

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

02 Měření teplot

Experimentální metody v mechanice tekutin a termodynamice

ZČU: Zkoušení energetických strojů

Prof. Václav Uruba
ÚT AVČR, ZČU Plzeň, ČVUT Praha
<http://home.zcu.cz/~uruba/ZES/>



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Obsah kurzu

- Teorie fyzikálního modelování
- **Měření teplot**
- Měření tlaků
- Měření viskozity tekutin
- Měření rychlosti proudění
- Měření průtoku potrubím
- Měření povrchového tření
- Optické metody
- Základy sběru a zpracování signálů a chyby měření
- Experimentální zařízení v mechanice tekutin



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Obsah přednášky

- Stavové veličiny
- Statická, dynamická a celková teplota
- Fyzikální principy senzorů teploty
- Metodika určení teplot
- Otázky pro studenty



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Stav tekutiny

- Kapaliny
- Plyny – stavová rovnice $PV = RT$
- **Libovolná** fyzikální veličina je funkcí teploty T a tlaku P

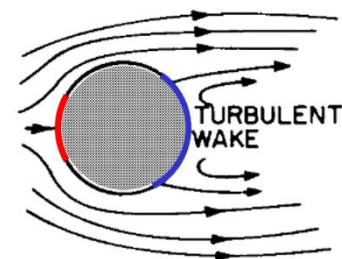
Ideální plyn - vzduch

$$\rho = 3,484 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \mu = 2,561 \cdot 10^{-7} T^{0,75} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}} \right]$$
$$\lambda = 1,83 \cdot 10^{-4} T^{0,87} \left[\frac{\text{J}}{\text{K m s}} \right] \quad l = 1,098 \frac{T^{1,25}}{P} [m]$$



Stavové veličiny

- Teplota
- Tlak
- **STATICKÉ – proudící tekutina**



CELKOVÁ
(stagnační)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Vysoké rychlosti

