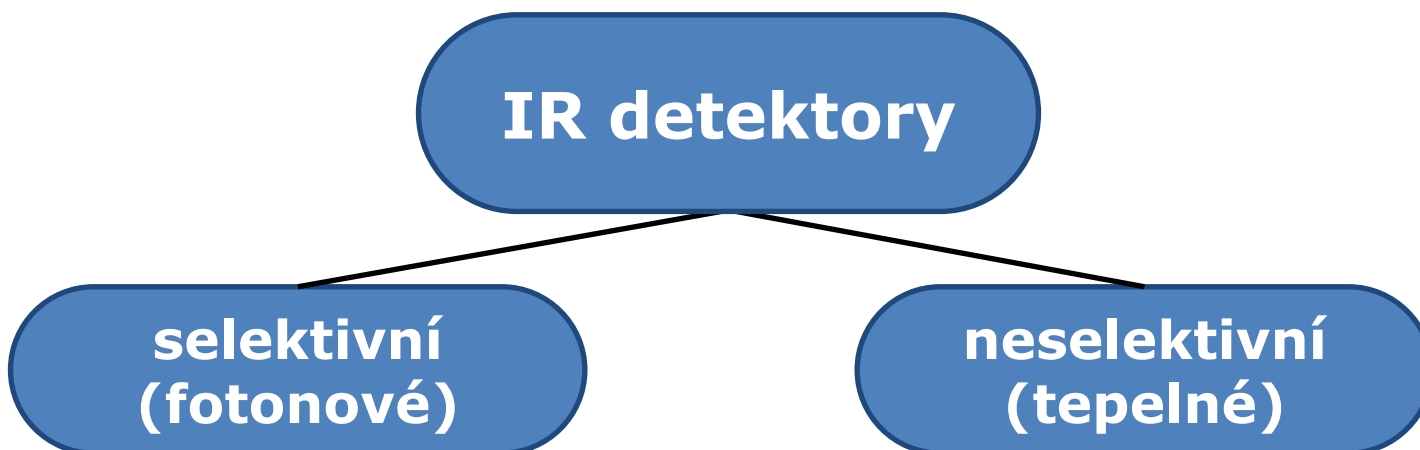
Proces zobrazení termokamerou



Obrázek 8.5: Obecné blokové schéma termokamery.

- **Čočky z germánia – neovlivňují průchod IR záření.**
- **Platí stejné zákony optiky.**
- **Na povrchu čočky je navíc antireflexní vrstva, která zabraňuje odrazu IR záření. Dochází tak ke zvýšení propustnosti čočky až na 90 % a více.**
- **Germániová čočka funguje zároveň jako filtr. Na povrch čočky dopadá záření všech vlnových délek, ale optika propustí jen požadované vlnové délky.**

- **Detektor IR záření v infrazobrazovacích systémech převádí zářivou energii na jiné formy energie (na elektrický signál).**



Detektory

Selektivní – fotonové

- **Jsou polovodičové detektory, které zaznamenávají jednotlivá kvanta (fotony) záření.**
- **Využívají přímé přeměny dopadajícího záření na elektrický proud (fotoelektrický jev)**
- **Velikost výstupního elektrického signálu je úměrná intenzitě záření.**
- **Detektory jsou obvykle úzkopásmové.**
- **Jsou citlivější než tepelné detektory, ale vyžadují chlazení. Vyšší cena.**

- **Základem je fotoelektrický jev:** Je-li energie elektronu ve valenčním pásmu, která mu byla předána fotonem záření, dostatečná k překonání zakázaného pásma Q_g , elektron opustí valenční pásmo a pohybuje se v pásmu vodivostním (vznik párů elektron-díra). Minimální energie fotonu (vlnová délka) je dána šířkou zakázaného pásma.

$$\lambda_c = \frac{hc}{Q_g} \quad [m]$$

λ_c mezní vlnová délka

Q_g zakázané pásmo energie [eV]

Detektory

Neselektivní – tepelné (bolometrické)

- **V závislosti na ohřátí vlivem dopadajícího IR záření se mění elektrický odpor detektorů.**
- **Změna odporu = intenzita IR záření.**
- **Charakteristická veličina:** teplotní součinitel odporu
 - Odpor elektrických vodičů s rostoucí teplotou stoupá: α má kladnou hodnotu.
 - Odpor elektrických polovodičů s rostoucí teplotou klesá: α má zápornou hodnotu.

