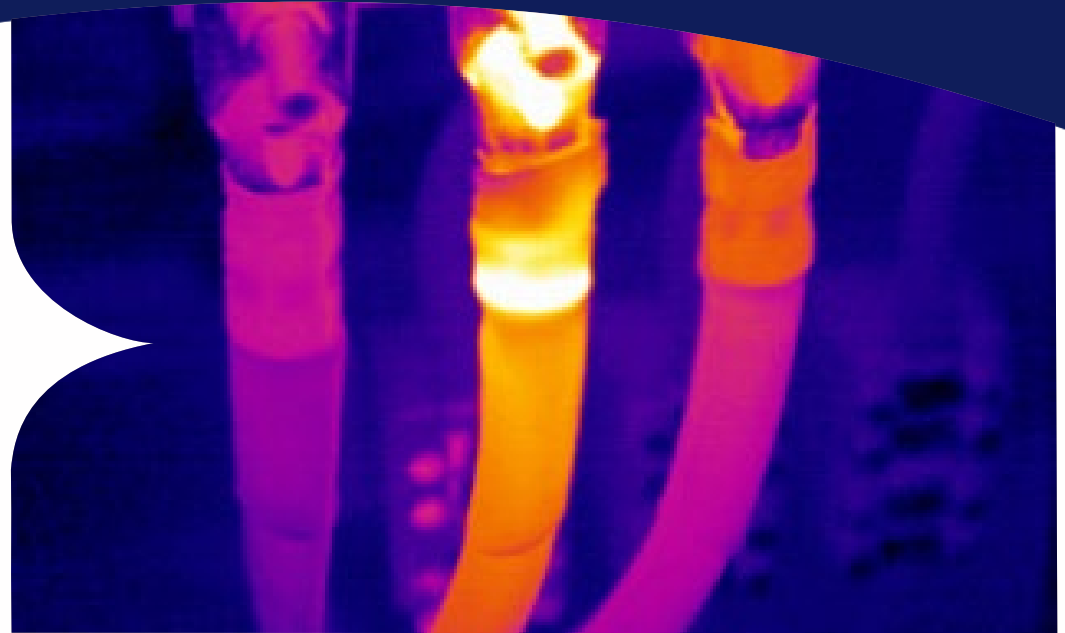


TERMOGRÁFIA KEZDŐKNEK

**fizikai alapok
mérési és kiértékelési problémák**

Szigeteléstechinikai Konferencia
Bükfürdő, 2024.04.24-26.

Mányoki László
SPIE Hungaria Kft.



SPIE, sharing a vision for the future

Hőmérséklet

Az anyagot alkotó részecskék átlagos mozgási energiájával kapcsolatos **intenzív** mennyiség, a test belső energiájának termodinamikai állapotjellemzője.

Hőátadás

oka

Transzportfolyamat

ΔT
intenzív mennyiség



I_Q
extenzív mennyiség

A termodinamika 1. főtétele

Energia a termodinamikai folyamatok során átalakulhat, de nem keletkezhet és nem veszhet el.

A termodinamika 2. főtétele

Egy magára hagyott rendszerben a hő mindig a hidegebb testről áramlik a melegebb testre.

módjai

Hőáramlás (konvekció)

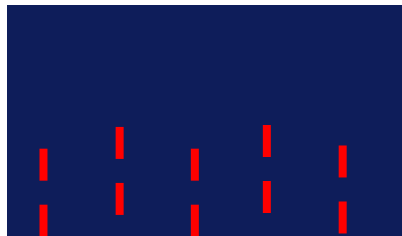


$$I_Q = \Delta T h A$$

$$\Delta T = I_Q (1/h) / A$$

$$\Delta T = I_Q R_Q$$

Hővezetés $j_Q = \lambda \text{ grad } T$



$$I_Q = \Delta T \lambda A / \Delta x$$

$$\Delta T = I_Q (1/\lambda) \Delta x / A$$

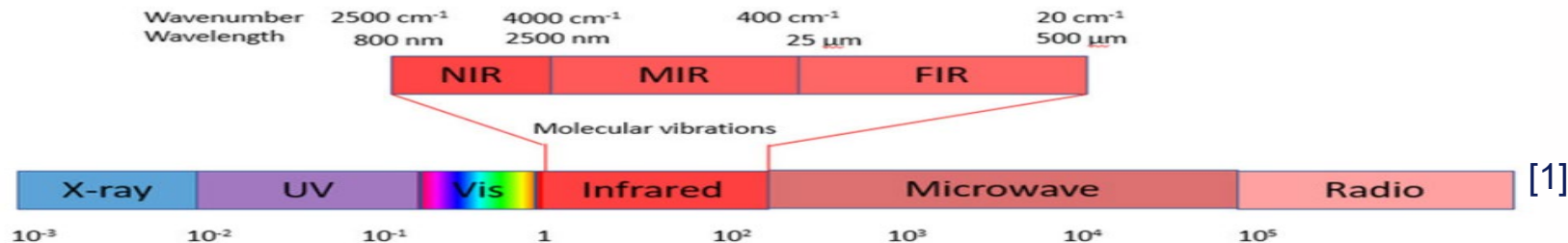
$$\Delta T = I_Q R_Q$$

Hősugárzás

Hősugárzás

1800. William Herschel

Az infravörös sugárzás (hősugárzás) felfedezése



Az elektromágneses sugárzások spektruma

	hullámhossz (μm)												
	0,78	1,0	1,4	2,5	3	5	7	12	15	25	30	50	1000
általános	NIR (IR-A)			SWIR (IR-B)		MWIR (IR-C)		LWIR (IR-C)		FIR			
CIE*	IR-A			IR-B		IR-C							
ISO 20473**	NIR				MIR								FIR
csillagászat	NIR				MIR								FIR
érzékelők	NIR	SWIR			MIR		LWIR	VLWIR					

* International Commission of Illumination

** ISO 20473 Optics and photonics - Spectral bands

Hőszugárzás

1879. Jozef **Stefan**
1884. Ludwig **Boltzmann**

Az abszolút fekete test teljes emissziója arányos a test hőmérsékletével.

$$M = \sigma T^4$$

M teljes spektrumú sugárzási áramsűrűség (W/m^2)

T a test hőmérséklete (K)

σ Stefan-Boltzmann állandó ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$)