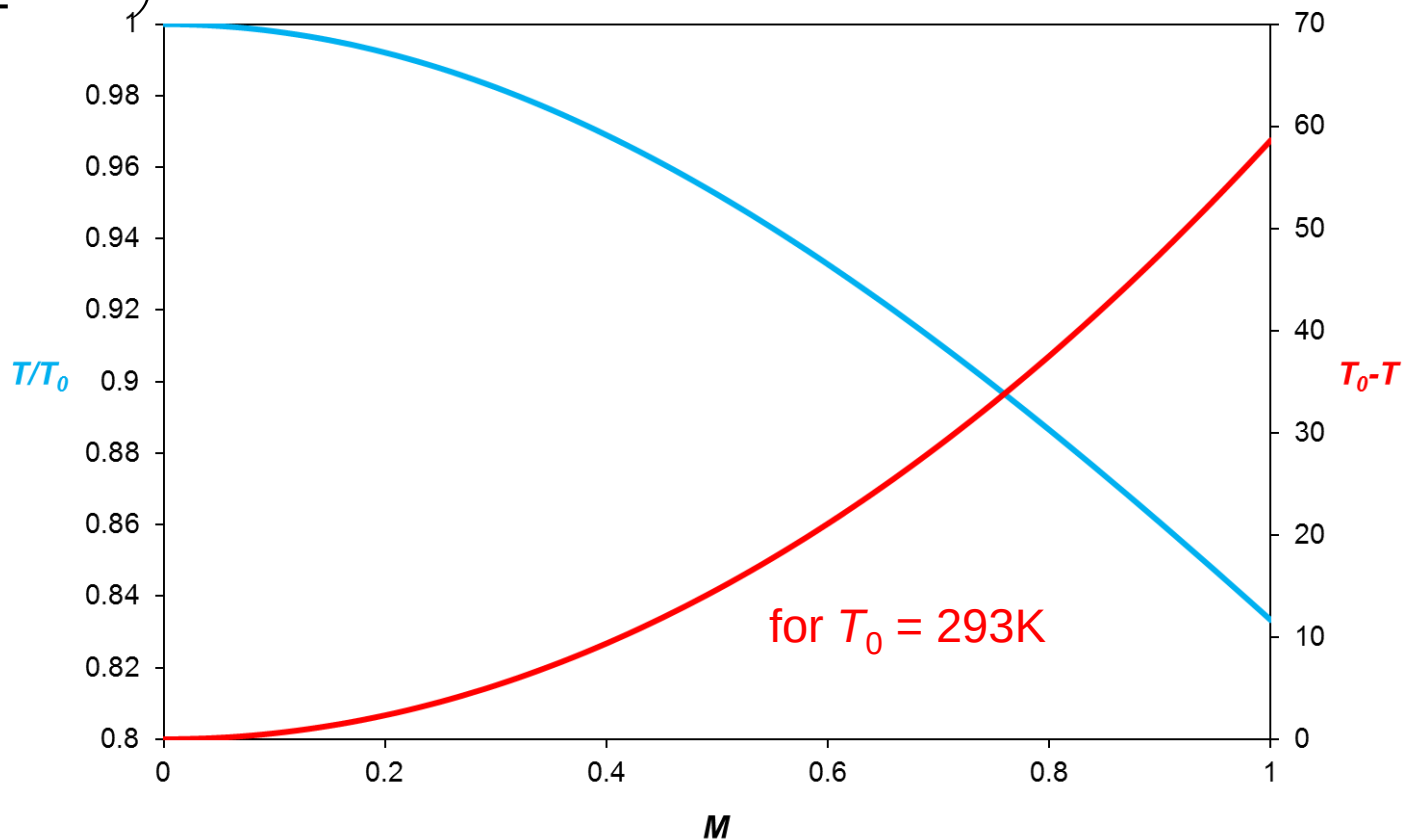
T – statická teplota

T_0 – celková (stagnační) teplota

$$\frac{T}{T_0} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-1}$$

Adiabatická komprese

$(\gamma = 1,4)$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

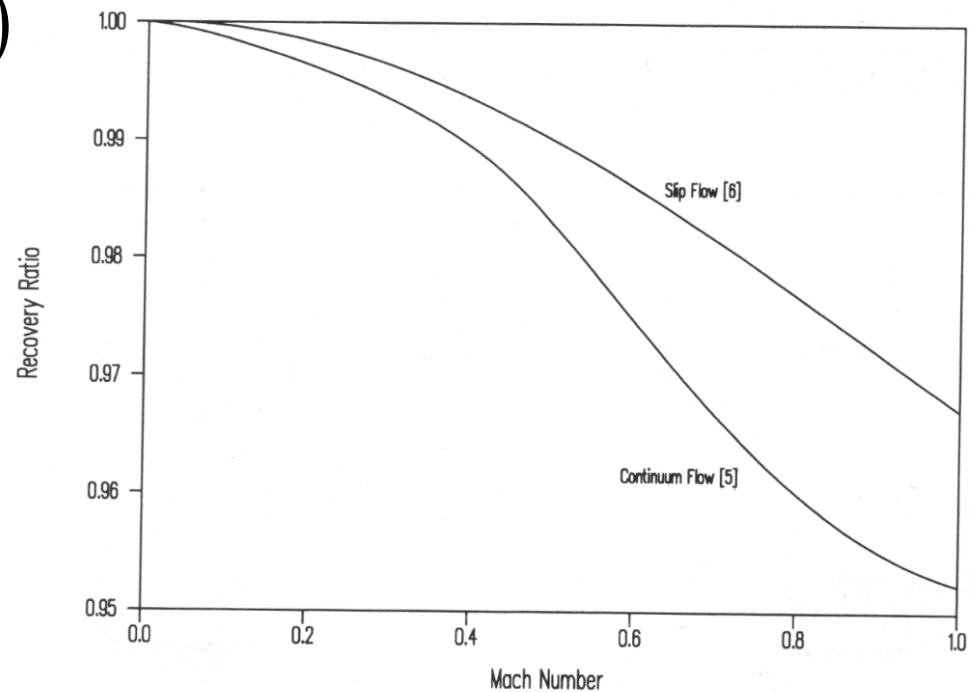
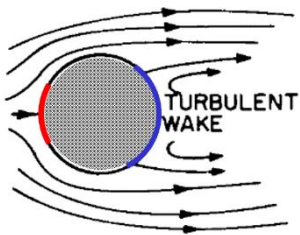
Teplota senzoru