$$\alpha = \frac{1}{R_d} \frac{dR_d}{dT}$$

- **Obvykle jsou širokopásmové.**

Detektory

Neselektivní – tepelné (bolometrické)

- **Mikrobolometrické mozaikové detektory: Paralelní uspořádání mikrobolometrických elementů do detekční mozaiky (např. 320 x 240).**
- **Struktura je:**
 - tepelně izolována od okolního prostředí
 - tepelně stabilizována (termoelektrické chlazení na pokojovou teplotu)
 - uzavřená do vakuovaného pouzdra se vstupním oknem např. z germania

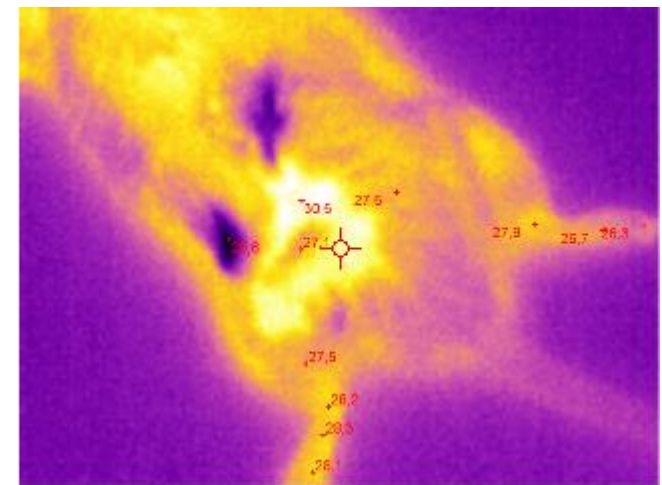
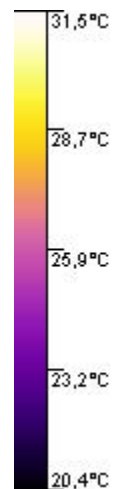
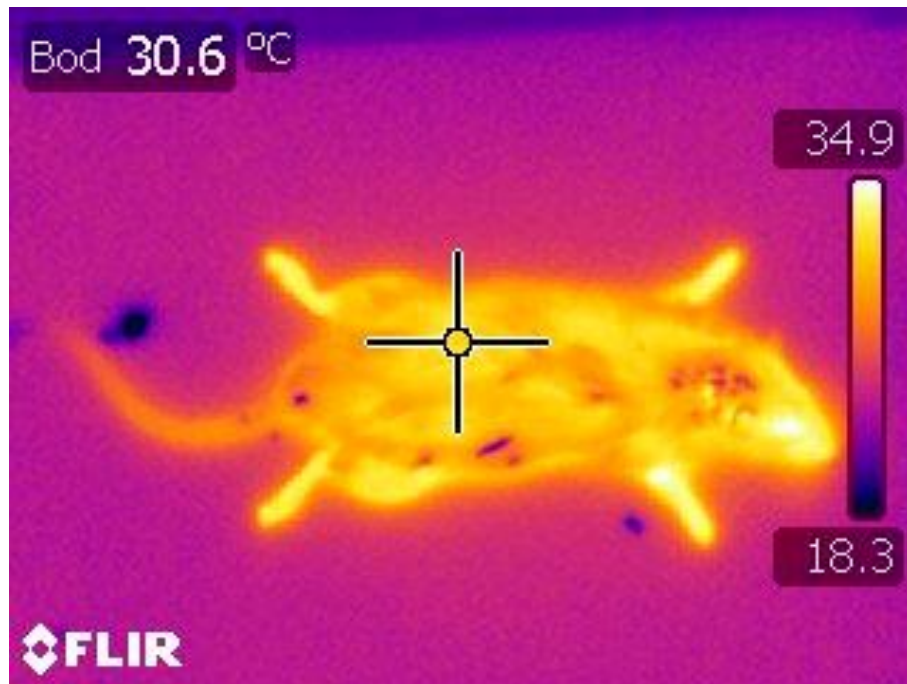
- **Stavebnictví**
- **Energetika a průmysl**

- **Medicína**
 - Zánětlivá ložiska
 - Poruchy prokrvení
 - Nádorová ložiska
 - ...

