

# Hőképfelvételek készítése szakmai szemmel -1-

Szerző: Rahne Eric, okl. villamosmérnök  
Copyright © PIM Professzionális Ipari Méréstechnika Kft.

A hőképfelvételek készítése, azaz a termográfia vagy - szakmailag kevésbé helyesen - a termovízió rendkívül sokoldalú mérési eljárás, amely csupán az igen költséges hőkamerák miatt nem terjedhetett el még gyorsabban a gyakorlatban.

A modern hőkamerák kezelése összehasonlítható az elterjedt digitális kamerákéval. De ne higgye senki, hogy amilyen egyszerű magának a hőkamerának a kezelése, ugyanolyan egyszerű korrekt (mérési szempontból helyes) hőképfelvételeket készíteni. Sok-sok szakmai (elméleti) tudás, tapasztalat és ezen túl megfelelő mérés-előkészítés szükséges ahhoz, hogy a felvételek ne csak szép színes képek, hanem kiértékelhető hőképek legyenek.

Szomorú tapasztalat, hogy a hőkamerák forgalmazói és a hőképfelvételek készítői nemritkán súlyos szakmai hibákat vétének a hőképek előállításával összefüggésben. A következőkben a termográfia elméleti hátterét és gyakorlati vonatkozásait igyekszünk bemutatni, hogy a felvételek készítői és a kiértékeléseket felhasználók egyaránt jobban kihasználhassák a hőképek által elvileg nyújtott előnyöket. Kezdjük a fizikai alapelvekkel!

## Az infravörös hőmérsékletmérés alapja

Az infravörös sugárzáson alapuló hőmérsékletmérés, vagyis a termográfia és távhőmérés (érintésmentes hőmérsékletmérés, amelyet az alkalmazott lézeres célzómegvilágítás miatt gyakran tévesen lézeres hőmérésnek neveznek) azt a fizikai jelenséget használja fel, hogy az abszolút nulla K hőmérséklet (-273,15 °C) felett a testek elektromágneses hullámokat bocsátanak ki, így például rádióhullámokat, fényt, illetve hő(sugárzás)t. Az infravörös sugárzás az elektromágneses spektrum egy része, a látható vörös fény hosszuhullámú oldalán található, nagyjából a 760 nm és az 1 mm hullámhossztartományban. A hőmérsékletmérés szempontjából a 20 µm-ig terjedő tartománynak van jelentősége, amely további három résztartományra tagolható: a 0,8-2 µm az ultrarövid-, a 2-6 µm a rövid-, a 6-20 µm pedig a hosszuhullámú infravörös sugárzás tartománya.

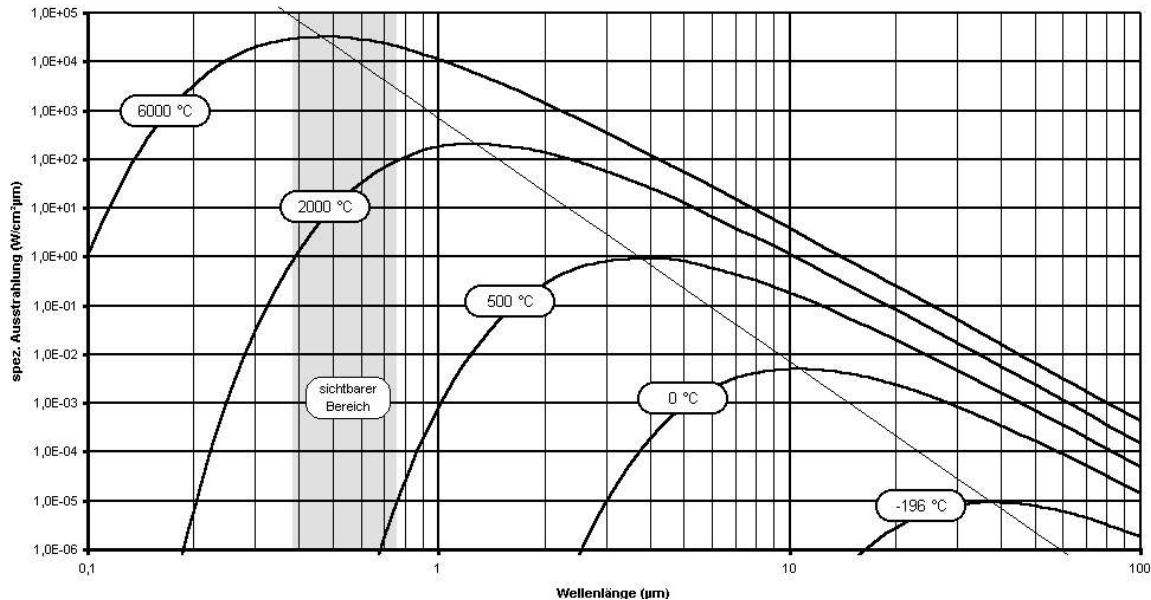
Hullámhossz	Hullámtartomány
1000 km	Hangfrekvenciák
100 km	
10 km	
1 km	Rádiófrekvenciák
100 m	
10 m	
1 m	
10 cm	
1 cm	Mikrohullámok
1 mm	
100 µm	
10 µm	<b>Infravörös sugárzás</b>
1 µm	
100 nm	Látható fény
10 nm	Ultraibolya sugárzás
1 nm	Röntgen sugárzás
0,1 nm	
0,01 nm	
0,001 nm	
0,000 1 nm	
0,000 01 nm	Gamma sugárzás