Měříme **rovnovážnou (recovery) teplotu T_r**

$$M \rightarrow 0: T_r = T_0 (= T)$$

$$M > 0: T_r \leq T_0$$

$$r = \frac{T_r - T}{T_0 - T} < 1$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Methody měření teploty

- Teplotní roztažnost
- Elektrická teplotní čidla
- Optické metody



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Metody založené na tepelné roztažnosti

- Kapalinové (skleněné) teploměrech
- Plynové teploměry
- Bimetalické teploměry

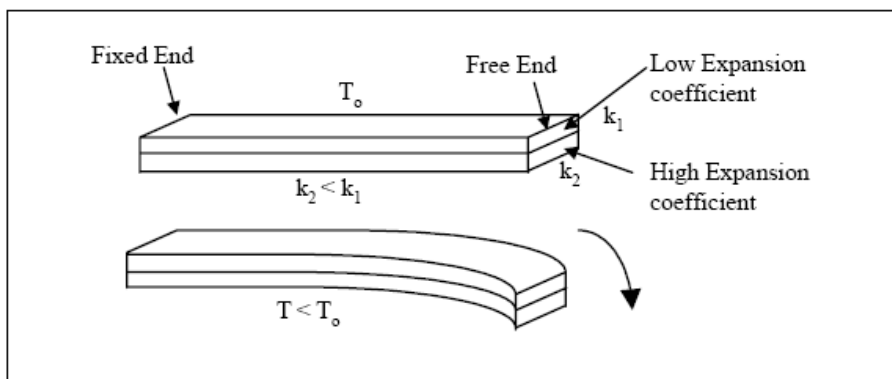
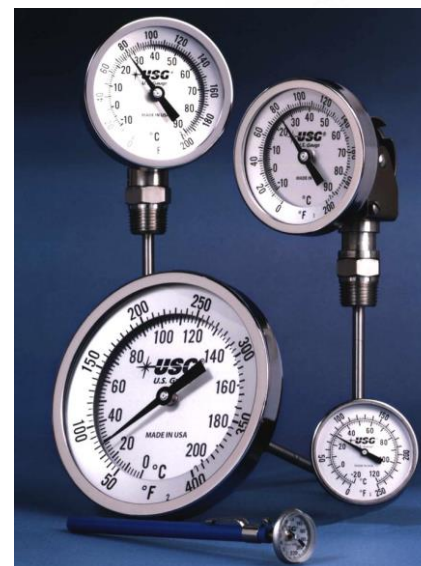


Figure 7-2. Bimetallic strip



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Electrická teplotní čidla

- Termočlánky
- Odporová čidla – Resistance Temperature Detectors (RTDs)
- Termistory (THERMal resISTORs)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