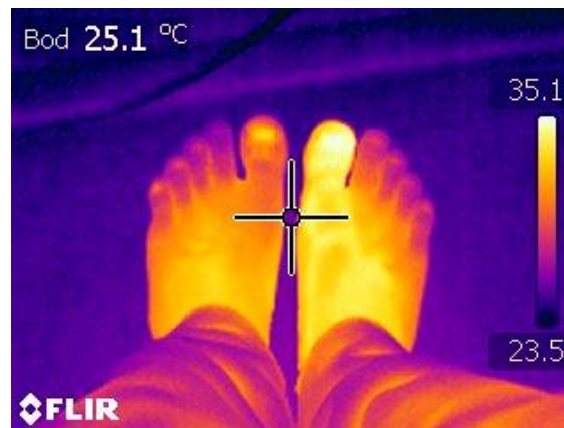
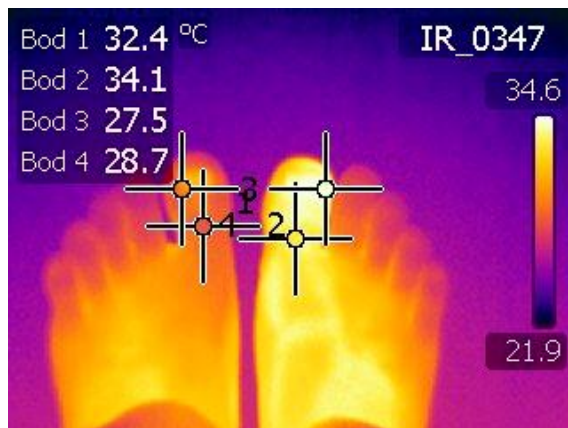
Faktory ovlivňující výsledky vyšetření

- **Přísné dodržování standardních podmínek (aklimatizace pacienta cca 10 minut, teplota ordinace v rozmezí od 19 do 21 °C).**
- **Využití symetrie k porovnávání místa s patologickým jevem a místa zdravého (např. při lokalizaci na končetinách by neměl teplotní rozdíl přesáhnout polovinu °C při normálním prokrvení).**
- **Vliv zvýšené teploty při horečce, psychického stavu pacienta, kouření či požití alkoholu.**

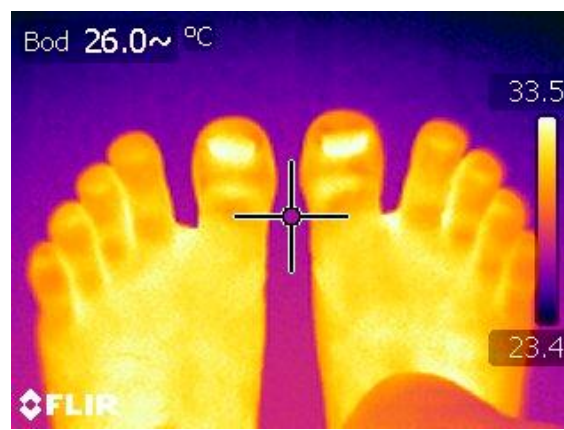
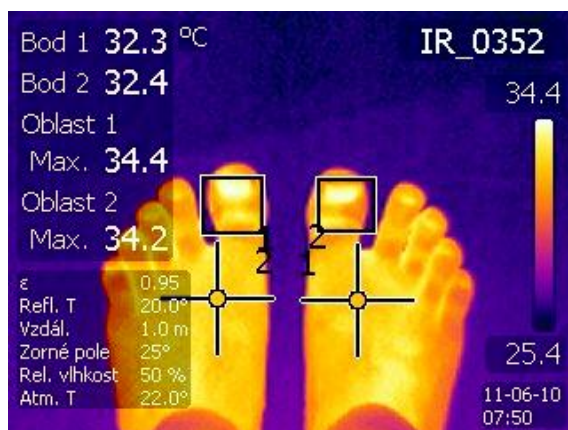
- **Studie změn teploty končetin potkana po ligatuře nervu zadní končetiny**



- Zánět v oblasti lůžka nehtu palce**

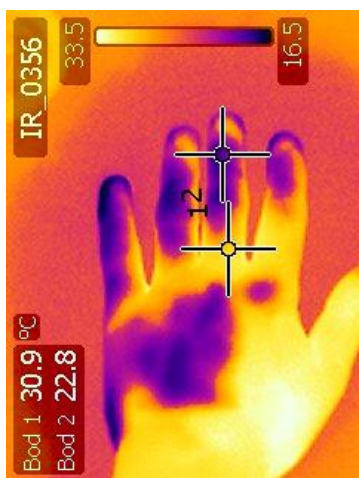


- Stav po 30 dnech**

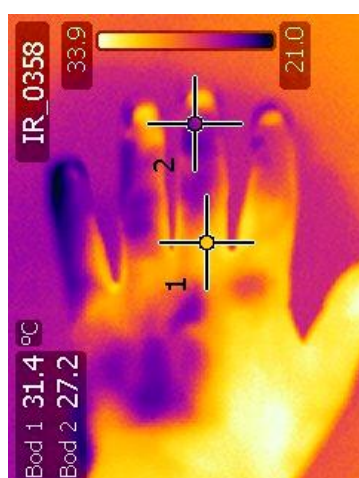


- Chladový test, čas snímání po 30 s.