Az hullámhosszak „spektruma”

A hőmérsékletmérés technikai szempontjából a 20 µm-ig terjedő tartománynak van jelentősége. Ez a következő részekre tagolható:

Hullámhossz	Infravörös résztartomány
0,8 µm ... 2 µm	ultrarövidhullámú infravörös
2 µm ... 6 µm	rövidhullámú infravörös
6 µm ... 20 µm	hosszuhullámú infravörös

A hőmérséklet mérése a mérendő test által kibocsátott elektromágneses hullámok (infravörös sugárzás) alapján történik. Ahhoz, hogy a hőmérsékletre következtetni lehessen, a testhőmérséklet és a leadott sugárzás közötti összefüggést kell szemügyre venni. Ezt az összefüggést elsősorban az ideális sugárzó (fekete test) által kibocsátott sugárzás spektrális eloszlását leíró Planck-féle sugárzási törvény (lenti ábra), valamint az alacsonyabb hőmérsékletű testek sugárzási maximumának a hosszuhullámú tartomány irányába való eltolódását leíró Wien-féle eltolódási törvény adja meg.



A PLANCK féle sugárzási törvény [forrás: Infratec]

Sugárzó test	Hőmérséklet	Sugárzási maximum
Mélyhőtött élelem	-18 °C	11.4 μm
Bőr	32 °C	9.5 μm
Forrásban lévő víz	100 °C	7.8 μm
Sötétvörösén izzó vas	600 °C	3.3 μm
Fehéren izzó vas	1,200 °C	2.0 μm

A WIEN féle eltolódási törvény „hatása”: a sugárzási maximum hőmérsékletfüggése

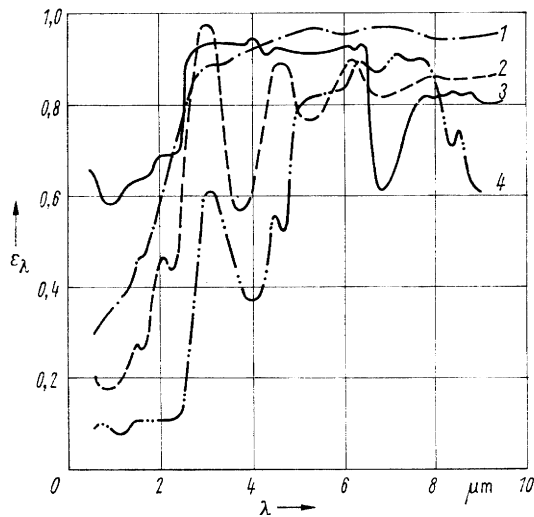
## A mérendő objektumok tulajdonságai

Az úgynevezett fekete test az ideális fizikai sugárzó modellje, amely nélkülözhetetlen a termográfiai alapelvek tanulmányozásánál. A gyakorlatban mért tárgyak viszont többé-kevésbé eltérnek ettől a modelltől, ezért fontos, hogy számoljunk e különbségek hatásával a mérésnél. Az eltérések figyelembe vételére az emissziós tényező ( $\epsilon$ ) szolgál, amely egy test infravörössugár-kibocsátási képességét írja le. Az ideális sugárzó - a fekete test - emissziós tényezőjének értéke 1, vagyis 100 százalékosan kibocsátja azt a hősugárzást, ami a hőmérséklete alapján a Planck-féle sugárzási törvény szerint várható.

