

## S termokamerou po stopách tepla

PETR KÁCOVSKÝ

Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze

V rámci příspěvku bude představeno několik krátkých názorných experimentů, které lze provést s pomocí termovizní kamery – ať už v učivu mechaniky či termiky.

### Infračervené záření kolem nás

O objev infračerveného záření se v roce 1800 postaral při pokusech se světlem německý astronom sir Frederick William Herschel [1]. Zatímco světlo se z hlediska vlnových délek vměstná do intervalu několika set nanometrů, infračervené záření bývá nejčastěji vymezeno na jedné straně vysokoenergetickou vlnovou délkou 700 nm – blízké infračervené záření – a na straně druhé nízkoenergetickou vlnovou délkou 1 mm, kde neostře hraničí s mikrovlnami. Tento velký rozsah vlnových délek (více než tři řády!) vede obvykle k dalšímu, jemnějšímu dělení infračerveného záření [2]:

Tabulka 1: Přehled infračervených vlnových délek

oblast	vlnová délka
blízké infračervené záření	0,7 – 1,0 $\mu\text{m}$
infračervené záření – krátké vlny	1 – 3 $\mu\text{m}$
infračervené záření – střední vlny	3 – 5 $\mu\text{m}$
infračervené záření – dlouhé vlny	5 – 14 $\mu\text{m}$
infračervené záření – velmi dlouhé vlny	14 – 30 $\mu\text{m}$
vzdálené infračervené záření	30 – 1000 $\mu\text{m}$

Zdrojem infračerveného záření jsou všechna tělesa a vlnová délka emitovaných vln přímo souvisí s jejich teplotou. Zatímco záření o vlnové délce 1  $\mu\text{m}$  je nejvíce emitováno tělesy o teplotě cca 2900 K, na vlnových délkách okolo 1 mm maximálně vyzařují tělesa, jejichž teplota se počítá v jednotkách kelvinů. Protože běžné teploty, které mají tělesa kolem nás (210 – 580 K), odpovídají dlouhovlnnému infračervenému záření, budeme se dále zabývat pouze jím.

### Termografie (nejen) ve vzdělávání

Principem termografických měření, tj. bezkontaktních měření rozložení teplotního pole na povrchu těles, je detekce vysílaného dlouhovlnného infračerveného záření a následná vizualizace rozložení teplot pomocí barev na tzv. termogramu.

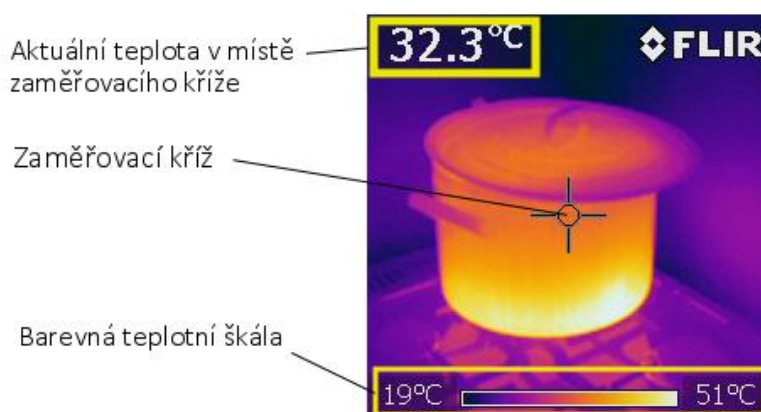
Ve svých prvopočátcích byla termografie využívána zejména k vojenským účelům, později (zejména díky společnosti FLIR Systems) začíná sloužit také vědě a průmyslu, ale nejen jím – v energetice dnes umožňují termovizní kamery např. odhalování nelegálních odběrů elektřiny, v kriminalistice zase vyhledávání pěstíren omamných

láték. S boomem tzv. zeleného bydlení se termovizní kamery častěji uplatňují také ve stavebnictví při hledání optimálních izolačních vlastností fasád, střešních krytin, okenních rámců apod.