A termográfia alapja

g y a k o r l a t i k o r l á t o k k a l

Abszolút fekete test

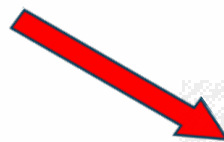
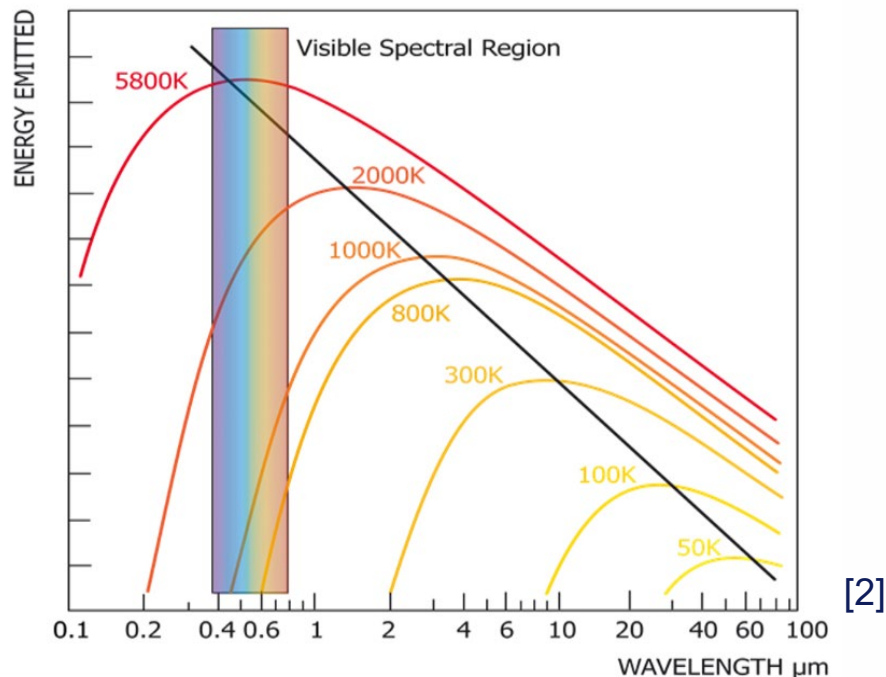
Teljes spektrumú sugárzás

Ideális közeg

Hősugárzás

1893. Wilhelm **Wien**

A feketetest maximális intenzitású hullámhossza



$$\lambda_{\max} T = b,$$

$$b = 2896 \mu\text{mK}$$

$$I'(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}.$$



1900. Max **Planck**

Az abszolút fekete test emissziójának spektrális eloszlása

Hőszugárzás

1879. Jozef **Stefan**
1884. Ludwig **Boltzmann**

Az abszolút fekete test teljes emissziója arányos a test hőmérsékletével.

$$M = \sigma T^4$$

M teljes spektrumú sugárzási áramsűrűség (W/m^2)

T a test hőmérséklete (K)

σ Stefan-Boltzmann állandó ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$)

A termográfia alapja

g y a k o r l a t i k o r l á t o k k a l

A vizsgált test és környezete

Az érzékelés

A közeg

A termográfia alapegyenlete

Az energiamegmaradás elve

energiákkal
tényezőkkel

$$i = a + r + t$$

$$1 = \alpha + \rho + \tau$$

Kirchhoff ($T = T_k$)

$\alpha = \varepsilon$ → $1 = \varepsilon + \rho + \tau$

Abszolút fekete test

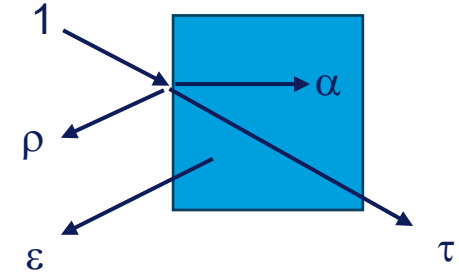
$$\left. \begin{matrix} \rho = 0 \\ \tau = 0 \end{matrix} \right\} \varepsilon = 1$$

Abszolút tükör

$$\left. \begin{matrix} \varepsilon = 0 \\ \tau = 0 \end{matrix} \right\} \rho = 1$$

Abszolút ablak

$$\left. \begin{matrix} \varepsilon = 0 \\ \rho = 0 \end{matrix} \right\} \tau = 1$$



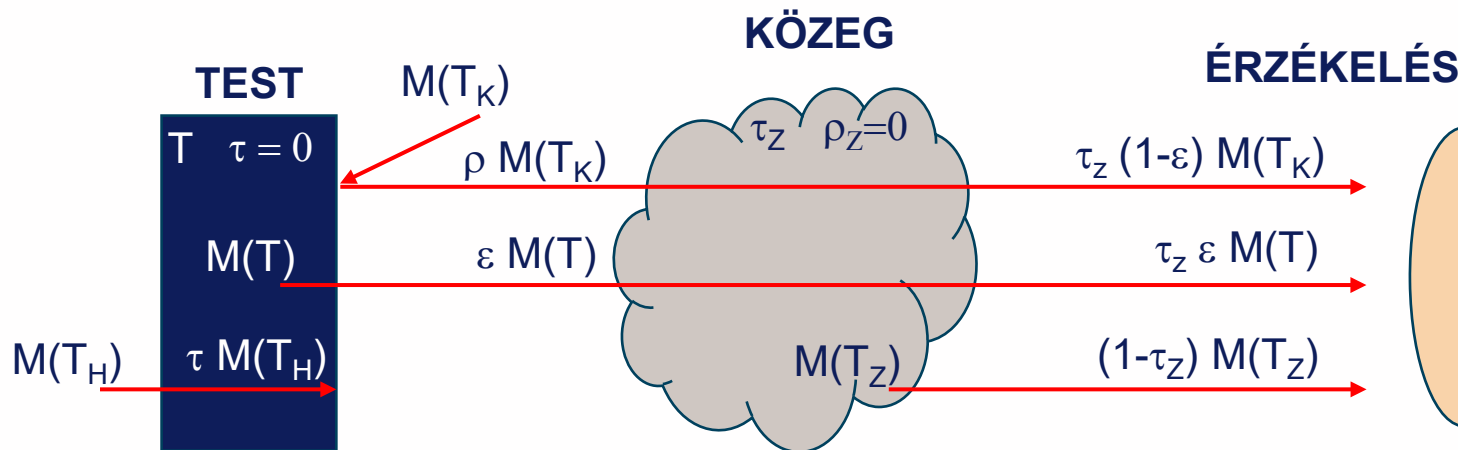
Szürke test

$$\begin{matrix} 0 < \varepsilon < 1 \\ 0 < \rho < 1 \\ 0 < \tau < 1 \end{matrix}$$

Gyakorlat

$$\left. \begin{matrix} 0 < \varepsilon < 1 \\ 0 < \rho < 1 \\ \tau = 0 \end{matrix} \right\} \varepsilon + \rho = 1$$

A termográfia alapegyenlete



$$M(T) = \frac{M_{\text{érz}} - \frac{(1 - \tau_Z) M(T_Z)}{\tau_Z} - (1 - \varepsilon) M(T_K)}{\varepsilon}$$