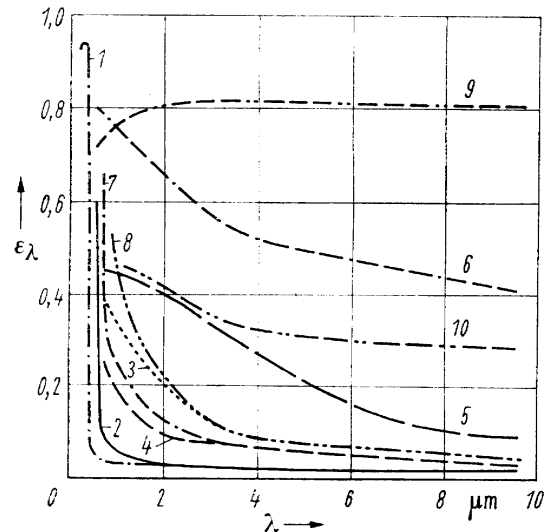
A valódi testek sugárzási képessége elmarad a feketetest-modelltől (tehát  $\epsilon < 1$ ), és emissziós tényezőjük többé-kevésbé függhet a hullámhossztól és a hőmérséklettől is. Bizonyos paraméterek (anyagösszetétel, beesési szög, a felület bevonata, érdessége, illetve a polarizáció mértéke) szintén befolyásolhatják a kibocsátott hősugárzás összetételét és mennyiségét, valamint ezáltal a sugárzás alapján végzett hőmérsékletmérés eredményét.

A hosszuhullámú tartományban számos nemfém anyagot nagy értékű, viszonylag széles hőmérséklettartományban állandó, a felület megmunkálástól független emissziós tényező jellemez. Jó példa erre az emberi bőrfelület és sok ásványi szerkezet, továbbá műanyagalapú festékanyag. A fémek emissziós tényezője rendszerint kicsi, ráadásul nagymértékben függ a felületi jellemzőktől, és csökken a hullámhossz növekedésével (csökkenő hőmérséklettel).

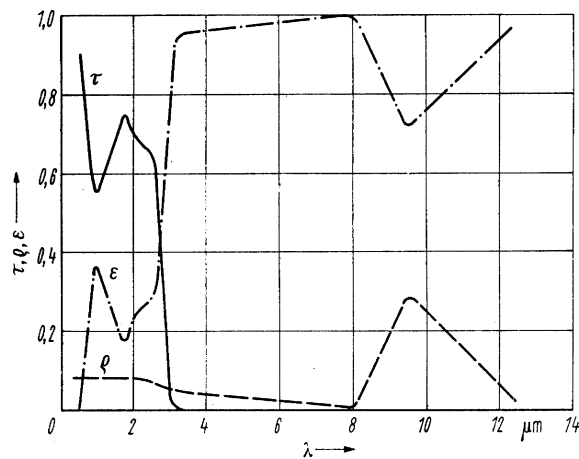
Viszonylag gyakran előforduló mérendő anyag az üveg. Mivel nem engedi át az infravörös sugárzást sem a rövid-, sem a hosszúhullámú tartományban, így az ablaküvegen keresztüli mérés nem lehetséges. Míg az üveg majdnem ideális sugárzó a rövidhullámú tartományban, a hosszúhullámú tartományban emissziós tényezője csak mintegy 85 százalékos.



Nemfémek emissziós tényezőjének spektrális függése (1 zománc, 2 gipsz, 3 beton, samot) [forrás: Infratec]



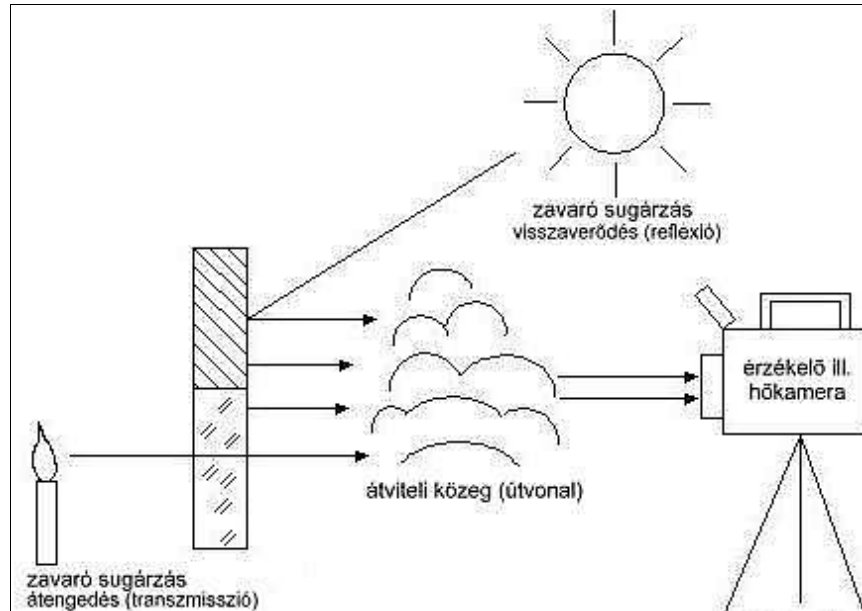
Fémek (1 ezüst, 2 arany, 3 platina, 4 ródium, 5 króm, 7 tantál, 8 molibdén) és más tiszta 4 anyagok (6 grafit, 9 szelén, 10 antimon) emissziós tényezőjének spektrális függése



