



**Česká metrologická společnost, z.s.**

**Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1**

**tel/fax: 221 082 254**

**e-mail: cms-zk@csvts.cz**

**www.csvts.cz/cms**

**Metodika provozního měření**

**MPM 3.2.3/02/17**

**METODIKA PROVOZNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty POMOCÍ  
BEZKONTAKTNÍCH TEPLOMĚRŮ V PRŮMYSLOVÝCH  
APLIKACÍCH**

**Praha**

**říjen 2017**

**Vzorový metodický postup** byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2017

**Číslo úkolu:** VII/3/17

**Zadavatel:** Česká republika – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, organizační složka státu

**Řešitel:** Česká metrologická společnost, z.s.

© ÚNMZ, ČMS

**Neprodejné:** Metodika je volně k dispozici na stránkách ÚNMZ a ČMS. Nesmí však být dále komerčně šířena.

## 1 Předmět metodiky

Bezkontaktní (bezdotykové, radiační, infračervené) teploměry patří do zvláštní skupiny měřidel, které při měření nejsou v přímém kontaktu s měřeným objektem. Umožňují pokrýt široké rozpětí měřených teplot od podnulových až po teploty přesahující 1500 °C. Přesnost měření těchto měřidel se pohybuje v rámci několika desetin až jednotek stupňů Celsia, čemu zodpovídají také očekávané nejistoty měření. Při kalibracích je k teploměrům a termokamerám nutné přistupovat separátně, jelikož každé měřidlo má svá specifika a ta je nutné dodržovat.

## 2 Související normy a metrologické předpisy

Podpůrné dokumenty, ze kterých je možné vycházet při měření pomocí bezdotykových teploměrů a výpočtu nejistot měření, jsou:

OIML D 24	Dokument OIML D 24	[L1]
VDI/VDE 3511	Radiation thermometry – Calibration of radiation thermometers, 2004	[L2]
ČSN 25 8005	Názvosloví z oboru měření teploty	[L3]
ČSN 25 8010	Směrnice pro měření teplot v průmyslu	[L4]
EA-04/02 M:2013	Vyjádření nejistoty měření při kalibraci <a href="http://www.cia.cz/Download.ashx?Type=Document&amp;Id=16811">http://www.cia.cz/Download.ashx?Type=Document&amp;Id=16811</a>	[L5]
CCT-WG5	on Radiation Thermometry: Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver, 2008, <a href="http://www.bipm.org/wg/CCT/CCT-WG5/Allowed/Miscellaneous/Low T Uncertainty Paper Version 1.71.pdf">http://www.bipm.org/wg/CCT/CCT-WG5/Allowed/Miscellaneous/Low T Uncertainty Paper Version 1.71.pdf</a>	[L6]
CCT-WG5	on Radiation Thermometry: Uncertainty budgets for realisation of scales by radiation thermometry, <a href="http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/22/CCT03-03.pdf">http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/22/CCT03-03.pdf</a>	[L7]
JCGM 200:2012	International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), třetí vydání, BIPM, 2012	[L8]
ČSN EN ISO/IEC 17025	Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří	[L9]
	The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), H. Preston - Thomas, <a href="http://www.its-90.com/its-90.html">http://www.its-90.com/its-90.html</a>	[L10]
OIML R141:2008 (E)	Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instrument	[L11]
	<a href="http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR_THEORY_55514_ENG_REVB_LR.PDF">http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR_THEORY_55514_ENG_REVB_LR.PDF</a>	[L12]

	Principles of Infrared Thermometry, <a href="http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z059-062.pdf">http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z059-062.pdf</a>	[L13]
	<a href="http://www.bestech.com.au/wp-content/uploads/products/Infrared-Thermometer-principle.jpg">http://www.bestech.com.au/wp-content/uploads/products/Infrared-Thermometer-principle.jpg</a>	[L14]
Fluke	návod k černému tělesu 4180 a 4181, <a href="http://us.flukecal.com/products/temperature-calibration/industrial-calibrators/infrared-calibrators/4180-4181-precision-inf?quicksheet_product_details=4">http://us.flukecal.com/products/temperature-calibration/industrial-calibrators/infrared-calibrators/4180-4181-precision-inf?quicksheet_product_details=4</a>	[L15]

### 3 Kvalifikace pracovníků provádějících měření

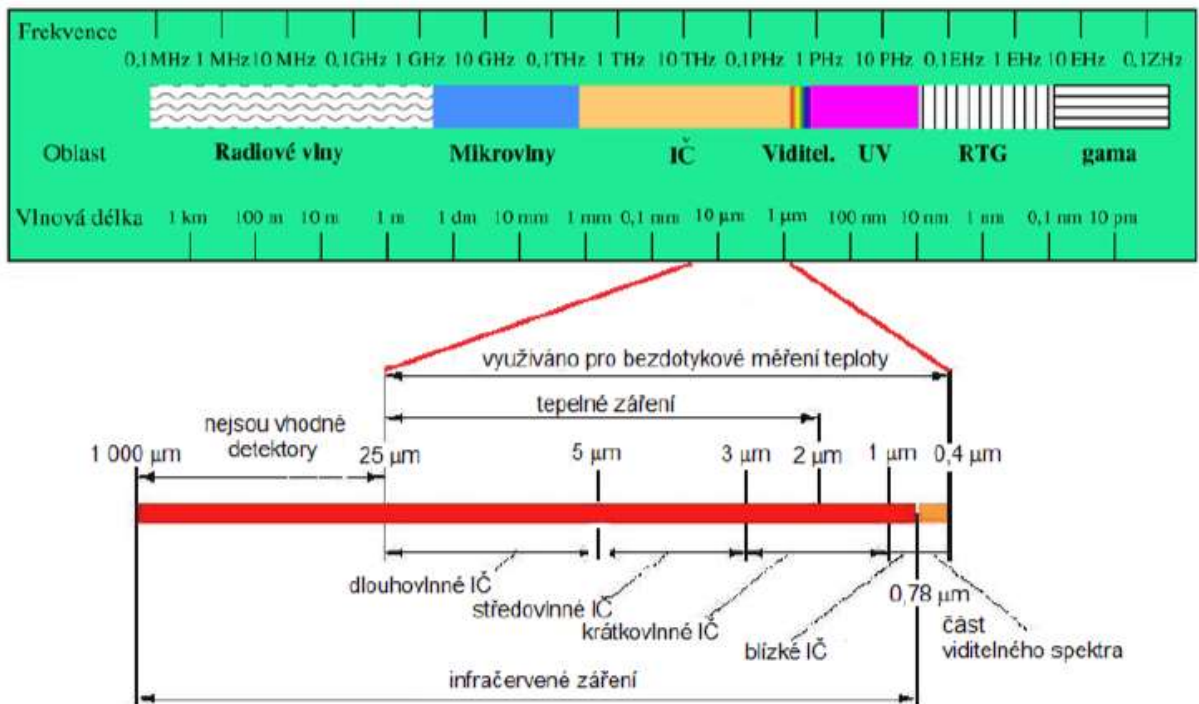
Kvalifikace pracovníků provádějících bezdotykové měření tělesné teploty je dána příslušným předpisem organizace. Tito pracovníci se seznámí s metodickým postupem upraveným na konkrétní podmínky daného pracoviště provádějícího měření a případnými (interními) souvisejícími předpisy.