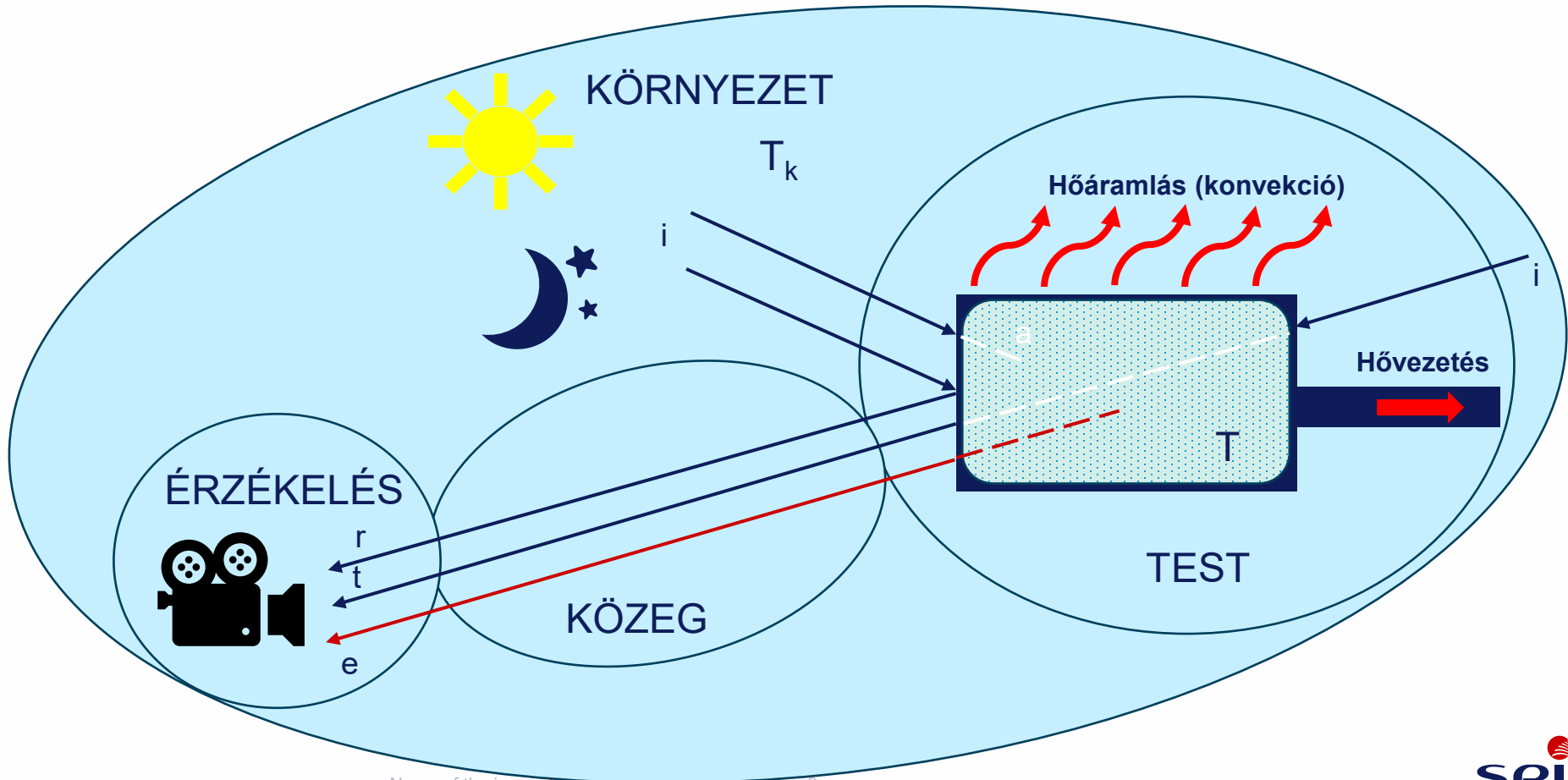
ε a mért test emissz. tényezője

τ_Z a közeg átviteli tényezője

T_Z a közeg hőmérséklete

T_K a környezet hőmérséklete*

*a környezetben a kibocsátó testek sugárzásarányos átlaghőmérséklete



I. A vizsgált test és környezete

EMISSZIÓS TÉNYEZŐ

Az emissziós tényezőt (e) befolyásoló jellemzők		a felület anyaga		
		fémek	nemfémek	
			világos	sötét
hullámhossz (μm)	< 1	0,9...0,4	0,2...0,4	0,3...0,7
	1...10	0,4...0,1	0,4...0,9	0,7...0,9
	> 10	< 0,1	> 0,9	> 0,9
hőmérséklet	↗	↗*	-	
érdesség	↗	↗**	-	
szennyeződés	↗	↗	-	
oxidáció	↗	↗	-	
csapadék	↗	↗***	-	
megfigyelési szög ($^{\circ}$)****	< 30	-		
	30...80	↗****	↘	
	> 80	↘****	↘	

* magas hőmérsékleten

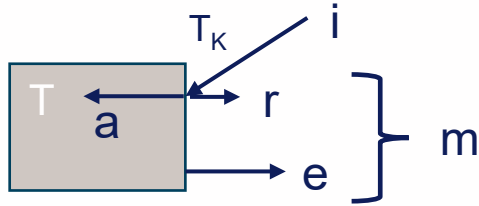
** a többszörös reflexió és a megnövelt felület miatt