Üveg emissziós, transzmissziós és reflexiós tényezőjének spektrális függése [forrás: Infratec]

## Termográfiai mérési elrendezés

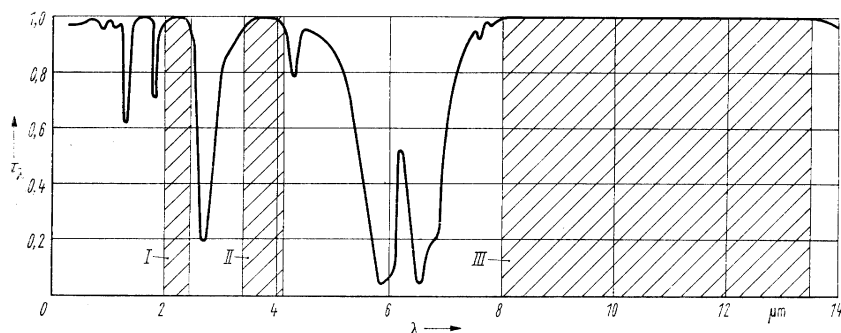
A távhőmérséknél és a kvantitatív termográfianál figyelembe kell venni e hőmérsékletmérési eljárásnak a fizikai alapokból adódó sajátosságait: egyrészt optikai mérési módszerről van szó, tehát a mérési objektumnak láthatónak kell lennie a mérőkészülék felől; másrészt a mérési elrendezés két kulcseleme mellett döntő szerepet játszik a mérésnél a mérési útszakasz jellemző állapota, valamint a sugárforrás (ok) esetleges jelenléte az elő-, illetve a háttérben.



Infravörös távhőmérési ill. termográfiai méréselrendezés [forrás: PIM]

### Az átviteli szakasz hatása a mérési eredményre

Mivel az infravörös termográfia érintkezés nélküli módszer, tehát a mérés alapját képező infravörös sugárzásnak valamilyen közegen keresztül kell áthaladnia a mérendő tárgytól a mérőberendezésig, a közeg infravörös-tartományú viselkedése (karakterisztikája) természetesen befolyásolja a mérést. A legtöbb esetben a közeg levegő, de más - az infravörös hullámokat átengedő - anyagok (például különleges mérőablakok) is előfordulnak. A levegő esetében az infravörös sugárzás átvitelére hatással van a benne levő vízpára és a szén-dioxid.



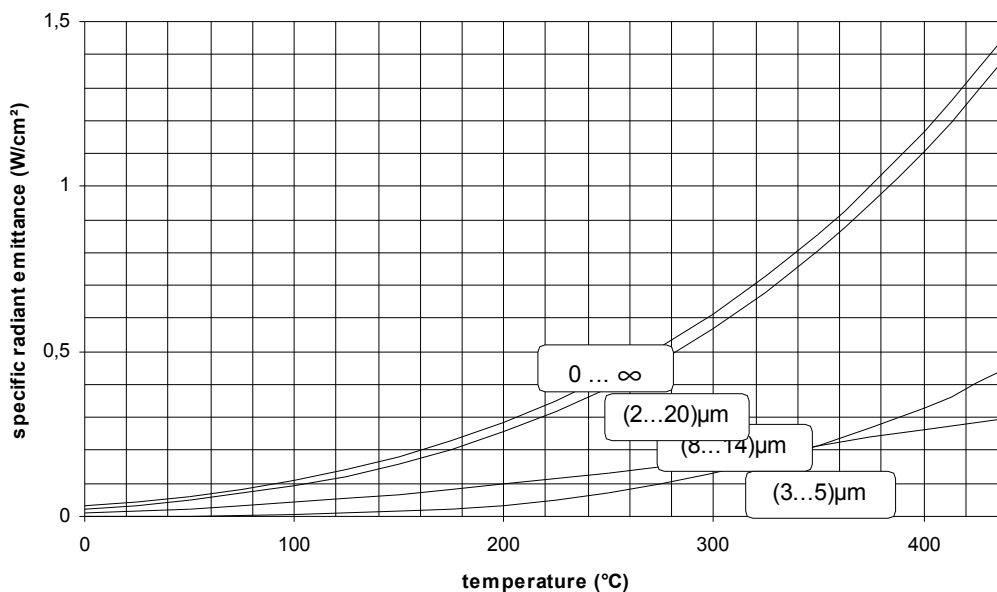
A levegő spektrális átviteli tényezője 10 m, 25 °C, 1013 mbar és 85% relatív nedvességtartalom mellett [forrás: Infratec]

A fenti ábrán látható, hogy a levegő átviteli tulajdonsága nagymértékben függ a hullámhossztól. A nagy átviteli veszteséggel jellemzett tartományok szomszédságában jó átviteli képességű (sátirozott) tartományok is megfigyelhetők. Az utóbbiakat atmoszférikus ablaknak is szokás nevezni. Amíg az átviteli tényező a 8...14  $\mu\text{m}$  tartományban - a hosszuhullámú atmoszférikus ablakban - szinte tökéletes átvitelt biztosít akár nagy távolságokra is, a 3...5  $\mu\text{m}$  tartományban - a rövidhullámú atmoszférikus ablakban - az atmoszféra mérhető veszteségeket okoz már néhányszor tíz méteres távolságok esetén is.