Doporučuje se potvrzení odborné způsobilosti těchto pracovníků prokázat vhodným způsobem, například osvědčením o interním zaškolení, o absolvování odborného kurzu, v krajním případě certifikátem odborné způsobilosti. Úroveň školení závisí na zařazení pracovníka a důležitosti prováděné měřicí operace.

### 4 Názvosloví, definice

#### 4.1 Teorie bezdotykového měření teploty

Bezdotykové měření teploty využívá faktu, že všechna tělesa vyzařují elektromagnetické záření v závislosti na jejich teplotě. Dostupné detektory elektromagnetického záření jsou schopny pokrýt teplotní rozsah cca -50 °C až 10000 °C v závislosti na jejich principu a pracovních vlnových délkách. Toto rozmezí teplot odpovídá řádově pásmu vlnových délek 0,4 μm až 25 μm, přičemž elektromagnetické záření o vlnových délkách v podoblasti od 2 μm do 25 μm se někdy nazývá jako tepelné záření. Historicky se bezdotykové teploměry (tzv. pyrometry) používaly hlavně pro měření vysokých teplot, postupem času se s vývojem detektorů záření, elektroniky a optiky teplotní rozsah bezdotykového měření podstatně rozšířil, kdy jsou dnes běžné např. bezdotykové teploměry pro měření tělesné teploty. Oblast vlnových délek elektromagnetického záření, která se využívá pro měření teploty, je znázorněna na obr. č. 1.



Obr. č. 1: Oblast vlnových délek používaných pro bezdotykové měření teploty

Bezdotykový způsob nabízí oproti kontaktnímu měření teploty značné výhody, skýtá ale také řadu úskalí často znemožňující dostatečně přesná měření. Výhodami bezkontaktního způsobu měření jsou např.:

- možnost měřit vysoké teploty, které by vedly k destrukci kontaktního snímače,
- možnost měřit teplotu vzdálených nebo pohybujících se těles,
- zanedbatelný vliv na teplotní profil měřeného tělesa (na rozdíl od kontaktního způsobu měření, kdy může např. docházet k odvodu tepla stonkem teploměru),
- možnost měřit rozložení teplot na povrchu objektů v jednom okamžiku např. pomocí termovizních kamer.

Nevýhody bezkontaktního měření teploty jsou spojeny se složitostí vyhodnocení měření, kdy leckdy není možné dostatečně dobře zjistit nebo zajistit parametry ovlivňující měření (např. emisivita povrchu tělesa, odrazivost povrchu tělesa (s tím souvisí i odraz záření jiných těles), spektrální propustnost atmosféry mezi objektem a detektorem teploměru atd.).

Pro lepší pochopení souvislostí při bezdotykovém měření teploty je následující podkapitola věnovaná teoretickým základům.

## 4.2 Teoretické základy bezdotykového měření teploty

Princip měření teploty bezdotykovým způsobem vychází z Planckova zákona, který uvádí vztah mezi spektrální hustotou vyzařování tzv. černého tělesa a jeho termodynamickou teplotou:

$$M_{0\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} = \frac{c_1}{\lambda^5} \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

kde  $M_{0\lambda}$  je spektrální hustota vyzařování černého tělesa,  $c$ ,  $h$ ,  $k$  jsou fundamentální fyzikální konstanty (rychlost světla, Planckova konstanta, Boltzmannova konstanta),  $\lambda$  je vlnová délka záření a  $T$  značí termodynamickou teplotu. Sdružením výše uvedených matematických a fyzikálních konstant jsou pak definovány konstanty  $c_1$  a  $c_2$  (první a druhá vyzařovací konstanta). Z rovnice 1 je patrné, že spektrální hustota vyzařování černého tělesa závisí na vlnové délce, což je ilustrováno v grafu na obr. 2 pro několik izoterm. Z uvedeného grafu je zřejmé, že při jednotlivých teplotách nabývá spektrální hustota vyzařování pro určité vlnové délky maxima. Tuto skutečnost vystihuje tzv. Wienův zákon posuvu

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T/K} \mu\text{m} \quad (2)$$

kdy se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování s rostoucí teplotou posouvá k nižším vlnovým délkám. Tento jev se zohledňuje při volbě bezdotykových teploměrů pro měření určitého teplotního rozsahu. Pro měření vysokých teplot se např. volí teploměry obsahující detektory, které jsou schopny detekovat záření o nízkých vlnových délkách.

Integrací Planckova zákona přes všechny vlnové délky je možné dospět ke Stefan-Boltzmannovu zákonu

$$M_0 = \sigma T^4 \quad (3)$$

který říká, že intenzita vyzařování černého tělesa v celém rozsahu vlnových délek je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty. Konstanta úměrnosti  $\sigma$  se nazývá Stefan-Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,7604 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ).

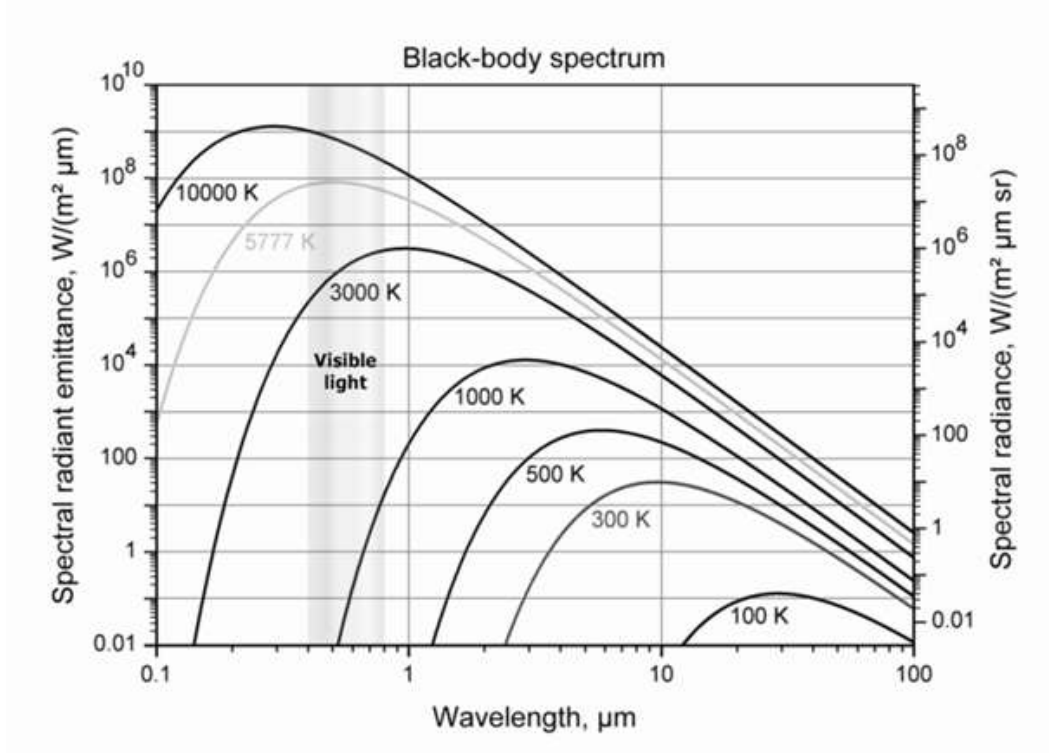
Ve skutečnosti se reálná tělesa více či méně liší od ideálního černého tělesa. K vyjádření míry odlišnosti od chování ideálního černého tělesa slouží veličina nazývaná emisivita ( $\epsilon$ ), která udává poměr vyzařování obecného tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při stejné teplotě.