***javítja az emissziót és párolgással hűti a testet

**** képlettel a felületi normálisra átszámítható

I. A vizsgált test és környezete

EMISSZIÓS TÉNYEZŐ



$$e = m - r$$

$$e = m - \rho i$$

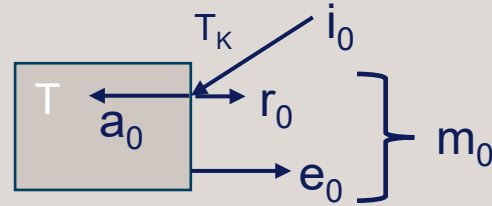
$$e = m - (1 - \epsilon) i$$

$$e = m - i + \epsilon i$$

$$\epsilon e_F = m - i + \epsilon i$$

A környezet* hőmérséklete

$$e_F = (m - i) / \epsilon + i$$



$$i_0 = a_0 + r_0$$

$$a_0 = e_0$$

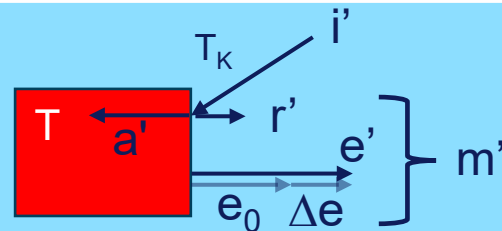
$$i_0 = e_0 + r_0$$

$$m_0 = e_0 + r_0 = i_0$$

$$e_F = (m_0 - i_0) / \epsilon + i_0$$

$$T = T_k$$

$$e_F = i_0$$



$$i' = i_0$$

$$r' = r_0$$

$$e' = e_0 + \Delta e$$

$$m' = r' + e' = r_0 + e_0 + \Delta e$$

$$e_F = (m' - i') / \epsilon + i'$$

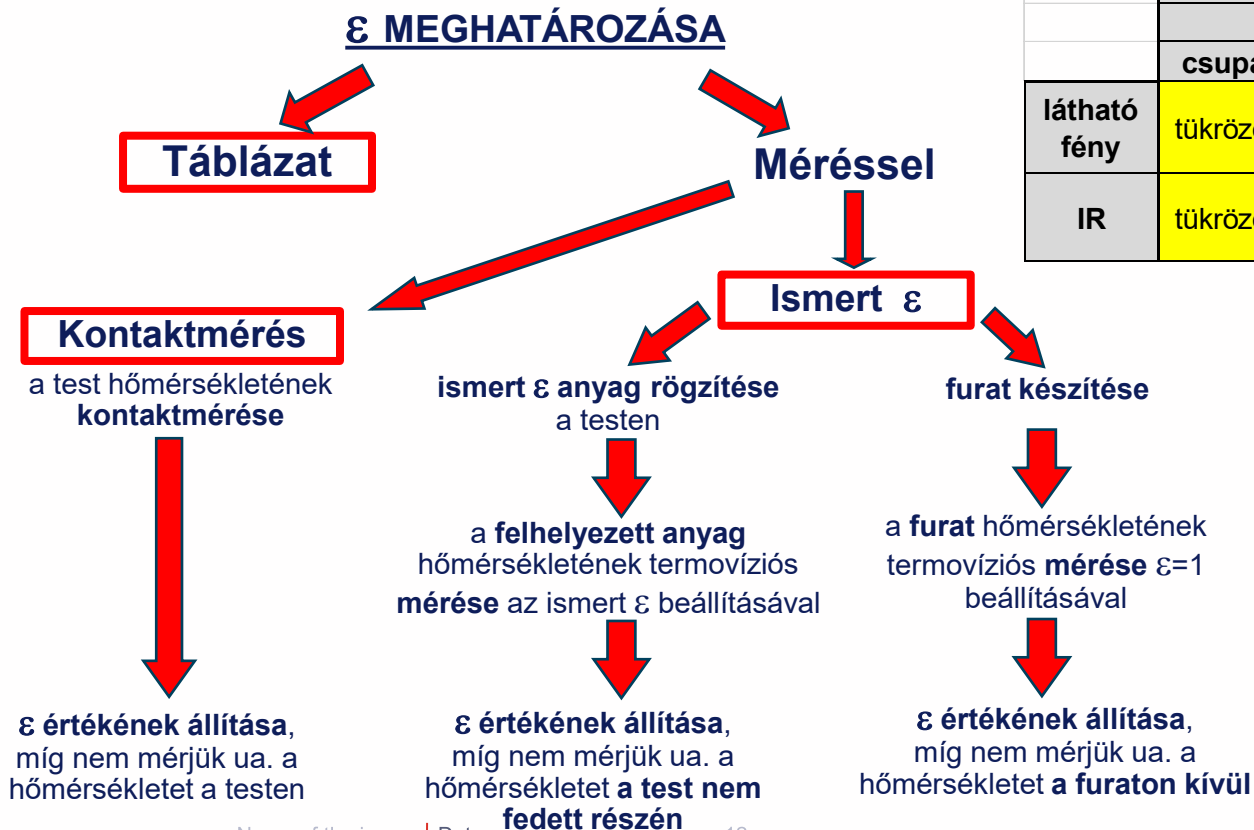
$$T > T_k$$

$$e_F = \Delta e / \epsilon + i_0$$

* a test által reflektált sugárzást kibocsátó tárgyak sugárzásarányos átlaghőmérséklete (nem pedig a környező levegő hőmérséklete)

I. A vizsgált test és környezete

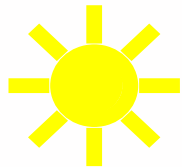
EMISSZIÓS TÉNYEZŐ



	a felület anyaga		
	fém		homokkő
	csupasz	festett	
látható fény	tükröződik	tükröződik	nem tükröződik
IR	tükröződik	nem tükröződik	tükröződik

I. A vizsgált test és környezete

HÁTTÉRSUGÁRZÁS



KÖRNYEZETI KIBOCSÁTÁS

talaj
tereptárgyak

KONCENTRÁLT HŐFORRÁSOK

napsugárzás (~ 5.500 °C)
izzólámpák
hőfejlesztő gépek
élőlények (mérő személy !)
hűtőrendszerek



Cold Diffuse Celestial Radiation

Hideg szórt égi sugárzás (-60...-55 °C)



Reflected Temperature Compensation (RTC)

átlagos háttérsugárzás *

$$T_H < 0 \text{ °C}$$

*a környezetben a kibocsátó testek sugárzásarányos átlaghőmérséklete

I. A vizsgált test és környezete

Védekezés koncentrált hőforrások hatása ellen

1. Árnyékolás

2. Deaktiválás

3. Lambert radiátor

mérés felhős időben

gyűrt felület (alufólia) készítése

elhelyezés a mérendő felület mellé

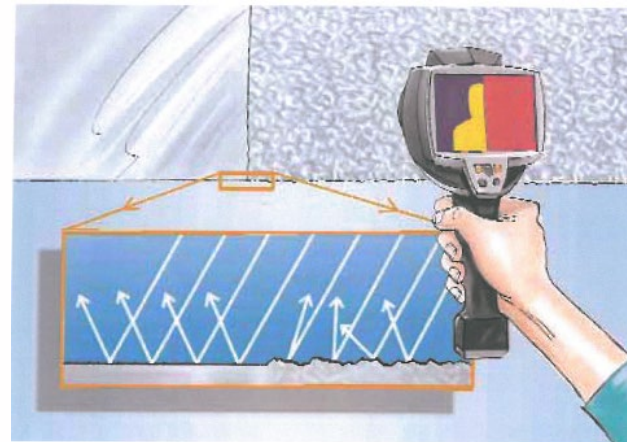
mérés a Lambert radiátoron

$\varepsilon = 1$ beállításával

a mért hőmérséklet

mint RTC beállítása

mérendő felület mérése



[3]

I. A vizsgált test és környezete

ÁTLÁTSZÓ TESTEK

Alapegyenlet

$$1 = \varepsilon + \rho + \tau$$

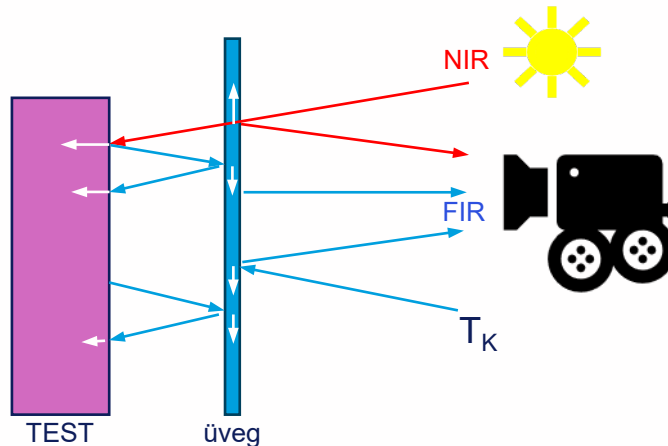
Túl sok ismeretlen

Az üveg jellemzői

átviteli tényező:
reflexiós tényező:
emissziós tényező:

$\tau = f(\text{anyag, vastagság, frekvencia})$
 $\rho = f(\text{felület, frekvencia})$
 $\varepsilon = f(\text{anyag, felület, frekvencia})$

		jellemző		
		τ	ρ	ε
hullámhossz (μm)	NIR	0,8	0,1	0,1
	MIR	0		0,9
	FIR	0		0,9

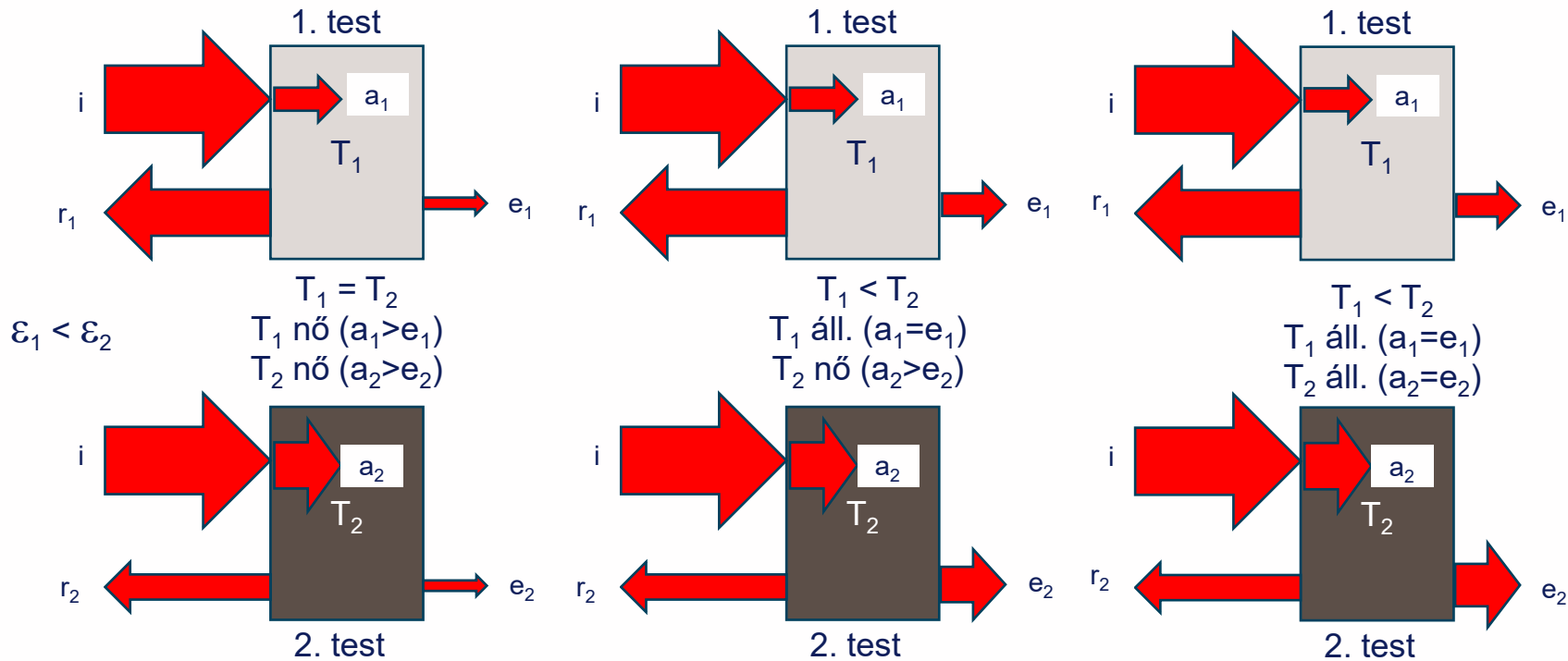


	NIR	FIR
$\tau_{\text{üveg}}$	1	0
kamera	0	1

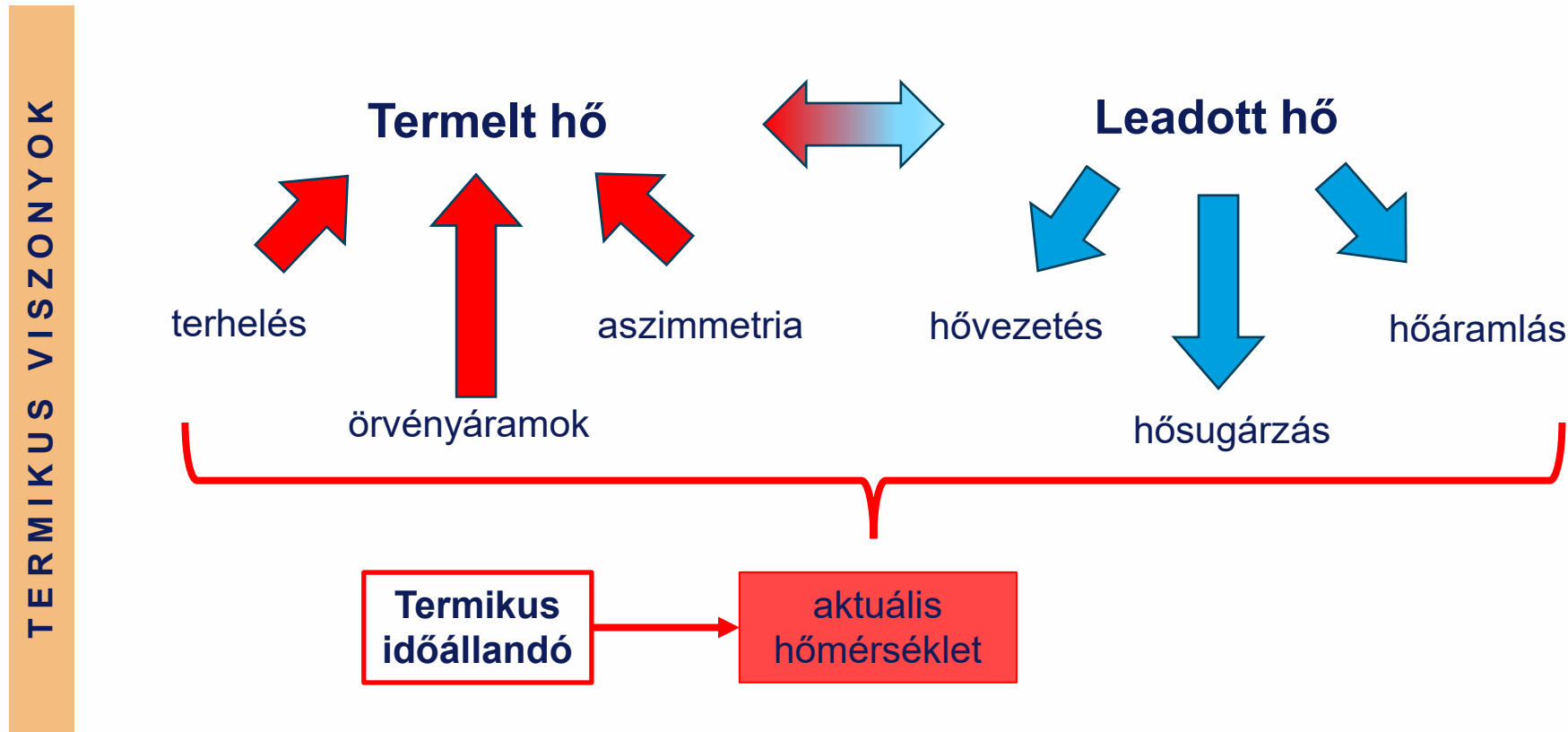
Az üveg hőmérsékletét mérjük

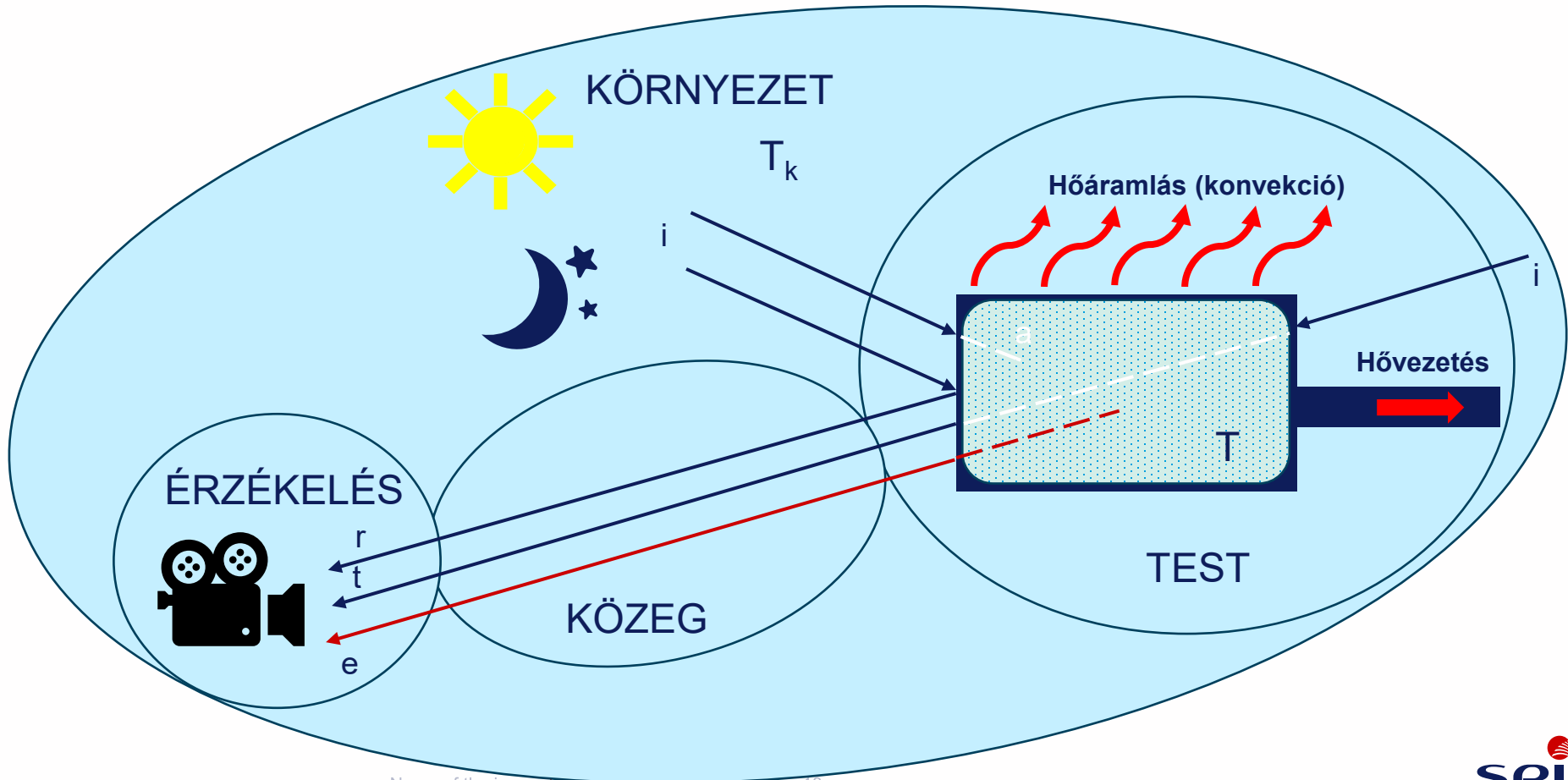
I. A vizsgált test és környezete