Technologický vývoj a konkurence na trhu v poslední době stlačily cenu některých modelů termovizních kamer i na „podinvestičních“ 40.000 Kč, čímž se tato zařízení začínají v rámci evropských či státních grantů stávat zajímavým zbožím i pro vzdělávací zařízení – základní a střední školy, univerzity.

### Termovizní kamera FLIR i7 a měření s ní

Pro snímání experimentů představených v tomto příspěvku byla využita termovizní kamera FLIR i7 s rozlišením 140x140 pixelů a citlivostí 0,1 °C [3]. Obr. 1 ukazuje obrazovku kamery během měření a její základní prvky.

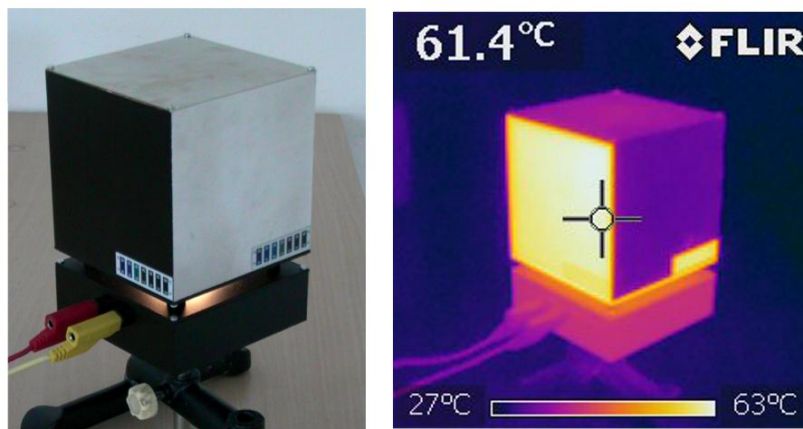


Obr. 1: Displej termovizní kamery FLIR i7 během měření

Velmi důležitá se ukázala schopnost kamery uzamknout zobrazovaný teplotní rozsah, tj. zařídit, aby barevná teplotní škála zůstala po celou dobu trvání experimentu neměnná (tj. aby daná barva odpovídala stále stejné teplotě). Pokud tuto možnost nevyužijeme, bude se škála automaticky přizpůsobovat maximální a minimální aktuálně snímané teplotě, takže v jednom okamžiku může žlutobílá barva znamenat teplotu např. 30 °C, zatímco vzápětí třeba i 100 °C, čímž by trpěla názornost experimentů.

Důležitým parametrem všech termografických měření je emisivita měřeného objektu, zjednodušeně řečeno poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa o stejné teplotě [4]. Pro absolutně černé těleso (tj. také, které veškerou dopadající energii pohlcuje), je emisivita rovna jedné, pro většinu matných předmětů – ale také vodu či led – se hodnota emisivity jedné blíží (často v intervalu 0,90 – 1,00). Problém představují lesklé povrchy, leštěné kovy apod., které mohou mít emisivitu dramaticky nižší (0,20 i méně) a velké množství záření odráží – termovizní kamery (přednastavené obvykle na emisivitu 0,95) pak detekují hlavně toto odražené záření, nikoliv vlastní záření předmětu, a udávají chybnou teplotu (obr. 2). Sledujeme-li tedy v rámci experimentu více různých předmětů, je třeba

zajistit, aby tyto měly přibližně stejnou (vysokou) emisivitu. Nejsnazší cestou je opatřit lesklé povrchy matným nátěrem.



Obr. 2: Na termofotografii vpravo jsou zachyceny zrcadlová a matně černá stěna Leslieho kostky (ta je ve viditelném spektru vlevo). Ačkoliv jsou obě stěny zahřáté na tutéž teplotu (cca 60 °C), zrcadlová stěna (vpravo) se díky své nízké emisivitě zdá být pro termokameru chladnější – odrazí totiž tepelné záření okolní místnosti (cca 25 °C).