## A mérőeszköz és hatása a mérési eredményre

Mivel az érintés nélküli hőmérsékletmérés esetén levegő a leggyakoribb átviteli közeg, természetesen csak az általa biztosított atmoszférikus ablakok hullámhossz-tartományaiban érdemes és szabad méréseket végezni. (Egyébként nemlineáris hőmérsékletfüggést vagy teljesen kiértékelhetetlen adatokat kapnánk.) A mérésekhez a levegő átviteli tulajdonságainál említett 8...14  $\mu\text{m}$  hullámhossz-tartományra érzékeny - a hosszuhullámú atmoszférikus ablak kihasználásával működő -, valamint a 3...5  $\mu\text{m}$  hullámhossz érzékelésére képes - a rövidhullámú atmoszférikus ablakban mérő - hőkamerák készülnek. Elnevezésük ennek függvényében hosszuhullámú vagy rövidhullámú hőkamera. Ritkábban előfordulnak az ultrarövidhullámú tartományban mérő hőkamerák is.

Az érintés nélküli hőmérsékletmérés mérőeszközeinek spektrális méréstartománya rendszerint a tárgy által kibocsátott teljes sugárzásnak csak egy részét fedi le. Ennek a mérési eredményre gyakorolt hatását szemlélteti a következő diagram néhány tipikus (az atmoszférikus ablakoknak megfelelően alkalmazott) méréstartományra vonatkozóan.



Különböző spektrális méréstartományban rögzített sugárzás-hőmérséklet görbék [forrás: Infratec]

Könnyen felismerhető, hogy a rövidhullámú (3...5  $\mu\text{m}$ ) tartomány eléggé érzéketlen a viszonylag alacsony hőmérsékletekre, viszont (fekete test esetén) 350 °C felett a sugárzás érzékelhetősége a 3...5  $\mu\text{m}$  tartományban jobb, mint a hosszuhullámú (8...14  $\mu\text{m}$ ) tartományban. Ennek az az oka, hogy a sugárzás maximuma eltolódott a rövidhullámú tartományba.

## Elvi hibaforrások

A hőképfelvételek készítésének (termográfia) elméleti alapjaival foglalkozó korábbi írásunk folytatásában rátérünk a gyakorlati tudnivalókra. Ezek közül is elsőként az érintésmentes hőmérsékletmérés lehetséges hibaforrásait vesszük számba, majd bemutatjuk a mérési hibák mennyiségi értékelésének szempontjait, illetve a hibák csökkentésének lehetőségeit.

Az érintés nélküli hőmérsékletmérés mérési hibája több összetevőből adódik. Elsőként említhető ezek közül az alkalmazott mérőeszközből eredő mérési pontatlanság. Mint bármely mérőberendezés, az érintkezés nélküli hőmérsékletmérő eszköz (távhőmérő, hőkamera) is csak bizonyos mérési hibával képes ellátni a feladatát, ami a következőkre vezethető vissza:

- az eszköz mérőátalakítójának (érzékelőjének) egyedi kalibrálás utáni maradék hibája;
- a mérőberendezés kompenzálatlansága egyes hőmérséklet-ingadozások;
- a jeldigitalizálás kvantálási hibája, valamint a mért értékek kimeneti, illetve kijelzési hibája;
- az átalakító (érzékelő) paramétereinek öregedésből adódó driftje.

Gondolni kell továbbá arra, hogy sok egyéb olyan méréstechnikai hiba is jelentkezhet, amely nem fordul elő az érintéses hőmérsékletmérésnél. Az alábbiakban ezek közül néhány lehetséges - és külön figyelmet érdemlő - hibaokot részletezünk.