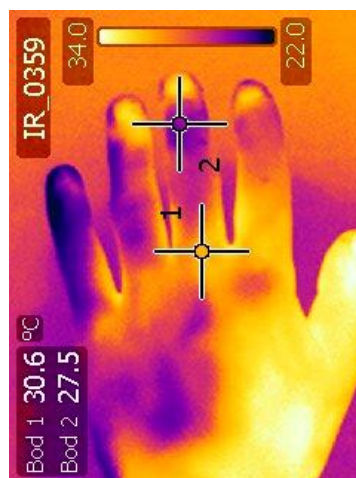
1



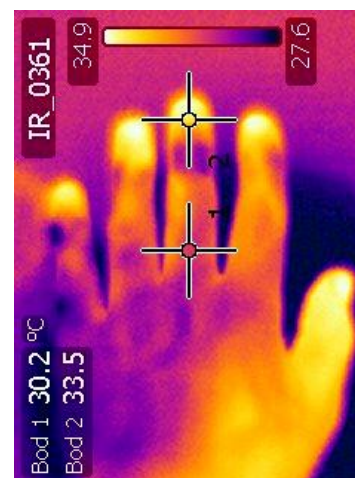
2



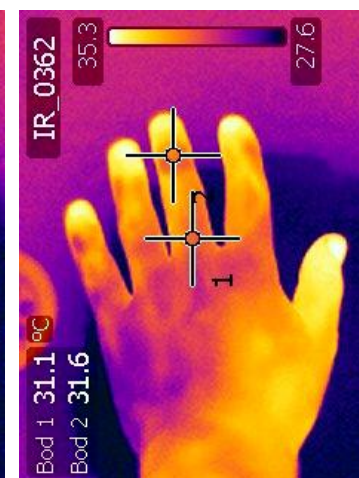
3



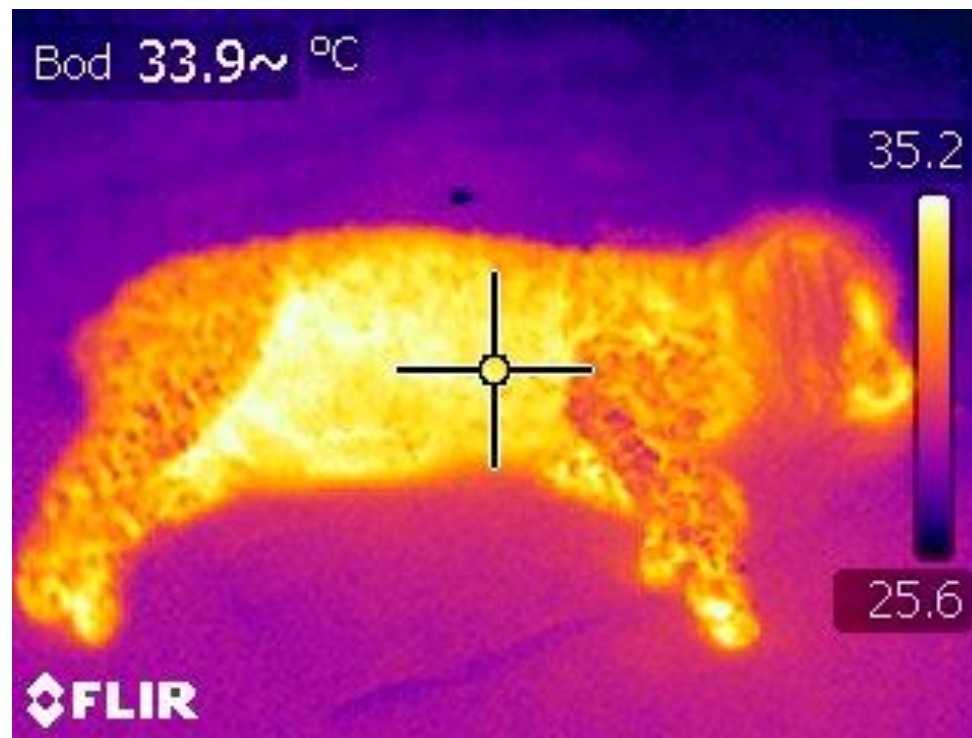
4