## Experimenty s termovizní kamerou

Na rozličných webových stránkách (zejména anglicky psaných) lze dnes dohledat velké množství materiálů, které mohou být inspirací pro nové školní experimenty využívající termovizní kamery (např. [5]). Obvykle však jde o fotografie v infračerveném oboru, které pouze zachycují stav daného systému, statickou situaci. Cílem dále uvedených experimentů bylo naproti tomu zachytit tepelné děje, vývoj termodynamických systémů v čase.

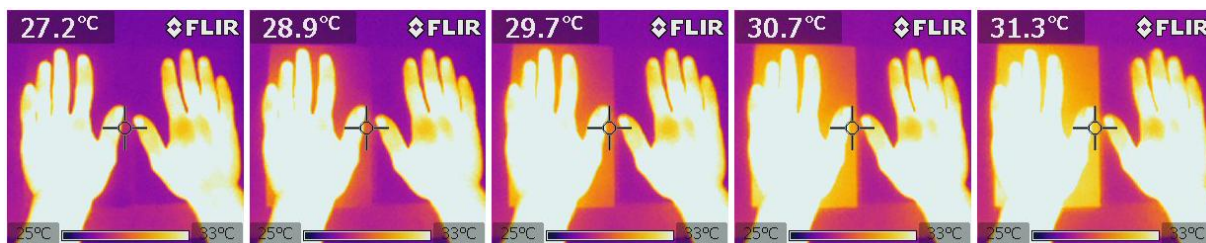
Pro tento účel byly vybrané děje natáčeny současně ve viditelném a infračerveném oboru (kamera FLIR i7 přitom neposkytuje možnost natáčení videí, pro získání infračerveného videa bylo tedy třeba klasickou kamerou kontinuálně snímat její displej). Výsledná dvojice videí zachycující tentýž jev pak byla formou tzv. PIP (picture-in-picture) sesazena do jediného videa, které umožňuje pohled na příslušný děj ve viditelném i infračerveném oboru zároveň.

### Tepelná vodivost plastu a kovu

*Pomůcky: termovizní kamera, kovová a plastová destička přibližně rozměru lidské dlaně (tip: v tomto experimentu použita polypropylenová destička byla vyříznuta z desek kancelářského rychlovazače)*

Velmi jednoduchým experimentem si můžeme názorně přiblížit rozdíl mezi tepelným vodičem a izolantem. Položíme současně jednu dlaň na kovovou a druhou dlaň na plastovou destičku a po dobu cca 20 sekund sledujeme obě destičky termovizní kamerou. Zatímco kovová destička se za tuto dobu téměř rovnoměrně prohřeje, plastová zvýší svoji teplotu pouze v místě kontaktu s přiloženou dlaní – plast coby tepelný

izolant neumožní distribuci tepelné energie do okrajových částí destičky (obr. 3). Když ovšem budeme po sejmutí dlaní z destiček hledat jejich absolutně nejteplejší místo, vždy jej najdeme právě na plastové destičce – izolant téměř neumožňuje vedení tepla, teploty v něm se tedy nemají jak vyrovnávat.



Obr. 3: Tepelná vodivost vizualizovaná pomocí termovizní kamery – vlevo kovová, vpravo plastová destička

### Přeměna kinetické energie na teplo

*Pomůcky: termovizní kamera, polystyrenová destička (např. od balených sýrů), gumová palice*

Přeměnu kinetické energie na energii potenciální či naopak předvedeme studentům velmi snadno, bohužel, v našem neideálním světě tento idealizovaný model nevysvětlí ani tak banální skutečnost, že kniha upuštěná na zem po svém dopadu zůstane bez hnutí ležet. V takových okamžicích se ve fyzice zaklínáme přeměnou kinetické energie na jakousi elastickou energii podložky a na teplo, ovšem ne vždy máme možnost toto tvrzení podložit na školní úrovni důkazem. Tento experiment může být za takový důkaz považován – je z něj zřejmé, že při každém úderu gumové palice do polystyrenové podložky se v místě impaktu zvyšuje teplota. Experiment lze provést i s obyčejným kladivem, pak je ale část tepla odvedena jeho kovovým tělem.