$$\epsilon = \frac{M}{M_0} \quad (4)$$

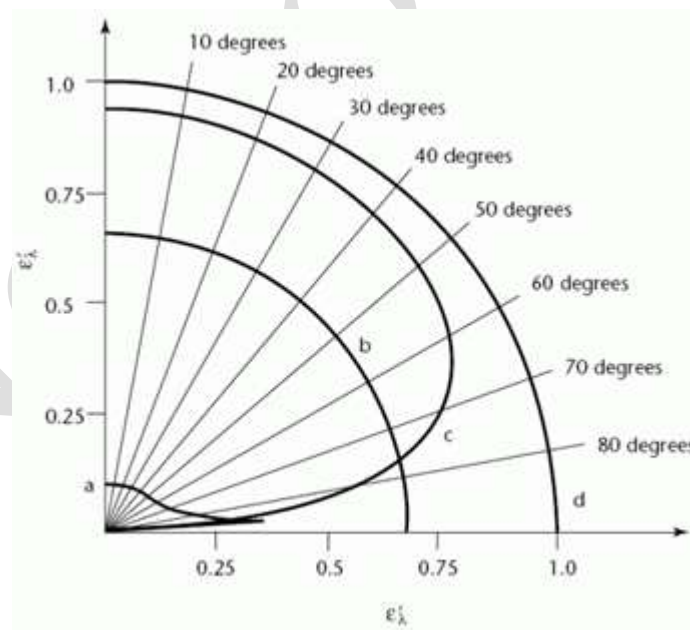
$M_0$  je intenzita vyzařování černého tělesa a  $M$  značí intenzitu vyzařování příslušného objektu. Emisivita je bezrozměrná veličina a nabývá hodnot v rozmezí 0 až 1 a je obecně funkcí vlnové délky, teploty a směru emitovaného záření. Z tohoto důvodu se zavádí pojmy jako např. celková emisivita, spektrální emisivita a směrová spektrální emisivita. Spektrální emisivita  $\epsilon_\lambda$  je definována jako poměr spektrálních hustot intenzity vyzařování vztahovaných ke konkrétní vlnové délce  $\lambda$ .

$$\epsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{0\lambda}} \quad (5)$$

Příklad závislosti emisivity na úhlu pozorování je uveden na obr. č. 3 pro různé povrchy.



**Obr. č. 2:** Závislost spektrální hustoty vyzařování (spectral radiance) černého tělesa na vlnové délce (wavelength) pro několik izoterem



**Obr. č. 1:** Závislost směrové spektrální emisivity  $\epsilon'_{\lambda}$  na úhlu: a – leštěný kov, b – tzv. Lambertovský povrch, c – nepropustné dielektrikum, d – ideální černé těleso

Z hlediska měření teploty je rovněž důležitý Kirchhoffův zákon, který uvádí, že pokud je těleso ve stavu tepelné rovnováhy, vyzařovaná energie se rovná energii pohlcované a jeho emisivita se rovná jeho pohltivosti (absorbanci)  $\alpha$  (i s ohledem na vlnovou délku):

$$\epsilon = \alpha \text{ resp. } \epsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (6)$$

Na rozdíl od ideálního černého tělesa mohou reálná tělesa záření nejen pohlcovat nebo vyzařovat, ale také odrážet nebo jimi může záření prostupovat. Proto se pro reálná tělesa definují odrazivost (reflektance) a propustnost (transmitance). Na základě zákona o zachování energie platí následující důležité vztahy

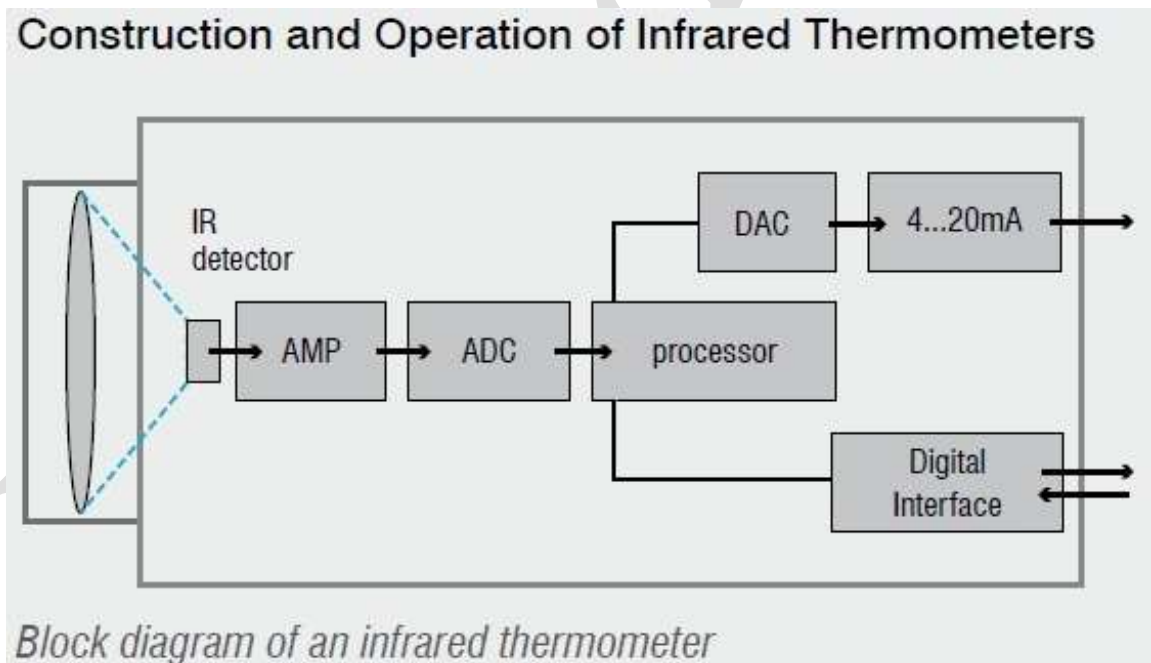
$$\alpha + \tau + \rho = 1 \text{ nebo } \epsilon + \tau + \rho = 1 \quad (7)$$

Z výše uvedené rovnice např. plyne, že pokud máme těleso nepropustné pro záření ( $\tau = 1$ ), které má velice nízkou emisivitu ( $\epsilon \rightarrow 0$ ), tak prakticky veškeré dopadající záření odrazí.

Z tohoto vztahu je také patrné, že pokud chceme měřit teplotu s dostatečnou přesností, musíme znát dobře emisivitu, odrazivost a pohltivost měřených těles.