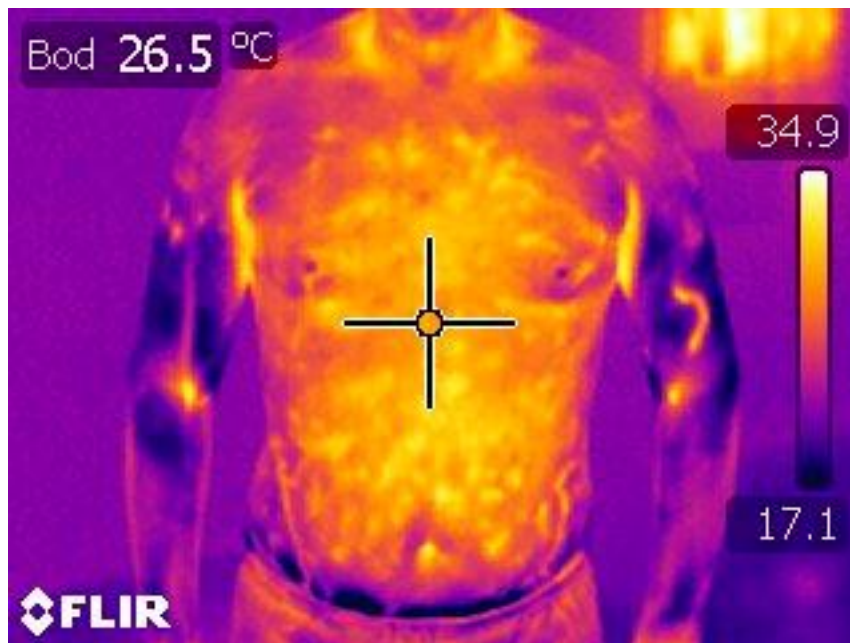
5



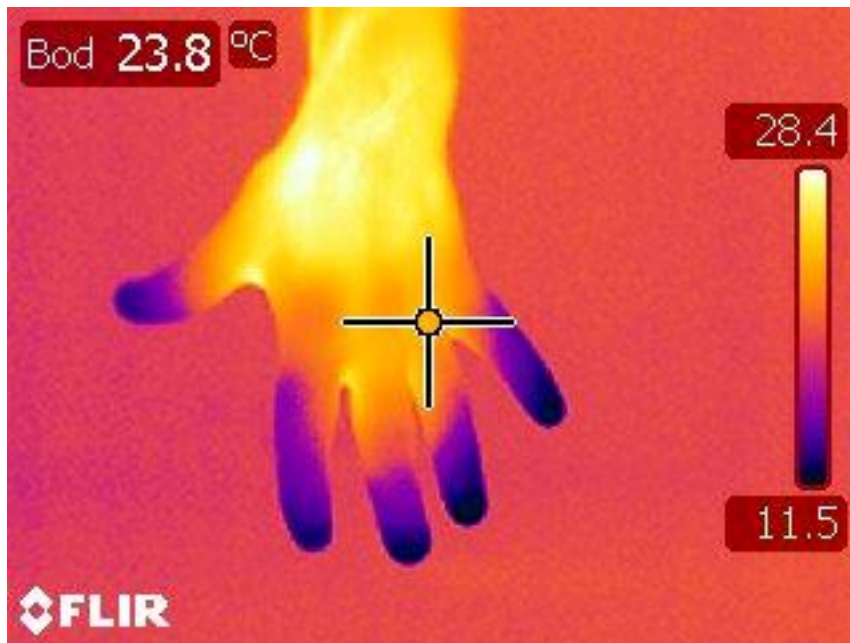
- **Termosnímek ležícího psa (pudl), tepelné rozdíly způsobené různou tloušťkou a strukturou srsti – komplikace EMISIVITA !!!!!**