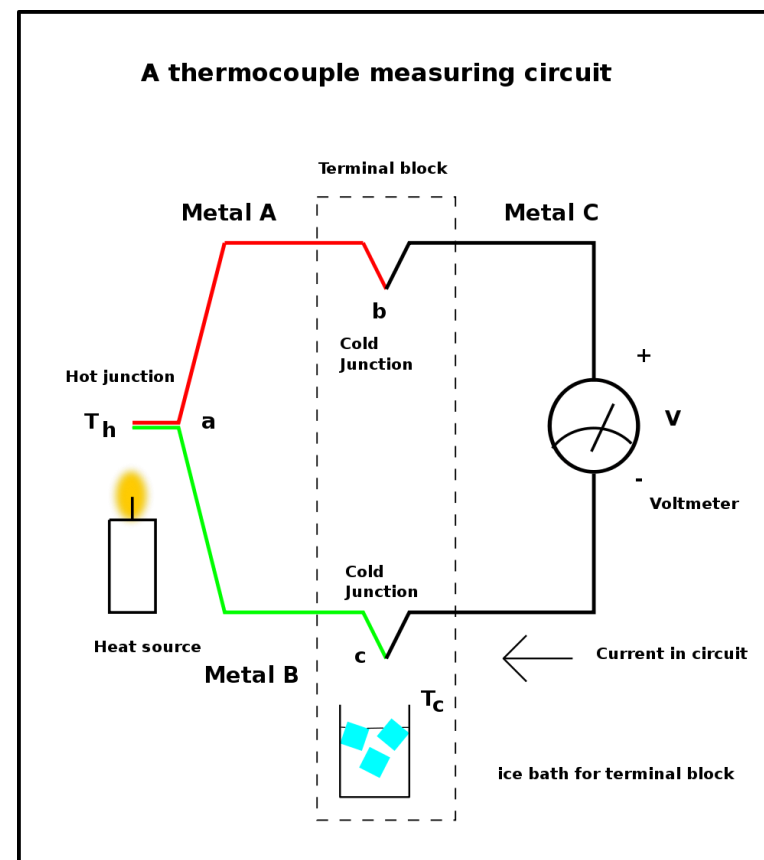
Thermočláanky

- Levné
- Malé, nízká setrvačnost
- Velký rozsah
- Nízká citlivost
- Horší přesnost

Characteristics of Common Thermocouples

Type	Materials ¹	Temperature Range K
B	platinum-30% rhodium/platinum-6% rhodium	273–2000
E	chromel/constantan	3–1150
J	iron/constantan	63–1030
K	chromel/alumel	3–1530
R	platinum-13% rhodium/platinum	223–1750
S	platinum-10% rhodium/platinum	223–1750
T	copper/constantan	3–640

¹Note: constantan is copper–nickel alloy ($\text{Cu}_{55}\text{Ni}_{45}$), chromel is nickel–chromium ($\text{Ni}_{90}\text{Cr}_{10}$), and alumel is nickel–aluminum ($\text{Ni}_{94}\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_1$).



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

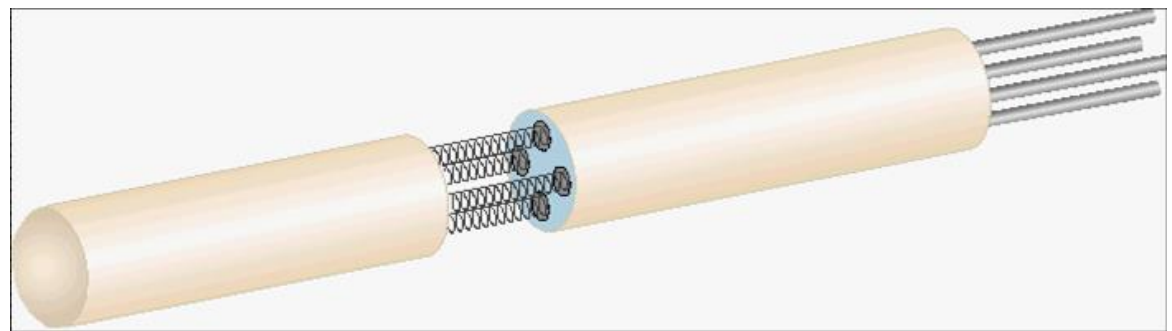
MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Odporová teplotní čidla

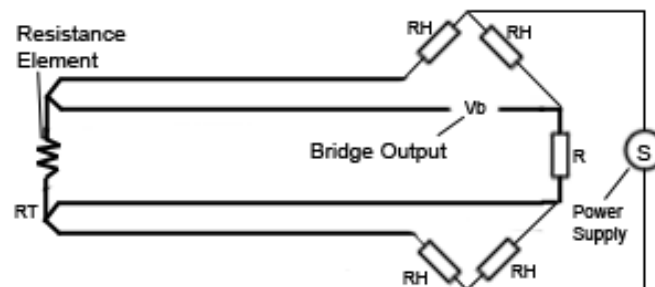
- Přesnost, stabilita
- Jednoduché
- Rozsah (50-1000K)
- Velikost
- Cena