#### 4.3 Konstrukce bezdotykových teploměrů

Obecnou konstrukci bezdotykových teploměrů je možné popsat pomocí obr. č. 3. Radiační záření dopadá na detektor přes čočku. Elektrický signál vygenerovaný na detektoru úměrný teplotě objektu je zesílen zesilovačem. Tento signál je digitálně zpracován a následně převeden na výstupní signál odpovídající měřené teplotě. Měřená hodnota může být zobrazena přímo na displeji teploměru nebo ve formě analogového signálu.



Obr. č. 2: Příklad konstrukce infračerveného teploměru [L14]

Detektory můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin a dalších podskupin:

- tepelné detektory
  - termočlávková baterie (thermopile)
  - pyroelektrické detektory
  - FPA bolometrické detektory (kamery)



- kvantové detektory

U tepelných detektorů dochází ke změně jejich vlastní teploty na základě množství dopadajícího záření.

Jak již napovídá název, termočláňková baterie je složená z několika desítek měřicích spojů (termoelektrických snímačů teploty) umístěných na malé ploše. Vlivem dopadajícího radiačního záření dochází ke změně teploty měřicích spojů. Tím dojde ke změně výstupního napětí a to je následně převedeno na měřenou teplotu.

Základ pyroelektrických detektorů tvoří citlivý prvek vytvořený z pyroelektrického materiálu a dvou elektrod. Absorbované infračervené záření se projeví změnou teploty citlivého prvku. To má za výsledek vznik dočasného elektrického potenciálu jako důsledek pyroelektrického jevu. Před dalším zpracováním musí být signál zesílen. Důležité je, aby dopadající záření na detektor bylo pravidelně přerušováno.

Bolometry pracují na principu změny elektrického odporu v závislosti na změně teploty. Citlivý prvek se skládá z odporu s vysokým teplotním koeficientem. Změna v odporu prvku vede ke změně výstupního napětí.

Kvantové detektory reagují na dopadající radiační záření rychleji, než detektory tepelné. Patří do skupiny polovodičových detektorů, které zaznamenávají jednotlivé dopadající fotony. Počet dopadajících fotonů je závislý na intenzitě dopadajícího záření. Při dopadu fotonů na detektor dochází k fotoelektrickému jevu, kdy je dopadající záření přeměňováno přímo na elektrický proud. Detektory pracují v úzkém pásmu vlnových délek, jsou citlivější než tepelné detektory, ale vyžadují chlazení.

Záření dopadající na detektor před jeho samotným dopadem prochází přes optiku teploměru (nebo termokamery). Kromě fokusace dopadajícího záření přímo na detektor bývá optika pokrytá antireflexní vrstvou, která zabraňuje odrazu záření od povrchu čočky. Dále většinou čočka vystupuje také jako filtr, který na detektor propouští záření pouze o určité vlnové délce.

Čočky a také v některých provozech používaná měřicí okna, jsou vyráběny z různých materiálů, které jsou propustné pro infračervené záření. Na obr. č. 5 jsou uvedeny závislosti propustnosti na vlnové délce záření pro několik materiálů typicky používaných pro konstrukci IČ optiky.

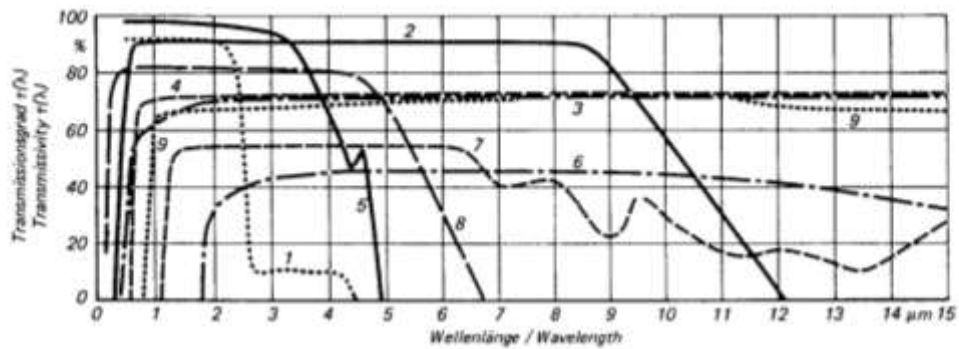
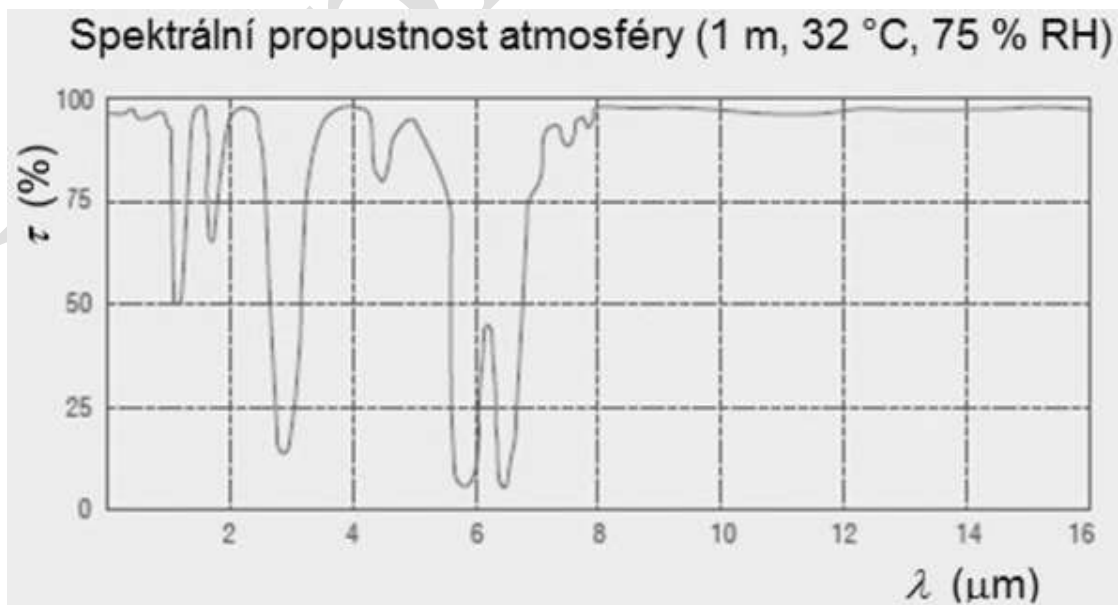


Fig. 13: Transmittance of typical IR materials (1 mm thick)

- |                           |                            |
|---------------------------|----------------------------|
| 1- Optical glass          | 6- Germanium               |
| 2- Calcium fluoride (CaF) | 7- Silicon                 |
| 3- Zinc selenide (ZnSe)   | 8- Lithium fluoride        |
| 4- KRS-5                  | 9- Chalcogenide glass IG-2 |
| 5- Quartz glass           |                            |

**Obr. č. 3:** Propustnost (transmittance) v závislosti na vlnové délce pro materiály, které jsou využívány pro konstrukci IČ optických elementů