FÉNY / SZÍNEK



I. A vizsgált test és környezete





II. A közeg

A LEVEGŐ

Alapegyenlet

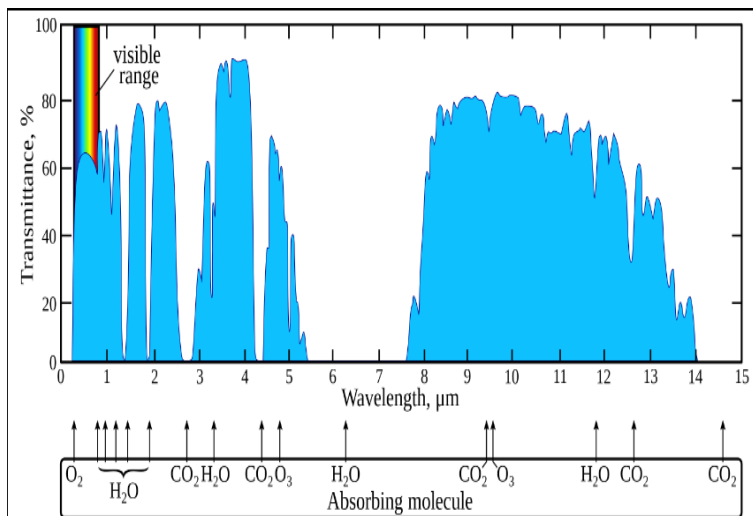
$$1 = \varepsilon + \rho + \tau \quad , \text{ ahol } \varepsilon = \alpha \quad \text{és} \quad \rho = 0$$

$$1 = \alpha + \tau$$

A levegő fő jellemzője

α abszorpciós tényező

$\alpha = f(\text{szennyeződések, H}_2\text{O, O}_2, \text{N}_2, \text{CO}_2, \text{távolság, frekvencia})$



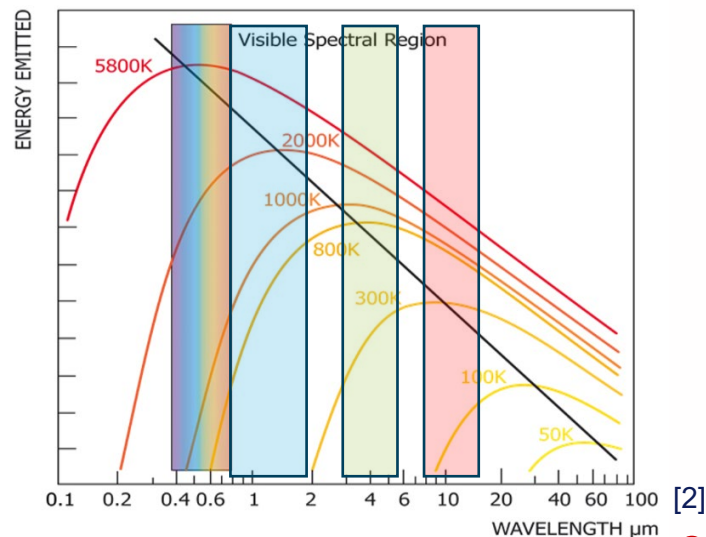
[4]

atmoszférikus ablakok

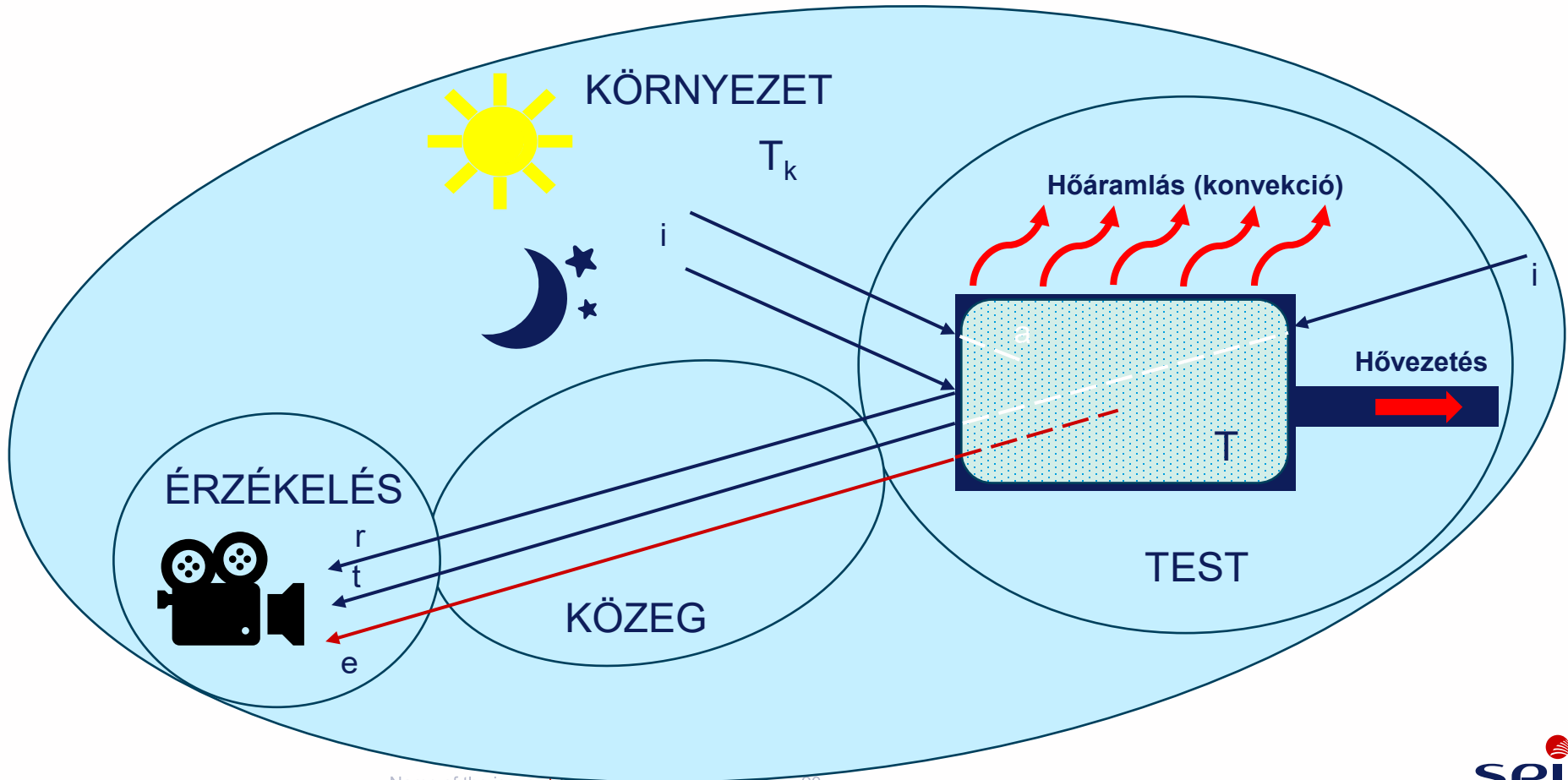
LW: 7,5 ... 14 μm

MW: 3,0 ... 5,5 μm

SW: 0,8 ... 2,0 μm



[2]



III. Az érzékelés

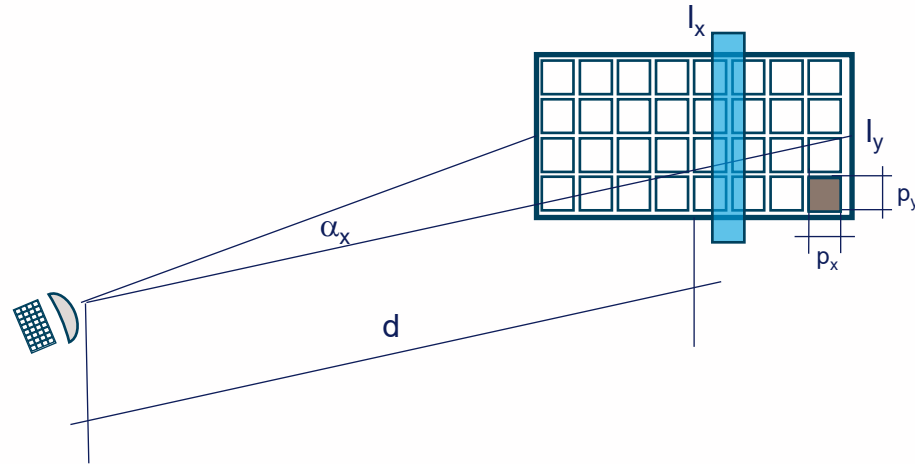
Kamerajellemzők (érzékelő + lencse)

- x vízszintes pixelfelbontás
 - y függőleges pixelfelbontás
 - α_x vízszintes látószög (fok)
 - α_y függőleges látószög (fok)
- vagy

IFOV geometriai felbontás (mrad)

Mérési adatok

d távolság



Smallest identifiable object

$$p_x = \frac{l_x}{x} = d \frac{2\pi}{360} \alpha_x \frac{1}{x}$$

$$p_y = \frac{l_y}{y} = d \frac{2\pi}{360} \alpha_y \frac{1}{y}$$

IFOV

IFOV_{geo}

ezen belül
átlag
hőmérséklet

Smallest measureable object



IFOV_{meas}

a tárgy
min.
mérete

$$\frac{\text{IFOV}_{\text{meas}}}{\text{IFOV}_{\text{geo}}} \geq 3$$

III. Az érzékelés

FÓKUSZÁLÁS

Rosszul beállított fókusztávolság

Hagyományos fénykép

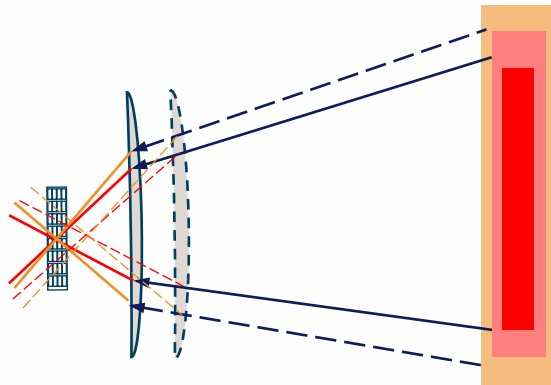
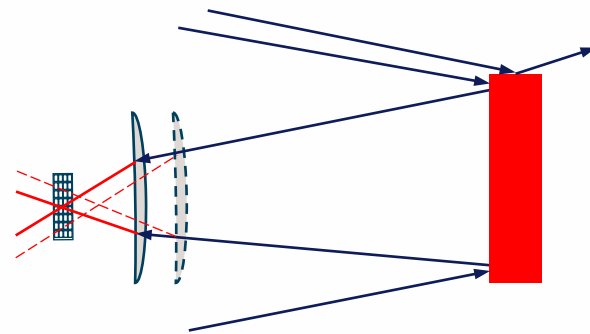
↓
elégtelen információ

↓
életlen kép

IR fénykép

↓
elégtelen információ

↓
téves hőmérséklet



Jól beállított fókusztávolság

Hagyományos fénykép

← reflektált sugárzás →
← a tárgyon kívül nincs reflexió →

↓
éles kép

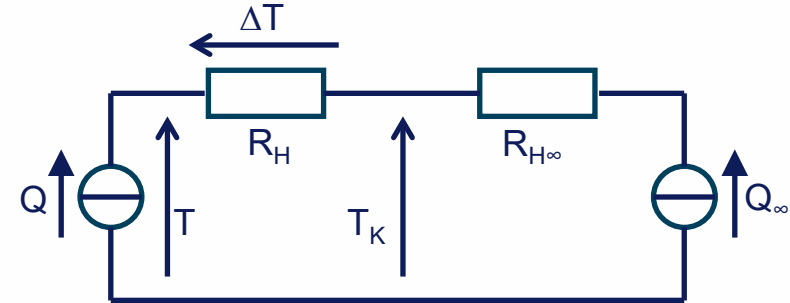
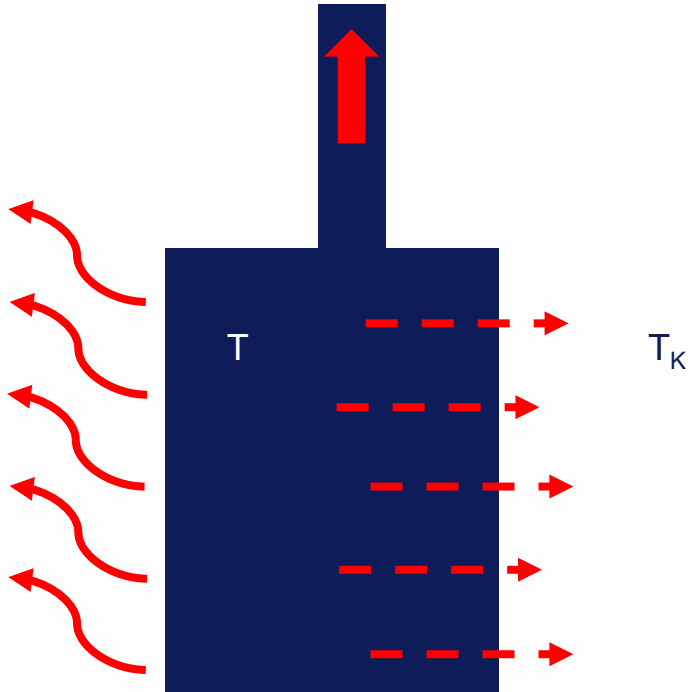
IR fénykép

← emittált sugárzás* →
← a tárgy szélein átmeneti hőmérséklet →

↓
„életlen” kép

* reflektált sugárzással kalibrálható

Megengedett terhelés számítása (hőáramhálózatos modell)



$$T = \Delta T + T_K$$

Mért értékek
Számolt értékek

Max. túlhőmérséklet
Megengedett áram

$$\Delta T = Q \cdot R_H \quad Q = I^2 \cdot R$$

$$\Delta T = I^2 \cdot R \cdot R_H$$

$$\Delta T_M = I_M^2 \cdot R \cdot R_H$$

$$\Delta T_S = I_S^2 \cdot R \cdot R_H$$

$$\Delta T_S / \Delta T_M = (I_S / I_M)^2$$

$$\Delta T_S = (I_S / I_M)^2 \cdot \Delta T_M$$

$$I_S = I_M \cdot \sqrt{(\Delta T_S / \Delta T_M)}$$

Összefoglaló

			Hibaforrások																
			A tárgy és környezete							Közeg			Az érzékelés						
			Anyag	Felület	Háttersugárzás	Hőforrások, hőnyelők	Terhelési aszimmetria	Örvényáramok	Hőtehetlenség	Szél	Napsugárzás (látható)	Páratartalom	Légszennyezettség	Felbontás (távolság)	Fókusz	Érzékelési szög	Méréstartomány	Kondenzáció a lencsén	Lencse szennyezettsége
Intézkedések	Mérésre felkészülés	A mért tárgy ismerete	x	x			x	x	x										
		A közelben lévő mágnesező tárgyak ismerete						x	x										
		A közelben lévő hőforrások ismerete				x			x										
		Korábbi terhelési viszonyok ismerete							x										
		Szimmetrikus terhelés kialakítása				x													
	Mérési körülmények megválasztása	Száraz időben		x							x								
		Szélcsendes időben							x										
		Pormentes időben										x							
		Felhős időben								x									
		Reggeli órákban						x	x										
		Lehető legkisebb távolságról									x	x	x						
		Többféle szögéből		x		x										x			
		Mozgásban		x		x										x			
		Hőforrásoktól / hőnyelőktől távol				x													
	Mérési beállítások	Temperálódás kivárása																x	
		Lencse védelme / tisztítása																	x
		Megfelelő méréstartomány választása															x		
		Pontos fókuszbeállítás												x					
		Emissziós tényező pontos beállítása	x	x	x	x									x				
		Érzékenység beállítása											x			x			
		RTC pontos beállítása (Lambert-radiátor)				x	x												
	Környezeti hőmérséklet beállítása																		

-

A termográfia nagyon **érzékeny** mérés,
ha **pontosan** akarunk mérni (ε , RTC, fókuszt, időjárás stb...)

+

Villamosipari alkalmazását nagyban segíti
a **három fázis**.

!

Mindig a felületi sugárzást mérjük,
nem látunk bele a testbe !

Ábrák forrásai

[1] https://www.researchgate.net/figure/Spectral-range-for-near-infrared-NIR-and-mid-infrared-MIR-showing-wavelengths-nm_fig1_338633707

[2] <https://www.ametek-land.fr/pressreleases/blog/2021/june/thermalinfraredrangeblog>

[3] Testo Pocket Guide Thermography 2009.

[4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>

Ajánlott szakirodalom

Rahne Eric: Termográfia – elmélet és gyakorlati mérés technika (Invest-Marketing Bt., Budapest, 2018.)

Testo Pocket Guide Thermography 2009.

Testo Manual for Infrared Measuring Technology 2009.