## **Az érintésmentes mérés problémái**

### **Az emissziós tényező és a környezeti hőmérséklet hatása a mérés pontosságára**

Valószínűleg ez a leggyakoribb és a hiba nagyságát tekintve a legjelentősebb hibaok az érintkezés nélküli hőmérséklet-mérési módszer gyakorlati alkalmazása során. Mint arról a korábbiakban már szó volt, a mérőberendezés csak akkor tudja helyesen meghatározni egy tárgy hőmérsékletét, ha a mérőműszeren (illetve a kiértékelőszoftveren) beállított emissziós tényező megfelel a mérendő tárgy valós jellemzőjének. Ha a mérendő tárgy nem ideális sugárzó (fekete) test  $\varepsilon=1,0$  emissziós tényezővel, akkor a környezeti hőmérsékletet is figyelembe kell venni a tárgyhőmérséklet meghatározása során. (A mérendő tárgynak a hőmérő eszköz felé eső felülete körüli tér átlagos hőmérsékletét vesszük környezeti hőmérsékletnek.)

### **Hősugárzás visszaverődése a tárgy homlokfelületéről (hősugárzás-reflexió)**

Minél jobban eltér egy test emissziós tényezője az ideális 1 értéktől (tehát minél kisebb emissziós képességű), annál inkább erősödik a reflexiós (sugárzás-visszaverődési) tulajdonsága. Ez azzal jár, hogy a mérőműszer a test hőmérsékletével arányosan kibocsátott hősugárzás mellett (a legrosszabb esetben akár helyett) a környezetből származó, a mérőtárgy felületén reflektált hősugárzást méri. Azonban ez a környezeti hőmérséklet figyelembevételével korrigálható, ha a környezet hőmérséklete homogén. Problematikusabbá válik a helyzet, ha a tárgy előtti térben nagyobb hőmérséklet-inhomogenitás vagy akár zavaró pontszerű hőforrás van jelen. Minél erősebb a mérendő tárgy reflektálóképessége, annál nehezebbé válik hőmérsékletének a korrekt meghatározása.

### **Jelvesztés az átviteli szakaszon (sugárzáscsökkenés az atmoszférában és más anyagokban)**

Az átviteli szakasz általában a közönséges légkör, amelyen az infravörös sugárzás spektrumának csupán egy része halad át (úgynevezett atmoszferikus ablakok). Hogy nagyobb távolságok esetén milyen veszteségek lépnek föl, azt az infravörös sugárzást elnyelő, illetve csillapító tényezők (például köd, aeroszolok, nagy koncentrációjú  $\text{CO}_2$ , CO, egyéb gázok vagy víz jelenléte) határozzák meg. Bizonyos határokon belül - a jelfeldolgozás során - mód van e hatások kompenzálására. Különösen gondoskodni kell a kompenzálásról, ha a mérés az infravörös sugarakat át bocsátó ablakon keresztül történik (például kemencék vagy vákuumkamrák belsejében lévő mérendő tárgyak mérésénél).

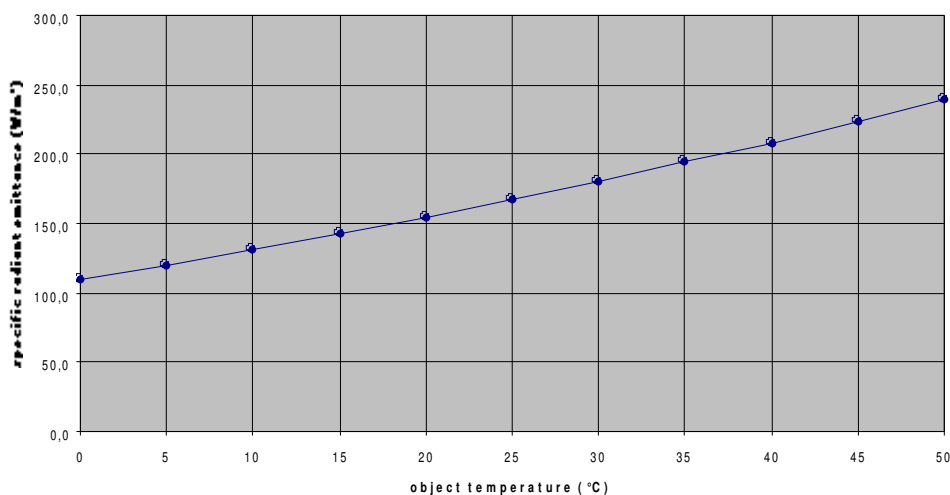
### **Hősugárzás átbocsátása a tárgy háttéréből**

Ez a hiba akkor jelentkezik, ha a tárgy részben áttetsző, természetesen az infravörös sugárzás szempontjából. Ilyen esetekben a tárgy háttérét éppúgy figyelembe kell venni, mint az előterét a hősugárzás visszaverődésénél. Ez különös gondot okozhat, akkor ha közvetlenül a mérendő tárgy mögött erős hősugárzók (például technológiailag szükséges melegítőberendezések) találhatók.