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

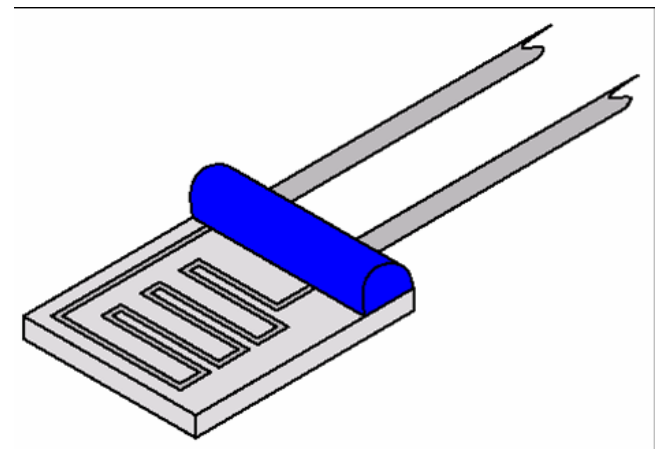
platina: 0.0038



wire



2w, 3w, 4w



film



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

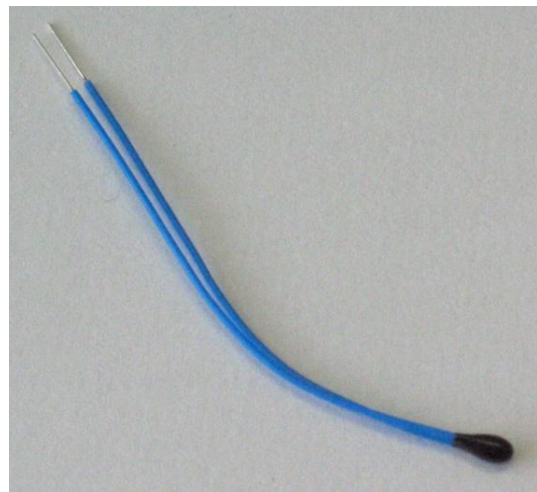
Thermistory

Polovodiče (oxidy Mn, Ni, Co, Cu, Fe, Ti)

Steinhartova-Hartova rovnice

$$T = 1 / \left[A + B \ln(R) + C \ln^3(R) \right]$$

- Levné
- Vysoká citlivost
- Nelineární
- Jen nízké teploty (do 300°C)

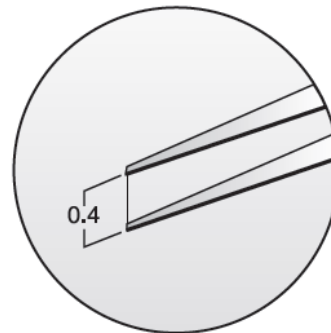


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

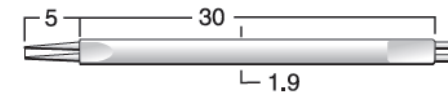
MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Měření fluktuací teploty

- Metoda žhaveného drátku HWA
- Constant current version (CCA)
- “studený drátek” – přežhavení jen několik °C
- Senzor Pt, 1 micron
- Fluktuace teploty do 10 kHz
- Drahé
- Křehké



55P31 Straight probe



Sensor is 0.4 mm long 1 μ m dia. platinum wire.

MOUNTING: 4 mm dia. probe supports.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

<https://www.dantecdynamics.com>



MLÁDEŽ A TĚLOVÝCHOVY

Optické metody

Tekuté krystaly
Radiation Thermometers (RTs)
Thermal Imaging (Thermography)

Teplota
povrchu!!!