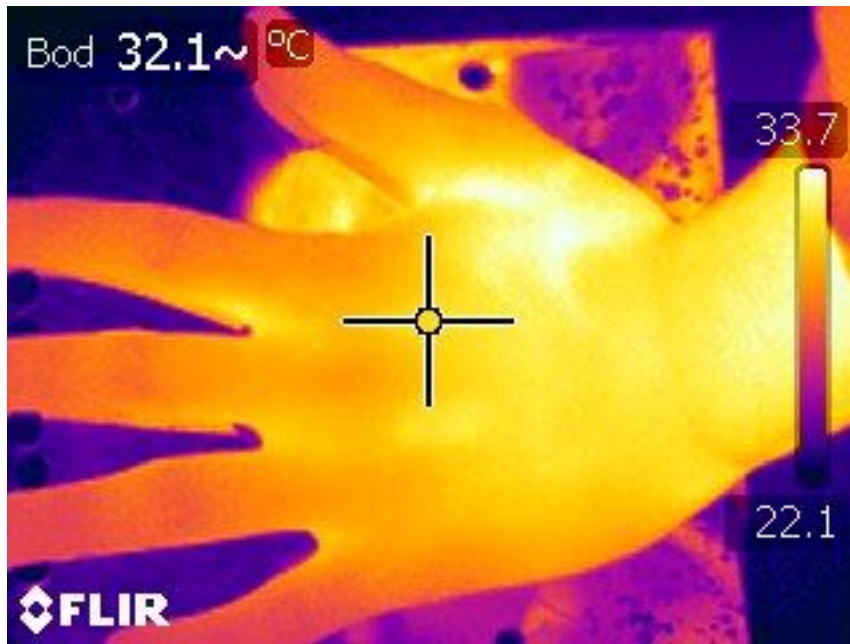
- **Termosnímky po kryoterapii (kryokomora).**



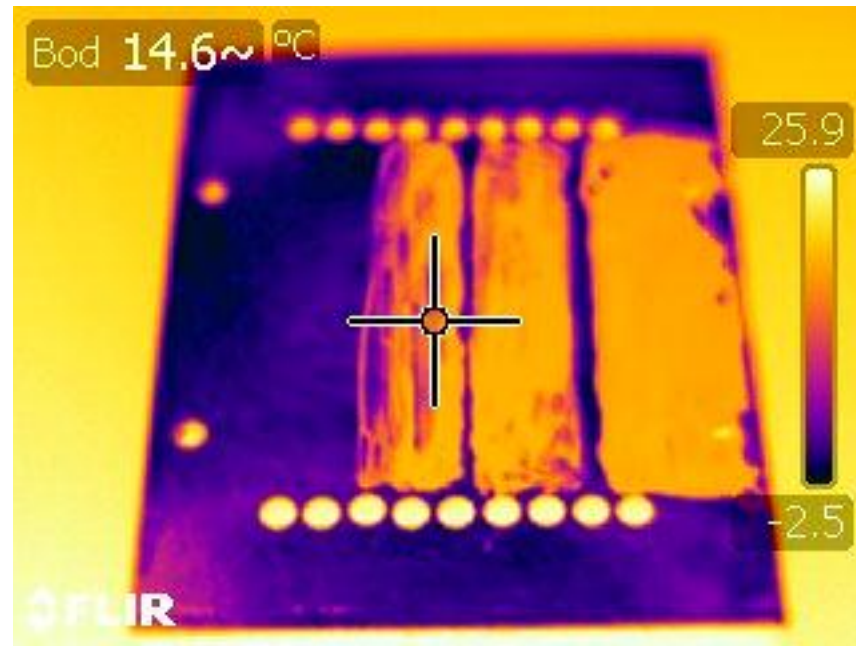
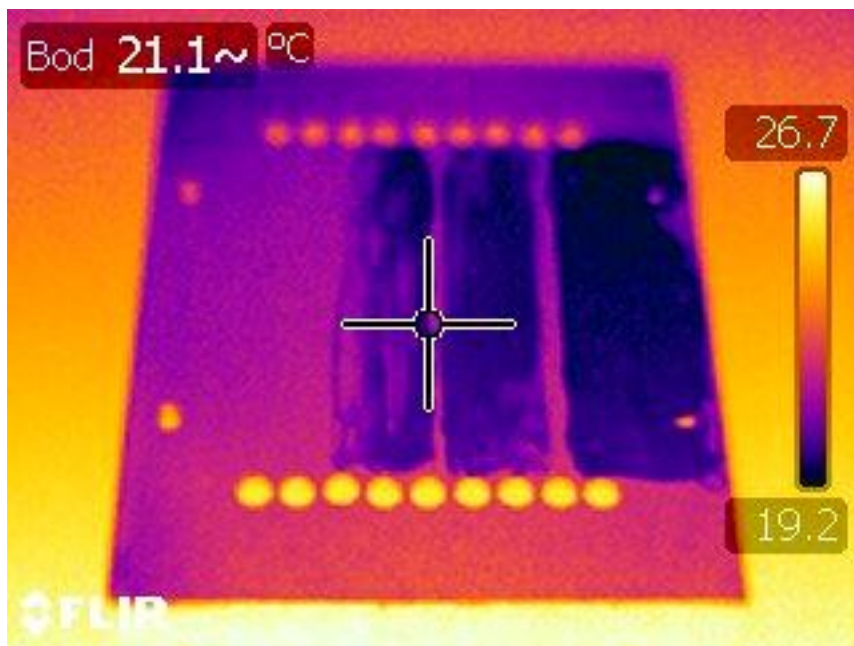
- **Termosnímky po kryoterapii (kryokomora).**