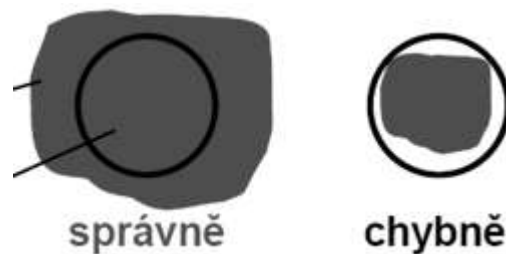
Vysvětlení toho, že infračervené teploměry pracují pouze v určitých oblastech vlnových délek, nalezneme ve spektrální propustnosti atmosféry. Jelikož se jedná o bezdotykový způsob měření teploty, je zřejmé, že mezi měřeným objektem a teploměrem se nachází nějaké médium, nejčastěji vzduch, které pohlcuje více či méně infračervené záření. V principu se volí takový rozsah vlnových délek, kdy je propustnost atmosféry nejvyšší. Pro vzduch je to typicky oblast (8 až 14) μm a diskrétní vlnové délky 0,65 μm, 0,9 μm, 1,6 μm nebo 3,9 μm. Příklad oblastí vlnových délek pro vzduch, které jsou výhodné díky vysoké propustnosti IČ záření, je zobrazen na obr. č. 6.



**Obr. č. 4:** Spektrální propustnost atmosféry  $\tau$  v závislosti na vlnové délce záření

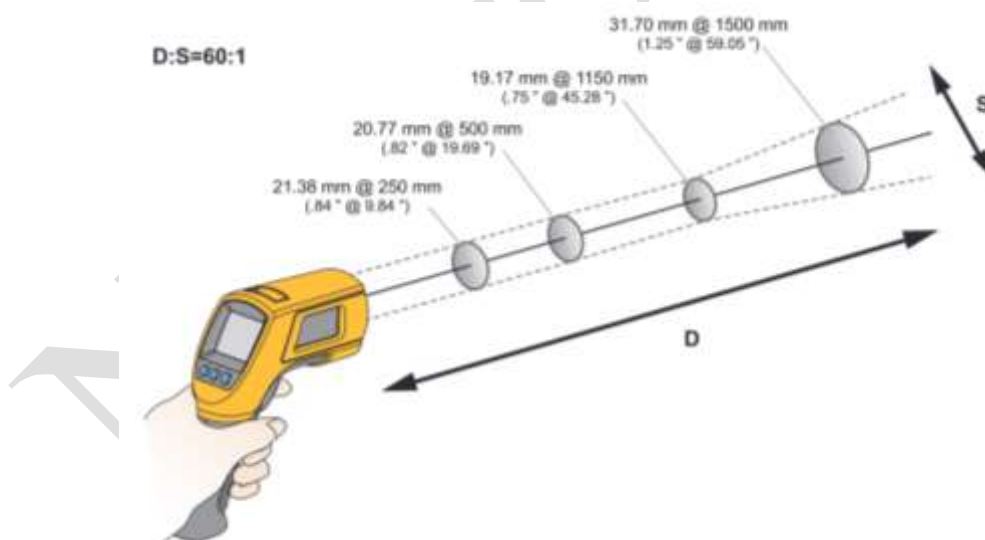
#### 4.4 Měření s pomocí bezdotykových teploměrů a jejich kalibrace

Pro správné měření teploty s pomocí bezdotykových teploměrů je zapotřebí znát s dostatečnou přesností emisivitu měřeného povrchu, kterou je obvykle nutné nastavit na příslušném přístroji pro výpočet teploty. Pro správné vyhodnocení teploty je rovněž nutné kvantifikovat nebo minimalizovat nepříznivé vlivy okolí (např. propustnost atmosféry, odrazy záření jiných těles v okolí). Během měření je důležité věnovat pozornost zaměření teploměru na měřený objekt. Je důležité, aby měřená plocha byla výrazně větší, než je velikost měřicího bodu bezdotykového teploměru (obr. č. 7).



Obr. č. 5: Princip zaměření bezdotykových teploměrů

Velikost měřicího bodu je možné určit na základě specifikace, kterou udává výrobce. Většinou to bývá optická charakteristika teploměru popsána pomocí vztahu mezi měřenou vzdáleností a velikostí měřeného bodu (D:S parametr), nebo v grafické podobě (viz obr. č. 8).



Obr. č. 6: Příklad optické charakteristiky bezdotykového teploměru

U termokamer jsou jejich optické vlastnosti charakterizovány pomocí rozlišení termokamery (počet prvků v maticovém detektoru), zorným polem termokamery (FOV, plochou, kterou lze pomocí termokamery vidět) a okamžitým zorným polem termokamery (IFOV, velikost jednoho pixelu při dané vzdálenosti).

Kalibrace infračervených teploměrů a termokamer probíhá prostřednictvím tzv. černých těles, která se svými vlastnostmi blíží ideálnímu černému tělesu ( $\epsilon \rightarrow 1$ ). Kalibrační černá tělesa generují tepelné záření pro zvolenou teplotu. Podle geometrie rozlišujeme kalibrační tělesa dutinová (kavitová) a desková. Výhodou dutinových kalibračních těles je, že poskytují vyšší hodnoty emisivity než desková tělesa. Jejich nevýhodou však může být poněkud malý vstupní otvor, jehož průměr (typicky jednotky cm) může být mnohdy menší než doporučený průměr měřené oblasti příslušného teploměru. Takové teploměry se většinou kalibrují pomocí deskových černých těles, které mohou dosahovat průměru např. 150 cm.



**Obr. č. 9:** Příklady komerčně dostupných kalibračních těles jsou uvedeny na následujícím obrázku.

## 5 Měřidla a pomocná měřicí zařízení

Při praktickém měření teploty je potřebné mít k dispozici vhodný teploměr, nejlépe s nastavitelnou emisivitou a vhodnou optikou. Měřené hodnoty je možné odečítat přímo z displeje, zaznamenávat je přímo do počítače, případně vyčítat hodnotu jako jinou měřenou veličinu (napětí, proud) pomocí multimetru. Dále by měla být monitorovaná teplota a relativní vlhkost vzduchu v okolí, jelikož i ty mohou mít vliv na výslednou měřenou hodnotu.

Teploměry je nezbytné udržovat v čistotě, tento požadavek je zcela zásadní u optiky přístrojů. Aby na detektor dopadalo co nejvíce signálu, je potřeba odstranit z optické cesty (prostor mezi měřeným objektem a měřidlem) všechny překážky. Ty představují i nečistoty, které mohou časem ulpívat na optice přístroje. Při výběru těchto prostředků je

důležité dbát na to, aby nedocházelo k chemické reakci s ochrannou vrstvou, kterou může být optika pokryta, případně aby se zabránilo vzniku škrábanců.

Dále je při měření pomocí bezkontaktních měřidel teploty je důležité znát vzdálenost, ze které měření probíhá, protože velikost měřicího bodu je závislá právě na vzdálenosti. Měřicí vzdálenost je potřeba upravit tak, aby velikost měřicího bodu zabírala maximálně jednu polovinu z celkové měřené plochy.