### Volný pád

*Pomůcky: termovizní kamera, polystyrenová destička, závaží 1 kg či těžší*

Jde o lehkou variaci na předcházející experiment, jen namísto dopadů gumové palice na nevodivou podložku zkoumáme dopad závaží padajícího volným pádem. I zde dojde v místě impaktu k lokálnímu zvýšení teploty.

### Tepelné účinky laseru

*Pomůcky: termovizní kamera, polystyrenová destička, laser (v tomto experimentu 532 nm a 5 mW, ale stačí i slabší)*

Nejeden fyzikář se ve své učitelské praxi setká během výkladu o laserových paprscích se zvědavou (a možná nějakým tím sci-fi filmem inspirovanou) otázkou, zda lze laserem či třeba laserovým ukazovátkem něco zapálit. Intuice studentům zřejmě říká, že koherentní světelný svazek by měl mít nějaké tepelné účinky, ale když si – třeba i silnějším laserem o výkonu 5 mW – posvítí na dlaň, žádný efekt necítí. To nás

ovšem jen máte naše tělo, resp. lidská kůže, která teplo rozvádí do okolí. Jestliže po-  
svítíme laserovým paprskem na tepelný izolant, např. výše zmíněnou polystyrenovou  
destičku, vzroste její teplota v místě dopadu paprsku během několika sekund řádově  
i o desítky stupňů Celsia. Protože užíváme monochromatické světlo, můžeme tak  
snadno vyvrátit mýtus, že tepelné účinky má pouze infračervená, nikoliv viditelná  
komponenta elektromagnetického záření.

### **Indukční vařič**

*Pomůcky: termovizní kamera, indukční vařič, hrnec s vodou*

Indukční vařič můžeme uvést jako jeden z mnoha příkladů využití principu elektro-  
magnetické indukce v praxi a v případě, že máme takový vařič k dispozici, můžeme  
jeho fungování předvést přímo ve třídě. Termovizní kamera nám pomůže ukázat, že  
při použití tohoto vařiče zůstává jeho plotna studená (a to tak, že na ni můžeme polo-  
žit ruku) a působením indukovaných proudů se zahřívá přímo dno hrnce s ohřívaným  
pokrmem – a to dokonce i tehdy, když se hrnec plotny vůbec nedotýká, ale pouze je  
v dosahu proměnného magnetického pole vařiče.

### **Závěr**

V příspěvku bylo představeno pět experimentů využívajících termovizní kameru pro  
sledování tepelných procesů. První čtyři z těchto experimentů lze provést i s termocit-  
livou folií vhodného teplotního rozsahu. Podrobnější materiály ke každému experi-  
mentu včetně jeho videozáznamu ve viditelném i infračerveném oboru se objeví  
během září 2014 na webových stránkách [6].

### **Poděkování**

*Prezentovaný příspěvek byl podpořen v rámci řešení projektu GA UK, číslo 1860214.*

### **Literatura**

- [1] Jak bylo objeveno infračervené záření [online]. Dostupné z:  
<http://fyzmatik.pise.cz/829-jak-bylo-objeveno-infracervene-zareni.html>  
[cit. 8. 8. 2014].
- [2] Malý, P.: Optika. Karolinum, Praha, 2008.
- [3] FLIR i-Series Infrared Camera Comparison Chart [online]. Dostupné z:  
<http://www.flir.com/thermography/americas/us/view/?id=54156&collectionid=601&col=54163> [cit. 9. 8. 2014].
- [4] Vollmer, M.; Möllmann, K.-P.: Infrared Thermal Imaging: Fundamentals,  
Research and Applications. John Wiley & Sons, 2010.
- [5] Infrared Gallery [online]. Dostupné z:  
[http://www.pbslearningmedia.org/asset/ess05\\_int\\_irgallery/](http://www.pbslearningmedia.org/asset/ess05_int_irgallery/) [cit. 9. 8. 2014].
- [6] Sběrka fyzikálních pokusů [online]. Dostupné z: <http://kdf.mff.cuni.cz/pokusy/>  
[cit. 10. 8. 2014].