- **Jedna z četných otázek: A co „černoši“?**
- **Prostředí nízké „zrcadlené“ teploty.**

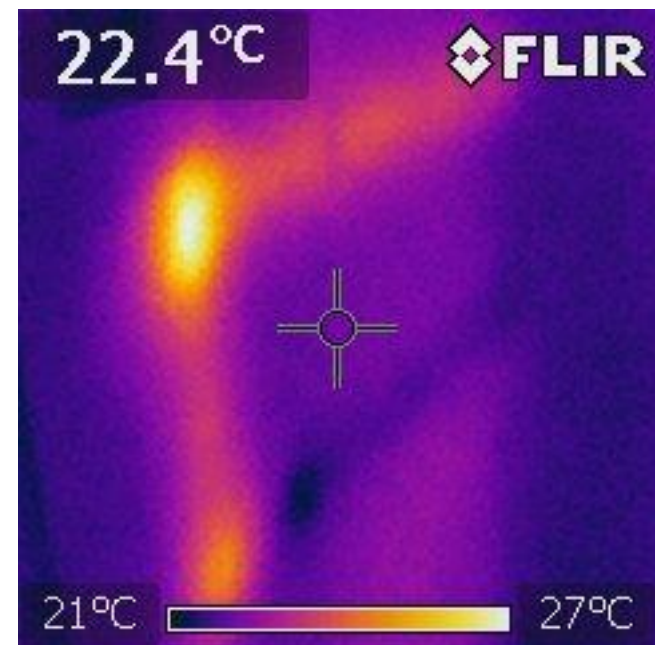
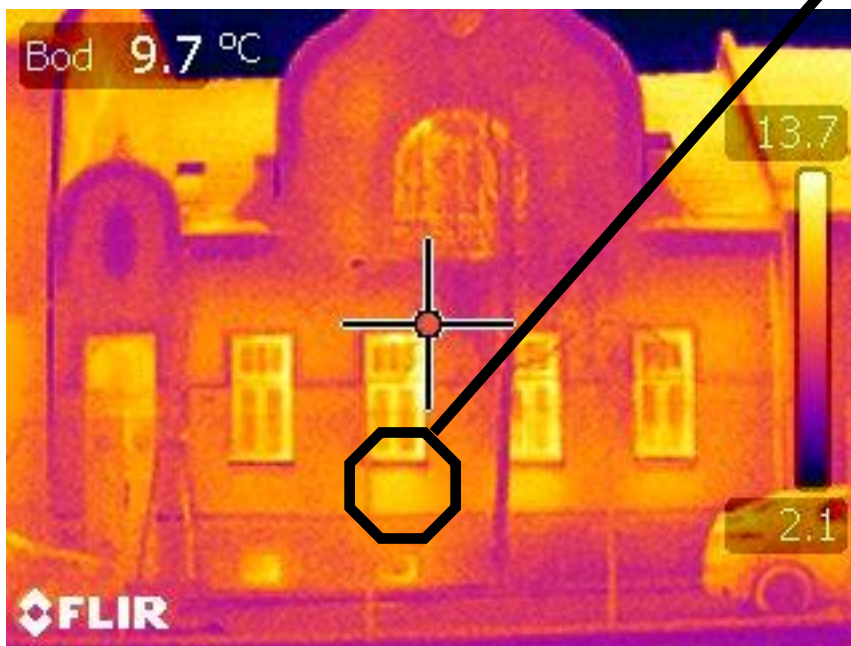


- **Hliníková deska**
- **Zaschlý UZ gel, mast, indulona při pokojové teplotě.**
- **Zaschlý UZ gel, mast, indulona v zrcadlené $T = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$.**
- **Celek stejná teplota – detekována různá \rightarrow emisivita.**

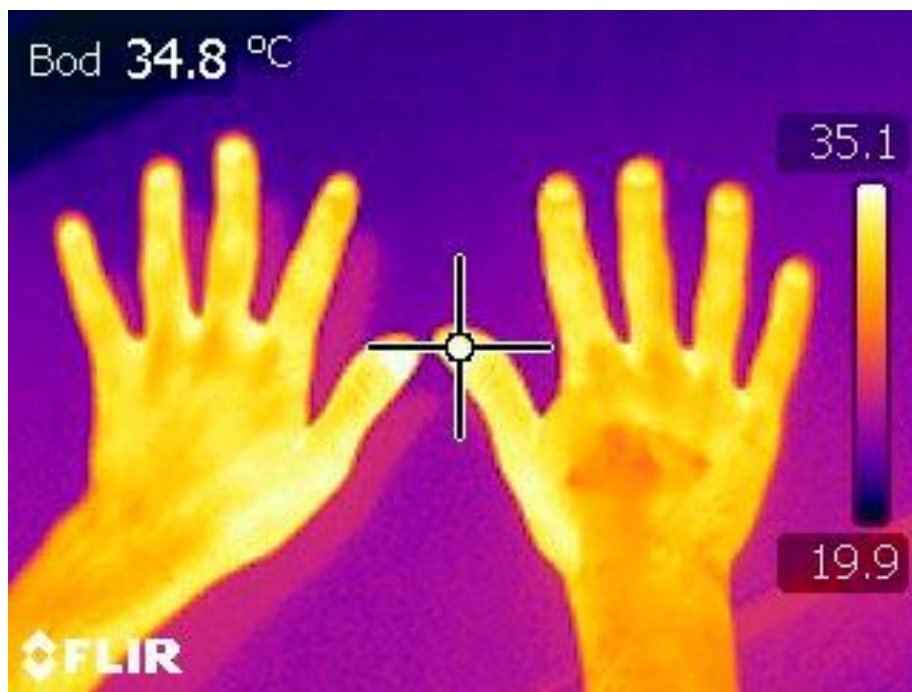


- **Tepelné izolace**

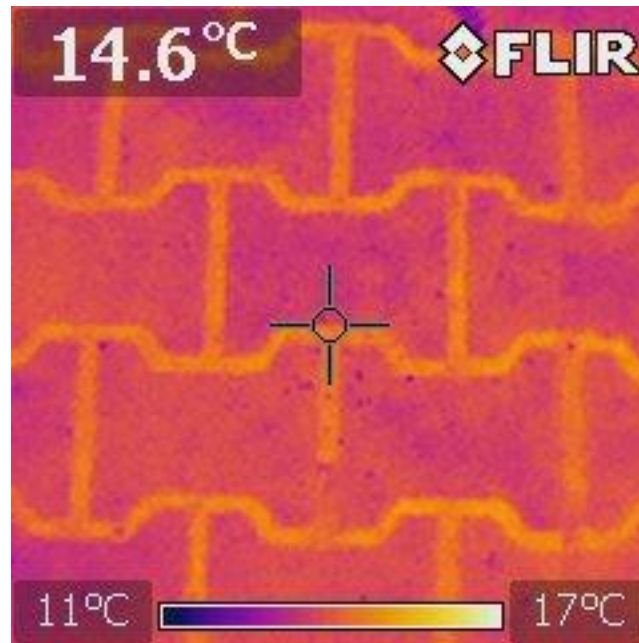
tepelný most – únik tepla

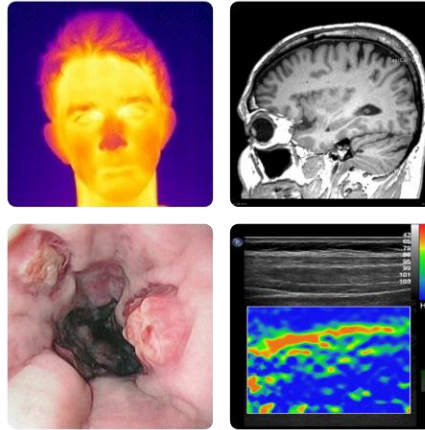


- **Povrch – emisivita**
- **Novikov, zaschlé, zrcadlená venkovní teplota**
- **Hydratační gel, zaschlé, ...**



- **Povrch – emisivita**
- **Zámková dlažba, noc, 12-13°C.**





Děkuji za pozornost !