Laser-Induced Fluorescence
Rayleigho rozptyl

Teplota
tekutiny

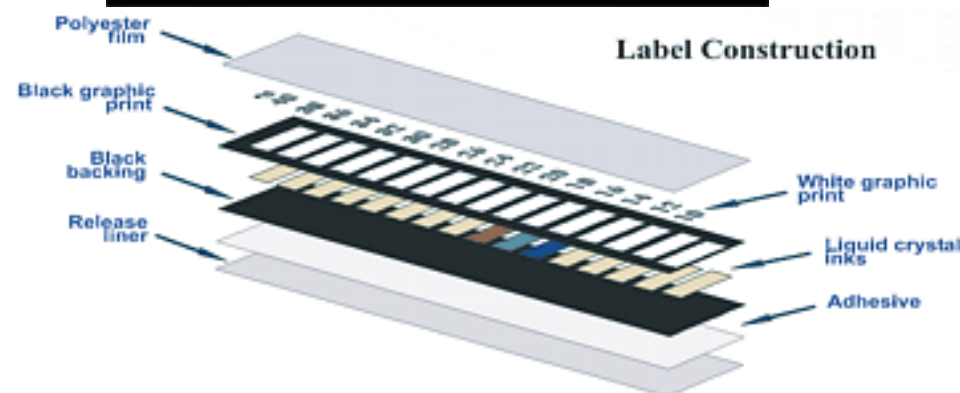
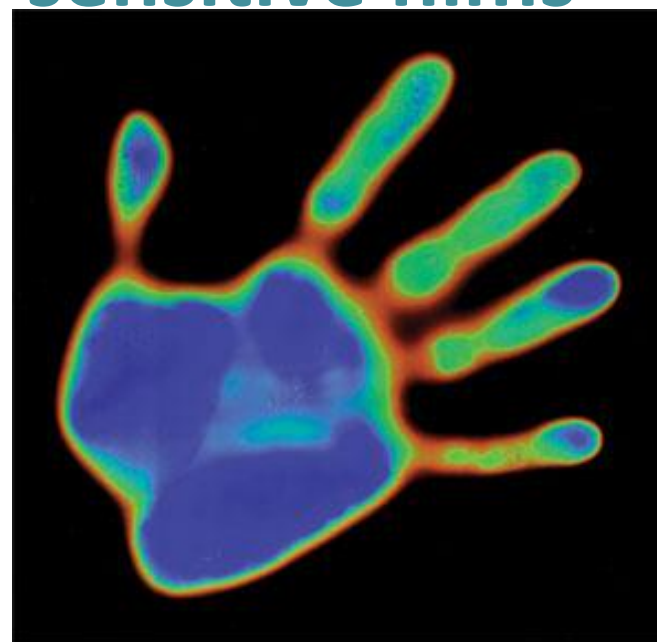


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tekuté krystaly temperature-sensitive films

- Film citlivý na teplotu
- Hydrophobické deriváty polyvinylalkoholu a cholesterické tekuté krystaly
- Encapsuled (jinak citlivost na povrchové tření)
- Rozsah -5 do +150°C
- Tloušťka 30-50μm
- **Vysoká citlivost**



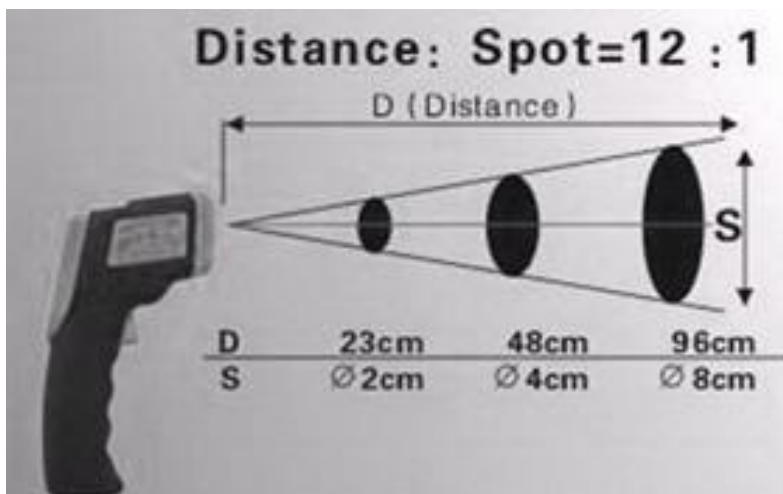
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Radiační teploměry (infračervené)

- Bezkontaktní metoda
- Electromagnetické záření
- Rozsah $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Teplota POVRCHU !!!

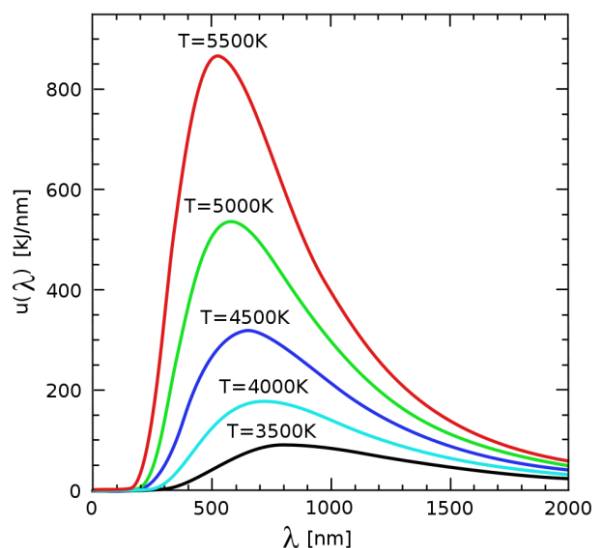


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Thermal Imaging

- Infračervená oblast (9000–14000 nm)
- Záření absolutně černého tělesa - plankův zákon



Teplota POVRCHU !!!