## A hibák mennyiségi számbavétele

### A mérőberendezés érzékenységi jelleggörbéje

A mérőberendezés jelleggörbéje (hosszúhullámú méréstartományú mérőeszköz esetén) a Planck-függvénynek a 8...14  $\mu\text{m}$ -es spektrumtartomány határaitra történő integrálásán alapul, mivel a berendezés úgyis csak a megfelelő atmoszférikus ablakon átengedett hősugárzást tudja érzékelni. E jelleggörbe természetesen nem tökéletesen lineáris, de az ebből adódó hiba a mérőeszközön belül matematikailag korrigálható.



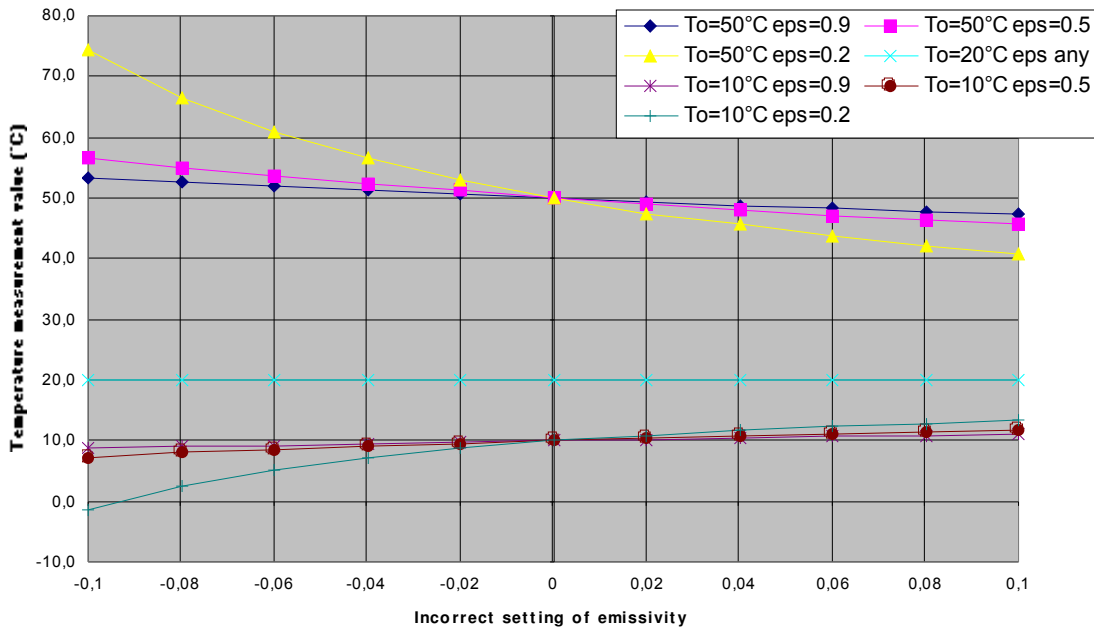
A fekete test hősugárzás-kibocsátása a 8...14  $\mu\text{m}$  tartományban [forrás: Infratec]

### Emissziós tényezőtől függő hőmérsékletmérési hiba

A teljes hőmérsékletmérési hiba nagyságát döntően meghatározó összetevőként az emissziós tényező valódi értékétől való eltérésekből adódó hiba kalkulálható. Az emissziós tényező hatását (20 °C környezeti hőmérsékleten) táblázatunk foglalja össze. Ugyancsak ezt szemlélteti a lenti ábra is. Látható, hogy a téves emissziós tényezőtől adódó mérési hiba annál nagyobb, minél jobban eltér a mérendő tárgy hőmérséklete a környezeti hőmérséklettől. Az is észrevehető, hogy az ilyen hiba igen nagy lehet, akár a mérőeszköz rendszeres belső hibájának többszörösét is elérheti.

Az eps valódi értékétől való eltérése (°C)	Mért hőmérséklet (C°)						
	To=50°C eps=0,9	To=50°C eps=0,5	To=50°C eps=0,2	To=20°C eps tetszőleges	To=10°C eps=0,9	To=10°C eps=0,5	To=10°C eps=0,2
-0.10	53.4	56.6	74.4	20.0	8.7	7.3	-1.3
-0.08	52.7	54.9	66.6	20.0	9.0	8.0	2.6
-0.06	51.9	53.6	61.0	20.0	9.2	8.5	5.3
-0.04	51.2	52.2	56.6	20.0	9.5	9.0	7.3
-0.02	50.7	51.2	52.9	20.0	9.7	9.5	8.7
0	50.0	50.0	50.0	20.0	10.0	10.0	10.0
+0.02	49.5	49.0	47.5	20.0	10.2	10.4	10.9
+0.04	48.8	48.0	45.6	20.0	10.4	10.7	11.7
+0.06	48.3	47.1	43.6	20.0	10.7	11.2	12.4
+0.08	47.8	46.3	42.2	20.0	10.9	11.4	12.9
+0.10	47.3	45.6	40.7	20.0	11.0	11.7	13.4