Vhodné je také mít k dispozici stojánek nebo jiné prostředky pro uchycení teploměrů abychom zabránili měření z ruky.

Všechna použitá měřidla a pomocná měřicí zařízení musí být navázána na etalon vhodného rozsahu a přesnosti a musí mít platnou kalibraci.

## 6 Obecné podmínky měření – veličiny ovlivňující výsledky měření

V této části se detailněji podíváme na veličiny, které nemusí být široké veřejnosti dostatečně známé a srozumitelné, ale mají zcela zásadní vliv na výsledek měření.

### 6.1 Vliv vlnové délky a emisivity

Vliv těchto dvou veličin spolu v praxi úzce souvisí, a proto se jimi budeme zabývat dohromady.

Emisivita je bezrozměrná veličina popisující schopnost vyzařování objektu. Je závislá na materiálu a jeho opracování, geometrii měřeného objektu a také na jeho teplotě. Emisivita je u plochých objektů také výrazněji závislá na vlnové délce měření než emisivita dutinových objektů.

Příklad popisující vliv vlnové délky na výsledek měření zobrazuje následující tabulka. Prezentovány jsou výsledky měření, kdy deskové ( $\varepsilon = 0,95$ ) a dutinové ( $\varepsilon$  blízká 1) černé těleso byly změřeny několika teploměry pracujícími při různých vlnových délkách. Z výsledků je vidět, že chyba, které se můžeme dopustit v případě, že pro měření plošných objektů použijeme teploměr pracující na nevhodné vlnové délce, se pohybuje v řádu jednotek °C. V případě, že měření provádíme v dutinových objektech, závislost měřené hodnoty na vlnové délce výrazně klesá. To však neznamená, že bychom ji mohli zanedbat.

<i>Plošný objekt</i>			
Teplota etalonu, °C	(8 až 14) μm	3,9 μm	
200,0	199,8 °C		200,9 °C
300,0	299,9 °C		302,1 °C
<i>Dutinový objekt</i>			
Teplota etalonu, °C	(8 až 14) μm	3,9 μm	1,569 μm
300,0 °C	299,0 °C	299,5 °C	299,5 °C

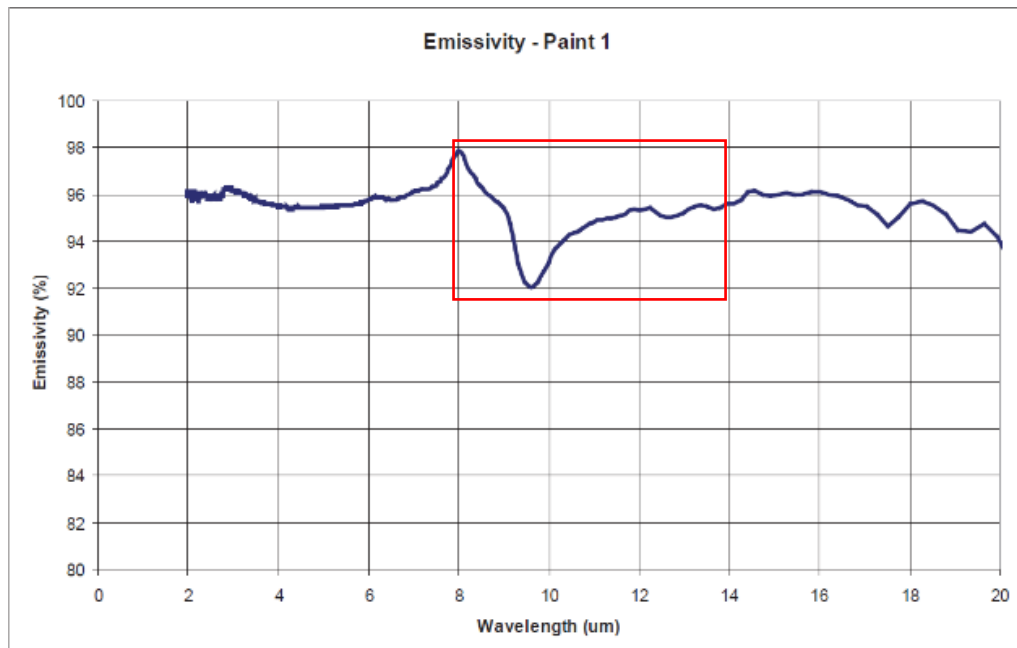
**Tab. č. 1:** Vliv vlnové délky na výsledek měření

Pro korektnost měření je nezbytné znát spektrální charakteristiku detektoru a optiky IČ teploměru. Z té je možné stanovit, s jakou efektivní vlnovou délkou teploměr pracuje. Důležitost této znalosti si vysvětlíme na následujícím obrázku. Ten znázorňuje závislost emisivity jedné z vysokoemisivních barev, používaných pro nátěry objektů. Za povšimnutí stojí oblast zvýrazněná obdélníkem. Jedná se o vymezení pásma vlnových délek (8 až 14) μm, tj. pásma, ve kterém pracují nejběžnější ruční IČ teploměry.

Zde je možné pozorovat, že v této oblasti se emisivita pohybuje v rozmezí (0,92 až 0,98), přičemž výrobce udává, že emisivita černého tělesa je pro toto pásmo vlnových délek 0,95. Z obr. 1 je patrné, že se jedná o průměrnou hodnotu emisivity v této oblasti. Proto může docházet k rozdílným výsledkům měření s různými typy teploměrů, i když výrobci deklarují, že všechny pracují ve stejném pásmu vlnových délek. Důvodem je, že každý z těchto teploměrů pracuje s jinou vlnovou délkou, nazývanou efektivní. Podle té bychom pak měli emisivitu měření upravit na základě znalosti závislosti emisivity na vlnové délce pro každý měřený objekt. Zde se však objevují dva problémy. První je, že u běžných ručních IČ teploměrů je efektivní vlnová délka neznámá a získat tuto informaci od výrobce je téměř nemožné. Druhou komplikací je, že pro každý povrch či nátěr na měřeném objektu bychom potřebovali znát závislost emisivity na konkrétní vlnové délce a tyto informace také nejsou ve většině případů známe. Proto je důležité tento vliv nepodceňovat a nezanedbávat při výpočtu nejistot. V praxi se většinou emisivita měřeného objektu stanovuje na základě informací od výrobce, případně podle různých tabulek. Bývá také využíván postup, kdy je teplota objektu změřena pomocí kontaktní sondy a na bezdotykovém teploměru je měněna hodnota emisivity do té doby, než dostaneme shodné údaje teploty na obou měřidlech. Při tomto způsobu stanovení emisivity je však nutné si uvědomit, že takto stanovená hodnota je pouze orientační, jelikož nejistota stanovení teploty kontaktní sondou se může pohybovat v řádu až několika stupňů.

Pomůckou při stanovení hodnoty složky nejistoty spojené s emisivitou může být jednoduchý test. Na teploměru je nastavená emisivita, shodná nebo blízká s emisivitou objektu. Provedu měření a následně na teploměru změním emisivitu o nejmenší možný dílek. V případě, že provádím měření při emisivitě rovné 0,950, pro odhad této složky si na teploměru nastavím emisivitu 0,951 nebo 0,949, umožňuje-li měřidlo nastavení emisivity na tři desetinná místa. Umožňuje-li měřidlo nastavení hodnoty pouze na dvě desetinná

místa, je pro účely tohoto testu na něm nastavená emisivita na hodnotu 0,94 nebo 0,96. Rozdíl v měřených hodnotách při správné a změněné emisivitě je následně použit jako příspěvek nejistoty do celkového výpočtu.



**Obr. č. 7:** Závislost emisivity černého tělesa Fluke 4181/4180 na vlnové délce měření [L15]

## 6.2 Vliv prostředí, přes které probíhá měření

Velmi často probíhají průmyslová měření v situacích, kdy se mezi měřeným objektem a teploměrem nachází překážka, ať už z bezpečnostních důvodů v podobě transparentního okna nebo z důvodu probíhajících procesů v podobě přítomností různých par.

Tyto překážky tlumí radiační záření vysílané měřeným objektem, na detektor tak nedopadá v plné míře a měřená hodnota je zkreslená. Proto by si uživatelé měli zjistit, jaký vliv má prostředí na výsledek měření při měřených teplotách, zavést potřebné korekce a zohlednit je pak při stanovení výpočtu nejistoty měření.

## 6.3 Odražená okolní teplota

Určitá část měřené hodnoty je ovlivněna radiací okolí (světlo zářivek, odražená záření, tepelné zdroje, atd.). Záření těchto parazitních zdrojů může vstupovat do dutinových objektů nebo dopadá na plochu deskového černého tělesa a vrací se zpět po (několikanásobném) odrazu. Nejvyšších hodnot dosahuje tato složka při nízkých teplotách (měřená teplota je nižší, než teplota okolí) pomocí měřidla pracujícího v oblasti vlnových délek (7 až 15)  $\mu\text{m}$ .

## 6.4 SSE (size-of-source efekt)

Při bezkontaktním způsobu měření teploty hraje zásadní roli vzdálenost, z jaké provádíme

měření, a geometrie/velikost objektu, který je měřen. To je velmi úzce spojeno s konstrukcí bezdotykového teploměru, zejména jeho optiky. Bohužel, není dost dobře možné od sebe oddělit všechny faktory vstupující do této chyby, proto je nutné na tuto složku nahlížet jako na kombinaci způsobenou vzdáleností měření, velikostí objektu, který je měřen, a také jeho geometrií a teplotní homogenitou.

Výrobci optické chování teploměru většinou popisují pomocí tzv. parametru D:S (*distance to spot ratio*), který udává vztah mezi měřicí vzdáleností a velikostí měřicího bodu. Např. parametr 50:1 znamená, že ze vzdálenosti 50 cm bude mít měřicí bod průměr 1 cm. Tato charakteristika bývá velmi často platná pouze v úzkém pásmu vzdáleností a při jiných se tento údaj může značně lišit.

Na objektech s různou geometrií může teploměr vykazovat jiné chování, co se týče vlivu vzdálenosti. Pro ilustraci je uveden výsledek měření pomocí IČ teploměru (75:1). Při teplotě 500 °C byla provedena měření s teploměrem pomocí tří černých těles s různou geometrií:

- válcová dutina s průměrem 50 mm a hloubkou 370 mm,
- sférická dutina s průměrem vstupního otvoru 50 mm, průměr sférické části 260 mm a celková hloubka dutiny 360 mm,
- deskové černé těleso s průměrem 156 mm.

Popsaná měření byla prováděna při využití celého průměru plochy/vstupních otvorů černých těles. V tabulce jsou uvedeny hodnoty rozdílů naměřených hodnot při změně vzdálenosti. Jako referenční je brána hodnota změřená z nejkratší možné vzdálenosti.

Vzdálenost měření, mm	Naměřené hodnoty rozdílů, °C		
	Válcová dutina	Sférická dutina	Deskové černé těleso
200	-	-	0,0
300	-	-	-0,6
400	0,0	0,0	-1,2
500	-1,9	-2,5	-1,7
600	-3,6	-4,2	-2,4
700	-4,9	-5,6	-3,3
800	-5,9	-6,7	-

**Tab. č. 2:** Vliv vzdálenosti na výsledek měření teploty objektů s různou geometrií při 500 °C

Z tabulky je vidět, že výsledná měřená hodnota je značně závislá jak na typu objektu, na kterém je měření prováděno, tak na vzdálenosti měření. Už relativně malý posun o 10 cm vnáší do měření chybu o velikosti cca 1 °C. Při měřeních je proto nutné o tomto vlivu vědět a započítat ho v plné míře do výsledné nejistoty kalibrace.



### 6.5 Drift

Složka je stanovována na základě kalibrační historie měřidla, tj. z kalibračních listů. Vyjadřuje hodnotu, popisující změnu měřených hodnot v průběhu kalibračního cyklu. Porovnání hodnot se provádí pro jednotlivé teplotní body v celém rozsahu měřidla. Kalibrační cyklus si stanovuje uživatel měřidla na základě jeho chování, na základě zkušeností by u bezdotykových teploměrů neměl překročit lhůtu dvou let. Výjimku tvoří nová měřidla, u kterých je nutné tuto složku stanovit odhadem.

### 6.6 Interpolace

Teploměr je kalibrován v několika vybraných teplotních bodech, to však neznamená, že není používán v celém rozsahu kalibrace. Naměřená data z kalibrace je možné proložit křivkou a určit rovnici popisující obecné chování zařízení v celém pracovním rozsahu. Křivka prokládající kalibrační body nemusí těmito body přecházet úplně přesně. Není také jisté, že se mezilehlé body budou opravdu chovat podle spočítané křivky a proto je nutno tyto skutečnosti vzít do úvahy jako chybu interpolace.

### 6.7 Rozptyl měřených hodnot při měření

Neopomenutelnou složkou při výpočtu nejistoty kalibrace je rozptyl měřených hodnot. Mezi jednotlivými odečty je vhodné kalibrované měřidlo odstínit od měřeného objektu, aby zbytečně nedocházelo vlivem sálání k zahřívání měřidla.

## 7 Metrologické meze využití metody měření

Při měření teploty pomocí bezdotykových teploměrů je nutné si uvědomit, že výsledná nejistota měření se bude pohybovat v řádech jednotek stupňů Celsia, což může být pro některé aplikace nevhodné. Je nutné pečlivě stanovit příspěvek všech ovlivňujících veličin, aby bylo možné výsledek měření správně vyhodnotit a reprodukovat.

## 8 Kontrola měřidla před použitím a příprava na měření

Před měřením je nutné kontrolovat čistotu činných částí teploměru (zejména optiky), stav baterie měřidla, zajistit temperování teploměru na teplotu okolí v místě měření. Teploměr nesmí být mechanicky poškozený, měla by být zachována funkčnost všech potřebných ovládacích prvků, např. tlačítek pro nastavení emisivity. Čištění teploměru je popsáno v následující kapitole postupu. Doporučeno je také v pravidelných intervalech provádět vlastní kontrolní měření. Měřidlo, které vykazuje takové nedostatky, které by mohly ovlivnit výsledek měření nad rámec celkové nejistoty, by nemělo být dále používáno k měření.