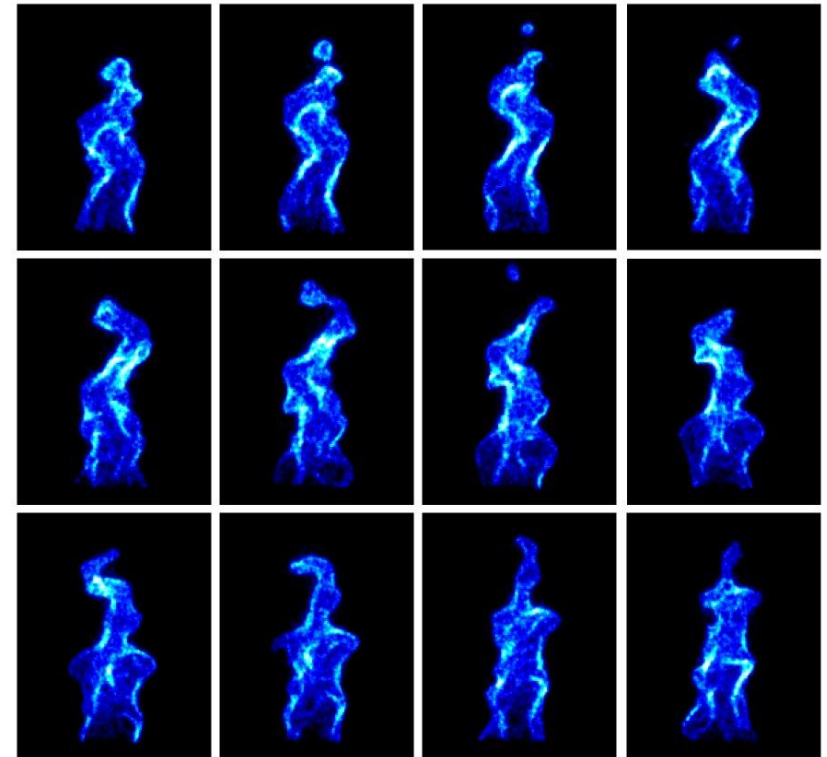
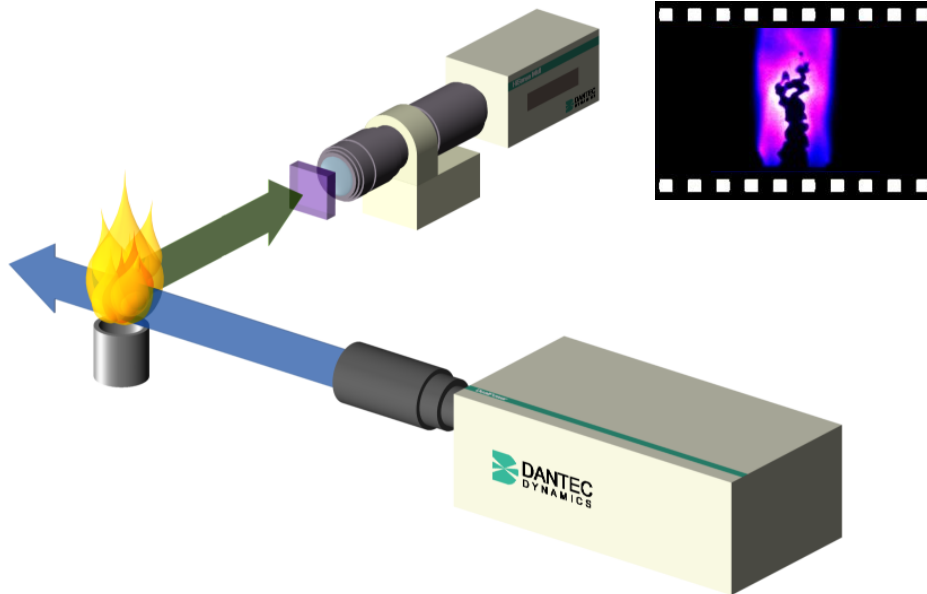
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