Hibás emissziós tényezőtől eredő hőmérsékletmérési hiba a 8...14  $\mu\text{m}$  méréstartományban



Téves emissziós tényezőtől eredő hőmérsékletmérési hiba a 8...14  $\mu\text{m}$  méréstartományban

## A mérési hibák csökkentésének lehetőségei

Míg a visszavert és az átbocsátott zavaró sugárzások következtében kialakuló hibák hatását - azok optikai megjelenése alapján (oda nem illő pontok, foltok vagy körök) - a hőkamerával készített (hő)képen rendszerint könnyű érzékelni és ezután javítani, távhőmérésnél ez nem olyan egyszerű, mivel a sugárzás eloszlása nem látható. Hogy a hőmérsékletméréskor a hibákat kiküszöböljük vagy legalább minimalizáljuk, célszerű a következő tanácsokat megfogadni a mérések kivitelezése során:

Mielőtt megkezdjük a mérést, bizonyosodjunk meg arról, hogy a hőmérő eszköz mérési irányába - különösen mobil méréseknel - nem esnek tükrözött hősugárzások. Ha ez mégis előfordul, hajtsuk végre a következő lépések legalább egyikét:

- Változtassuk meg a mérőberendezés elhelyezkedését és így a mérés szögét (mivel a tükröződés az optikai törvényszerűségek miatt szögfüggő)!
- Változtassuk meg a mérendő tárgy elhelyezését, illetve szögét (elsősorban laboratóriumi méréseknel)!
- Zárjuk ki a zavaró sugárzást olyan anyagokkal, amelyek nem engedik át az infravörös sugárzást (kartonlap, hungarocell, plexiüveg, fémlapok), vagy szélsőséges esetben teljesen burkoljuk körül az átviteli szakaszt és a mérendő tárgyat (csupán a mérőeszköz optikája részére hagyva egy nyílást)!

Fontos ügyelni arra is, hogy nemcsak a nyilvánvalóan zavaró sugárzók (ilyenek például az izzólámpák, a láng, a forró vagy hideg géprészek) zavarhatják a méréseket azzal, hogy a mérendő tárgyon visszaverődnek, hanem a mérést kivitelező ember is egy hőforrás, és így szintén tükröződhet a mért felületen.

- Ha a tárgy emissziós tényezője nyilvánvalóan különbözik a fekete testétől, a mérőberendezésen az emissziós tényezőt a valóságnak megfelelően, illetve a lehetőleg legkisebb eltéréssel kell beállítani. A beállítandó emissziós tényezőre vonatkozó információ különböző módokon nyerhető:
- Végezzünk kísérletet valós tárgyon vagy a hősugárzás szempontjából összehasonlítható karakterisztikájú referenciatárgyon !
- Használjuk fel a tapasztalat útján vagy a szakirodalomból szerzett, illetve a szállító által adott információt a speciális anyagok és felületek tipikus hőemissziós tulajdonságának meghatározásában!

Ha az emissziós tényező eltér 1-től, a mérési érték meghatározásában szerephez jut a környezeti hőmérséklet értéke is. Ebben az esetben meg kell bizonyosodni arról, hogy a mérőeszköz automatikus beállítási funkciói be vannak-e kapcsolva, illetve el kell végezni manuálisan ezeket a beállításokat.

- Ha a rövidhullámú mérési tartományban a mérési távolság meghaladja a 10 métert (ez rendszerint csak a hőképek felvételénél fordul elő), a sugárzás intenzitását csökkentő atmoszferikus átbocsátás hatását is figyelembe kell venni a korrekciónál. Ezen felül a mérési útvonal hőmérsékletét is a lehető legpontosabban kell beállítani (ha lehetséges, akkor ehhez a legtöbb hőkamerába beépített automatikus funkciót kell használni).

Nagyon fontos, hogy a hőmérséklet pontos meghatározásához a tárgyon található mérendő szerkezeti elem, illetve felület nem lehet kisebb a mérőpont méreténél (a hőérzékelő elem kivetített optikai képe a tárgyon). Ellenkező esetben az aktuális tárgy hőmérséklet a mért területnek csak egy részén jelenik meg, a többit a háttérsugárzás (valamint a mérendő tárgy környezete) tölti ki. A mérőponton belül pedig átlagolás történik, így a túl kicsi tárgyak valódi hőmérséklete soha nem határozható meg pontosan. Erre különösen az elterjedt "lézeres hőmérők" esetén kell odafigyelni. Hőkameráknál ez a mérőpont az infravörös hőkép egyes képpontjai kivetített felületének felel meg.