## 9 Postup měření

Každý bezdotykový teploměr by měl být opatřen návodem k obsluze a pokyny v něm uvedené by měla obsluha respektovat. Pro všechny typy IRT platí řada zásad správného měření, které lze shrnout následovně:

- minimálně 30 minut před zahájením měření by se měl teploměr nacházet v místnosti s konstantní teplotou, při které bude probíhat měření (temperace teploměru 15 až 30 minut při rozdílné teplotě prostředí je nezbytná),
- po výměně baterie vyčkejte nejméně 10 minut, než začnete měřit,
- nepoužívejte teploměr v prostředí mimo meze specifikované výrobcem,
- respektujte vždy rozsah pracovních resp. skladovacích teplot dle návodu výrobce,
- chraňte přístroj před extrémními teplotami, nárazy a pády, silným slunečním zářením, přímým kontaktem s vodou případné agresivními látkami,
- před měřením zkontrolujte stav optiky, případně ji vyčistěte,
- použití teploměru v nepřiměřených podmínkách (ventilace vzduchu, prach, parazitní tepelné zdroje či zdroje záření) může vést k chybnému měření,
- při měření by mělo proběhnout vždy několik odečtů. Je-li to technicky možné, teploměr by měl být mezi jednotlivými odečty odstíněn od měřeného objektu, případně být zaměřen na místo měření pouze po nejnutnější možnou dobu,
- pro měření je nutné vybrat správný typ teploměru. Při jeho výběru bychom se měli řídit následujícími body:
  - 1.) K čemu teploměr potřebuji?
    - a. přesné nebo orientační měření?
    - b. kontinuální nebo občasné měření?
    - c. výsledná nejistota měření?
  - 2.) Jaké budu měřit teploty?
  - 3.) Jaké materiály a povrchy budu měřit? ( $\epsilon$ )
  - 4.) Jak velký objekt budu měřit a z jaké vzdálenosti?
  - 5.) Je pro mě vhodný záznam měřených dat přímo do počítače?

## 10 Stanovení nejistoty měření - příklad

V následujícím příkladu si vyhodnotíme nejistotu měření teploty pomocí bezdotykového teploměru na hodnotě 500 °C (tab. č. 3). Rozlišení kalibrovaného teploměru je 0,1 °C, optika teploměru je charakterizována pomocí parametru D:S = 75:1. Nejistota kalibrace teploměru v kalibrační laboratoři byla 2,2 °C ( $k = 2$ ). Složky vstupující do výpočtu nejistoty měření tedy jsou:

- teploměr je kalibrován jednou ročně, nejistota kalibrace při 500 °C je 2,2 °C,
- na základě pravidelných kalibrací bylo zjištěno, že v průběhu roku dochází k posunu měřených hodnot při 500 °C o 0,3 °C,
- kalibrované měřidlo má rozlišení 0,1 °C, do nejistoty tedy vstupuje polovina z této hodnoty,
- teploměr pracuje v pásmu vlnových délek (8 až 14)  $\mu\text{m}$ , měříme rovinou plochu s matným povrchem s emisivitou cca 0,95. Velikost vlivu vlnové délky a emisivity byla odhadnuta na základě provedených měření a dokumentu [L6],

- měřený byl matný povrch a na základě informací v dokumentu [L6] byl vliv odražené teploty okolí stanoven na hodnotu 0,2 °C,
- měření proběhli v hale, kde se teplota okolí blížila 30 °C. Bylo odhadnuto, že tato teplota může mít vliv na měřený údaj, proto je do nejistoty počítáno s hodnotou 0,5 °C,
- při měření bylo pozorováno kolísání měřených hodnot v intervalu 0,3 °C, hodnota je stanovena jako rozdíl maximální a minimální hodnoty z 10 odečtů,
- měření standardně probíhá při vzdálenosti 30 cm. Při zvýšení měřicí vzdálenosti o 10 cm tvoří rozdíl v měřených hodnotách 0,3 °C,
- teploměr byl kalibrován při 500 °C, proto složka interpolace v tomto případě nízká uvažujeme hodnotu 0,05 °C.

Zdroj nejistoty	$Z_{\max}$	rozdělení	$k$	$u_y$
Kalibrace teploměru	2,2 °C	normální	2,000	1,1 °C
Drift měřidla	0,3 °C	rovnoměrné	1,732	0,173 °C
Rozlišení měřidla	0,05 °C	rovnoměrné	1,732	0,029 °C
Vliv vlnové délky a emisivity	0,5 °C	rovnoměrné	1,732	0,289 °C
Odražená okolní teplota	0,2 °C	normální	1,000	0,2 °C
Vliv prostředí	0,5 °C	normální	1,000	0,5 °C
Rozptyl měřených hodnot	0,3 °C	rovnoměrné	1,732	0,173 °C
Chyba interpolace	0,03 °C	rovnoměrné	1,732	0,017 °C
SSE	0,3 °C	rovnoměrné	1,732	0,173 °C
<b>Standardní kombinovaná nejistota</b>		<b>1,3</b>		
°C				
Koeficient rozšíření		2		
<b>Rozšířená standardní nejistota</b>		<b>2,6</b>		
°C				

Tab. č. 3: Složky standardní nejistoty vzorového příkladu při měření teploty 500 °C

## 11 Záznamy o měření

Formální podoba záznamu o měření by se měla řídit předpisy dané organizace. Z pohledu všeobecných zásad tvorby formulářů by měl záznam obsahovat vždy alespoň:

- identifikaci pracoviště provádějícího měření,
- pořadové číslo záznamu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- informace o použitém měřidle,

- d) hodnoty veličin ovlivňujících měření (teplota a vlhkost okolí, emisivita, vzdálenost),
- e) datum měření, (případně i čas),
- f) označení použité metodiky měření nebo její popis
- g) informace o měřidlech použitých při měření ovlivňujících veličin,
- h) vyjádření o návaznosti výsledků měření,
- i) výsledky měření a s nimi spjatou rozšířenou nejistotu měření,
- j) jméno pracovníka, provádějícího měření, jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, razítko pracoviště.

## 12 Péče o metodický postup

Originál metodického postupu je uložen u jeho zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku zpracovatele. Změny, popř. revize metodického postupu provádí jeho zpracovatel. Změny schvaluje vedoucí zpracovatele nebo metrolog organizace.

## 13 Rozdělovník, úprava a schválení, revize

Uvedený příklad je pouze orientační a subjekt si může tuto dokumentaci upravit podle interních předpisů o řízení dokumentů.

### 13.1 Rozdělovník

Metodický postup		Převzal		
Výtisk číslo	Obdrží útvar	Jméno	Podpis	Datum

### 13.2 Úprava a schválení

Metodický postup	Jméno	Podpis	Datum
Upravil			
Úpravu schválil			

### 13.3 Revize

Strana	Popis změny	Zpracoval	Schválil	Datum

#### Upozornění

Tento metodický postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby jej organizace přizpůsobila svým požadavkům s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky.

Neprodejné