See more in „Optical methods“

PLIF

- Planar laser-induced fluorescence (planar-LIF)
- Okamžitá pole:
 - Teplota
 - Koncentrace



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

<https://www.dantecdynamics.com>

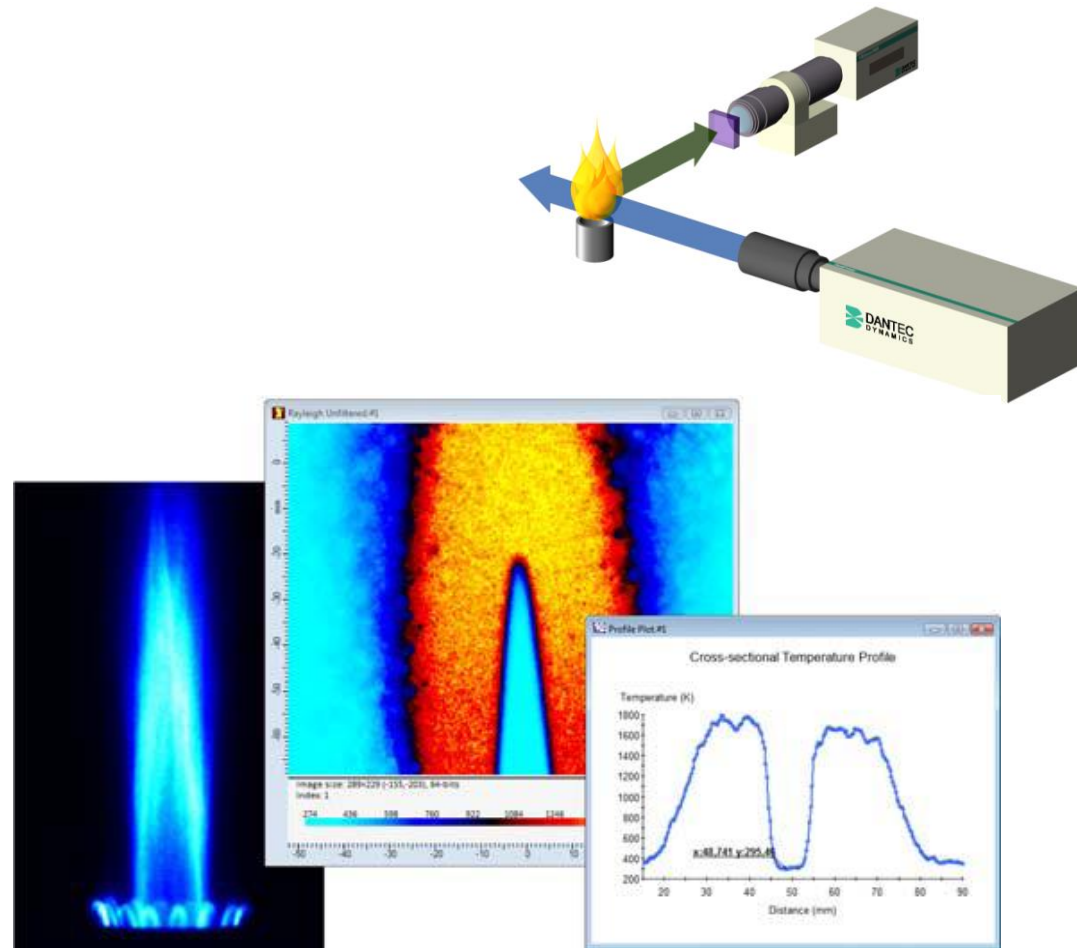


MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Rayleigho rozptyl

- Rayleigho signál závisí na:
 - Intenzitě laseru
 - Rozptylové ploše
 - Hustotě
- Známe:
 - Chemické složení
 - Tlak
- Určíme:
 - Rozložení teploty

Více viz „Optické metody“



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

<https://www.dantecdynamics.com>

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Otázky pro studenty

- Definice teplot a princip jejich měření (statická, dynamická, celková).
- Jaké jsou fyzikální principy nejpoužívanějších teplotních senzorů?
- Metodika měření teploty proudícího média.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY