

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta pedagogická

Diplomová práce

Experimenty s termokamerou ve školské fyzice

Magda Kubecová

Plzeň 2013

Prohlašuji, že jsem práci vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

V Plzni, 8.4. 2013.

Magda Kubecová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucí mé diplomové práce paní PhDr. Zdeňce Kielbusové, za odborné vedení, konzultace, cenné rady a připomínky, které mi v průběhu vypracování práce poskytla.

Obsah

1. Úvod.....	3 - 4
2. Fyzikální principy termografie a její historie.....	5
2.1. Teplota z pohledu termodynamiky a statistické fyziky, metody měření teploty	5 - 8
2.2. Záření absolutně černého tělesa.....	5 - 11
2.3. Stručný nástin historiografie termografie.....	11 - 14
3. Termokamera, technické aspekty problematiky.....	15
3.1. Termokamery obecně, jejich konstrukce a vlastnosti.....	15 - 16
3.2. Problematika emisivity a teploty odraženého záření, jejich vliv na přesnost měření	16 - 20
3.3. Termokamera thermoImager TIM 160 a software ke zpracování měření thermoIMAGER TIM Connect.....	20 - 21
4. Zajímavé pokusy s termokamerou ve školské fyzice, didaktické zásady a zařazení do výuky.....	22
4.1. Úvodní poznámky, rozčlenění experimentů do skupin.....	22 - 24
4.2. Experimenty zaměřené na sdílení tepla.....	24 - 29
4.3. Experimenty zaměřené na indukční ohřev.....	29 - 37
4.4. Vybrané experimenty z elektřiny a magnetismu.....	37 - 44
4.5. Další experimenty s termokamerou.....	44 - 48
4.6. Didaktické zásady při realizaci experimentů s termokamerou.....	48 - 49
5. Vybrané aplikace termografie.....	
5.1. Měření rychlých časových změn teploty – vysokorychlostní termografie.....	50 - 51
5.2. Měření malých teplotních rozdílů pomocí termografie.....	52 - 53
5.3. Užití termografie v boji proti požárům	53 - 54
6. Závěr.....	55 - 56

Přehled použité literatury.....	57 - 58
Seznam grafů, obrázků a tabulek v textu.....	59 - 61
Resumé.....	62

„Když je experimentální výsledek v rozporu s existující teorií, je na obzoru pokrok: Ukázala se totiž nutnost změnit a vylepšit teorii.“[1]



**Max Planck
(1858-1947)**

Obrázek 1: fotografie M. Plancka

1. Úvod

V této diplomové práci se budu zabývat problematikou využití termokamery pro experimenty ve školské fyzice. Ačkoliv termografie je velice rychle se rozvíjející oblast fyziky, která nachází stále významnější uplatnění v mnoha aplikacích, ve školské fyzice v ČR tomuto tématu zatím nebyla věnována prakticky žádná pozornost. Jinak je tomu například v Německu, kde byla v uplynulém desetiletí prezentována na konferencích didaktiků fyziky či publikována v odborných časopisech řada prací zabývajících se touto problematikou. Myslím si, že by byla škoda, aby čeští učitelé neměli k dispozici ucelený materiál, který by jim pomohl snáze realizovat mnohdy velice atraktivní experimenty s termokamerou v případě, že by se jim podařilo získat příslušné, ekonomicky poměrně nákladné vybavení, získat (vzhledem k existenci různých programů zaměřených na podporu výuky přírodovědných oborů na školách to nemusí být i přes poměrně značnou cenu termokamery rozhodně vyloučené). Mým cílem tudíž bylo vytvořit materiál, kde by byly jednak stručně zmíněny fyzikální principy metody a její konkrétní aplikace, především by zde však byl uveden dostatečně podrobný návod na realizaci vybraných experimentů včetně rozboru didaktických zásad a jejich případného zařazení do hodin fyziky.

Z tohoto cíle se odvíjí i struktura předkládané práce v 2. kapitole (po úvodu) budu diskutovat pojem teploty z hlediska termodynamiky a okrajově statistické fyziky a uvedu zde některé klasické metody měření teploty. Následně se zaměřím na problematiku záření absolutně černého tělesa a zmíním významné fyzikální zákony dávající teoretický základ celé termografii. Ve stručnosti také budu komentovat historický vývoj této disciplíny.

3. kapitola bude zaměřena na základní popis funkce termokamery a diskuzi toho, co je vlastně možné pomocí různých typů termokamer měřit. Zvláštní pozornost bude věnována problematice emisivity a teploty odraženého záření, jejichž správné určení je jednoznačně největším problémem při konkrétním kvantitativním termografickém měření. Konečně zde bude podrobně popsána termokamera thermoImager TIM 160, která byla pro účely této diplomové práce zapůjčena z výzkumného centra Nové technologie na Západočeské univerzitě v Plzni a software thermoIMAGER TIM Connect, jenž sloužil ke zpracování naměřených hodnot.

Klíčovou částí práce je 4. kapitola, v níž budou představeny návody ke konkrétním experimentům, jež je možné s termokamerou ve školském prostředí realizovat. Jejich seznam určitě není vyčerpávající a kreativní učitel může paletu realizovaných pokusů znatelně rozšířit na základě vlastního uvážení. Po úvodních poznámkách a rozčlenění jednotlivých pokusů do několika skupin, provedenému s cílem o větší přehlednost práce, jsou již uvedeny jednotlivé experimenty. Vždy je prezentován samotný návod na realizaci, fyzikální vysvětlení a poznámky, jejichž cílem je předejít případným problémům při realizaci pokusu či znehodnocení získaných výsledků. Součástí této kapitoly je i uvedení základních didaktických zásad při realizaci pokusů .

Konečně v 5. kapitole je věnována pozornost třem významným aplikacím termografie. Na konkrétních případech z praxe je demonstrováno, kdy je využití této metody výhodné, a kdy se jedná v podstatě o jedinou cestu, jak získat důležité údaje o teplotě systému během určitého procesu. Tato část má sloužit především jako ilustrace významu popisované metody, jejíž užití je samozřejmě podstatně širší.

Na závěr je provedeno stručné shrnutí výsledků práce a jsou uvedeny některé další náměty, jimiž by bylo možné a vhodné se v této souvislosti zabývat. Věřím, že si tato práce najde čtenáře mezi učiteli základních a středních škol a snad alespoň částečně přispěje k zatraktivnění výuky fyziky na nich.

2. Fyzikální principy termografie a její historie

2.1. Teplota z pohledu termodynamiky a statistické fyziky, metody měření teploty

V této diplomové práci se zabývám **termografií** čili bezkontaktním měřením rozložení teploty na povrchu tělesa. Proto je třeba uvést, jakým způsobem je vlastně teplota ve fyzice chápána a jak probíhá její měření klasickými způsoby.

Ačkoliv se s pojmem teplota setkává člověk od útlého věku, jeho uchopení ve fyzice není úplně jednoduché. V termodynamice se vychází z tzv. **0. termodynamického zákona**, podle něhož je tělesům, které jsou při vzájemném dotyku v rovnovážné stavu přiřazena stejná teplota. Někdy je uváděn 0. termodynamický zákon také v tomto tvaru, že relace „býti ve vzájemné termodynamické rovnováze“ je relací tranzitivní, jinými slovy, je-li těleso A v rovnováze s tělesem B a těleso B s tělesem C, jsou pak ve vzájemné rovnováze i tělesa A a C a je jim přiřazena stejná teplota. Je důležité říct, že teplota je tzv. **stavová veličina**, čímž se liší od tepla, které je naopak vždy vztaženo k určitému ději. Z hlediska termodynamiky to znamená, že diferenciál teploty dT je tzv. úplným diferenciálem na rozdíl od diferenciálu tepla dQ , který je neúplný. Při znalosti dostatečného počtu dalších stavových veličin je možné teplotu určit pomocí tzv. **stavové rovnice**, z nichž nejznámější je stavová rovnice ideálního plynu uváděná zpravidla ve tvaru $pV = nRT$, kde p je tlak, V objem nádoby, n látkové množství, R universální plynová konstanta ($R = 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) a T termodynamická teplota.

K tomu, abychom mohli teplotu vyjádřit kvantitativně, musíme mít k dispozici nějakou **teplotní stupnici**. První teplotní stupnice se objevovaly v 17. století, v pozdější době se poté dostaly do popředí především tzv. Celsiova teplotní stupnice a Fahrenheitova teplotní stupnice. Obě vycházejí ze dvou základních bodů, přičemž u Celsiovy stupnice se jedná o bod tání ledu ($0 \text{ }^\circ\text{C}$) a bod varu vody ($100 \text{ }^\circ\text{C}$) při standardním atmosférickém tlaku, u stupnice Fahrenheitovy hrály v prvotní verzi základní roli teploty tání daného roztoku soli ve vodě ($0 \text{ }^\circ\text{F}$) a teplota lidského těla ($98 \text{ }^\circ\text{F}$). Zásadní nevýhodou obou stupnic je skutečnost, že jejich základní referenční body jsou závislé na tlaku, přičemž kvantitativně je možné tuto závislost popsat pomocí tzv. **Clausiovy-Clapeyronovy rovnice** známé z termodynamiky.

Tuto nevýhodu odstranilo zavedení tzv. Kelvinovy (nebo též termodynamické) teplotní stupnice. Ta je definována opět pomocí dvou základních bodů, které však již nejsou na tlaku závislé a mají fundamentální fyzikální význam. Jedná se o:

1) tzv. **trojný bod vody**, který odpovídá situaci, kdy jsou v termodynamické rovnováze všechna tři základní skupenství vody, tj. led, kapalná voda a vodní pára. Tato rovnováha v souladu s tzv. Gibbsovým fázovým pravidlem nastává při přesně definovaném tlaku 610,6 Pa a teplotě, jež je na Celsiově stupnici udána hodnotou 0,01 °C

2) tzv. absolutní nulu, což je podle **3. termodynamického zákona** nejnižší principiálně fyzikálně dosažitelná teplota, na Celsiově stupnici odpovídá hodnotě - 273,15 °C

Absolutní nule byla přiřazena teplota 0 K (nula Kelvinů), trojnému bodu vody poté ve snaze dodržet číselně stejné rozdíly mezi stupni Celsia a stupni Kelvina hodnota 273,16 K. Termodynamická teplotní stupnice je vzhledem ke způsobu své konstrukce z pohledu fyziky zásadní a vede k definici základní fyzikální veličiny **termodynamická teplota**. Její jednotka 1 Kelvin je následně v souladu s výše uvedeným definována je 1/273,16 díl teploty trojného bodu vody. Připravuje se přitom nová definice 1 Kelvinu, jež by se měla opírat o pevně stanovenou hodnotu Boltzmanovy konstanty, což je v souladu se snahou o definování základních fyzikálních veličin právě pomocí fundamentální fyzikálních konstant, což je v souladu se závěry 24. všeobecné konference o mírách a váhách, která se konala na podzim roku 2011 [1i].

Ve fyzice se tradičně pracuje s termodynamickou teplotou, která vystupuje ve všech významných fyzikálních vztazích, kde se teplota objevuje. Dosazení teploty ve stupních Celsia vede často (nikoliv v případech, kdy se zabýváme pouze změnou teploty, protože ta je u Celsiovy a termodynamické stupnice z definice stejná) k nesprávným výsledkům a nesmyslným závěrům. Z mikroskopického hlediska, jímž se zabývá tzv. **statistická fyzika**, lze teplotu chápat jako míru střední kinetické energie částic. Úzce to souvisí s tzv. **ekvipartičním teorémem**, podle něhož na 1 stupeň volnosti připadá střední energie $E = \frac{1}{2} kT$, kde k je Boltzmannova konstanta a T termodynamická teplota. Pokud budeme uvažovat jednoatomové molekuly ideálního plynu mající 3 stupně volnosti a nulovou potenciální energii, je možné dát do souvislosti teplotu se střední rychlostí atomů pomocí jednoduchého vztahu vycházejícího z toho, že kinetická energie je 3/2 kT.

V některých oblastech fyziky se výše uvedeného faktu využívá v tom smyslu, že teplota je běžně uváděna v elektronvoltech, tedy v jednotkách energie. Fyzikálně se jedná o správný a opodstatněný postup, ačkoliv se asi těžko může prosadit v běžném životě, kde jsme zvyklí na používání klasických teplotních stupnic.

Měření teploty

Měření teploty na definované teplotní stupnici lze provést různými způsoby. Zařízení sloužící k měření teploty se nazývá **teploměr**, obor zabývající se měřením teploty poté **termometrie**. Nejčastěji je toto měření založeno na změně objemu nějaké látky v důsledku změny teploty, což se používá u tzv. **dilatačních teploměrů**. Touto látkou může být kapalina (např. u klasických rtuťových teploměrů), plyn (u plynových teploměrů využívajících závislost tlaku plynu na teplotě při stálém objemu či objemu plynu na teplotě při stálém tlaku) nebo pevná látka (pro dosažení větší citlivosti typicky v bimetalových teploměrech, kde se využívá rozdílné teplotní roztažnosti dvou různých kovů).

Většinou se uvažuje, že objem (či délka) závisí na teplotě lineárně. Tento předpoklad je celkem oprávněný v malých teplotních rozmezech, pokud však měříme ve velkých rozmezech teplot, dochází k významným odchýlkám, protože závislost přestává být lineární a je třeba ji vyjádřit nějakým obecnějším polynomem n-tého stupně. Měření teploty může být založeno i na změně odporu vodiče či polovodiče v závislosti na teplotě, čehož se využívá u odporových resp. polovodičových teploměrů. U odporových teploměrů je závislost poměrně s dobrou přesností lineární, nevýhodou je však malá citlivost, neboť i odpovídající změna odporu je malá a těžko měřitelná. Naopak u polovodičových teploměrů je závislost na teplotě podstatně výraznější a měření tudíž citlivější, nevýhodou je naopak výrazně nelineární závislost. Velmi často se užívá k měření teploty tzv. **termoelektrický jev**, který odpovídá vzniku elektrického napětí úměrného rozdílu teplot v oblasti dotyku dvou různých kovů. Na tomto principu fungují tzv. termočlánky, jichž je poměrně značné množství a liší se jak citlivostí, tak i rozsahem měřitelných teplot a cenou. V prvním přiblížení lze opět chápat elektrické napětí jako přímo úměrné rozdílu teplot, pro větší rozmezí měření je třeba uvážit i nelineární závislost. Existují i různé speciální typy teploměrů, např. tzv. maximo-minimální teploměr ve tvaru „U“, který si pamatuje maximální a minimální dosaženou teplotu za sledované období a používá se např. v meteorologii.

Všechny dosud popisované metody měření teploty jsou kontaktní, vyžadují tedy přímý dotek měřicího zařízení (teploměru) a tělesa, jehož teplotu stanovujeme. Navíc je třeba, aby mezi oběma uvažovanými objekty nastala termodynamická rovnováha, což zpravidla určitou dobu trvá. Není tudíž možné odpovídajícím způsobem zachytit případné rychlé změny teploty, k nimž v řadě případů může docházet. Navíc existují situace, kdy není kontaktní měření možné použít z toho důvodu, že je místo, kde chceme určit teplotu nedostupné, nebo kdy by umístění teploměru, jež je vždy spojené s určitou tepelnou výměnou, výrazně ovlivnilo měřenou hodnotu. V takovém případě se dostává ke slovu bezkontaktní měření teploty založené na tom, že objekty jsou zdrojem elektromagnetického záření, jehož vlastnosti jsou (mimo jiné) dány právě teplotou daných objektů. Toto bezkontaktní měření teploty umožňují tzv. pyrometry, z nichž první byl vynalezen Pietrem van Muschenbroeckem v 18. století. Pyrometry se dělí na přímo měřící v jednom bodě (pro ně se používá rovněž výraz pyrometr, ovšem v užším smyslu slova) a zobrazovací umožňující znázornit rozložení teploty ve větším prostoru. Právě tento druhý typ odpovídá termokameře. V následující podkapitole popíšeme fyzikální zákony zabývající se zářením tzv. absolutně černého tělesa a naznačíme, jak lze tyto zákony aplikovat v případě reálných těles.

2.2. Záření absolutně černého tělesa

Již v druhé polovině 19. století bylo známo, že všechna tělesa vyzařují elektromagnetické záření. Intenzita vyzařování M_e , jež je definována jako množství energie vyzařené z jednotkové plochy za jednotku času, přitom prudce roste s rostoucí teplotou povrchu těles a obecně platí, že tělesa zahřátá na vyšší teploty vyzařují na vyšších frekvencích a tudíž nižších vlnových délkách. Cílem fyziků v té době bylo zjistit, jak konkrétně je rozdělena intenzita vyzařování pro těleso o dané teplotě mezi jednotlivé vlnové délky, jinými slovy, jaká je tzv. spektrální hustota vyzařování M_e , jíž lze vyjádřit jako funkci vlnové délky λ jako $M_e(\lambda) = dM_e/d\lambda$ popř. jako funkci frekvence ν jako $M_e(\nu) = dM_e/d\nu$. Pomocí dobře známého vztahu mezi frekvencí, vlnovou délkou a rychlostí světla $\nu = c/\lambda$ se dá s využitím derivace složené funkce snadno ukázat, že mezi oběma vyjádřeními platí vztah:

$$M_{e\nu} = M_{e\lambda} \cdot \frac{c}{\lambda^2}.$$

Pro jednoduchost byla popisovaná spektrální hustota vyzařování hledána nejprve pro tzv. **absolutně černé těleso**, což je těleso, které pohlcuje veškerý zářivý tok, který na něj dopadá. Absolutně černé těleso si je možné zjednodušeně představit např. jako duté těleso s velmi malým otvorem. Všechno záření, které vniká do dutiny, zůstává uvnitř a postupně je stěnami pohlcováno. Záření, které z dutiny uniká přes malý otvor, má vlastnosti blízké záření absolutně černého tělesa. Absolutně černým tělesem je s velmi dobrou přesností i Slunce, protože jeho povrch si vzhledem k obrovskému objemu této hvězdy můžeme představit v podstatě právě jako výše uvažovaný malý otvor. Stanovit spektrální hustotu vyzařování, která by dobře vystihovala naměřená data v celém rozsahu frekvencí se fyzikům na konci 19. století dlouho nedařilo, ačkoliv tomuto tématu byla tehdy věnována značná pozornost. Wilhelm Wien odvodil v roce 1896 tzv. **Wienův zákon** ve tvaru

$$M_{\nu} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h}{c^2} \cdot e^{-\frac{h\nu}{kT}},$$

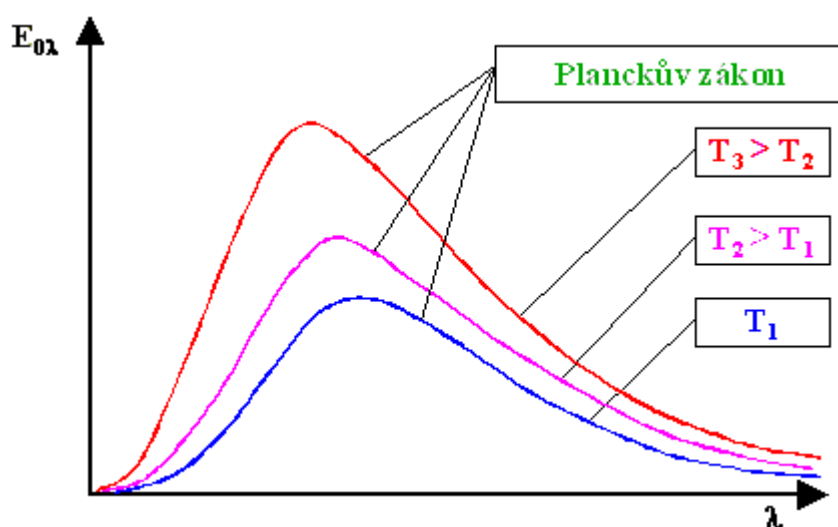
kde T je termodynamická teplota, c je rychlost světla ve vakuu, h je Planckova konstanta (to však W. Wien v době nalezení zákona nevěděl pro něj to byla nějaká obecná konstanta) a ν je frekvence záření. Tento zákon dobře fungoval pro vysoké frekvence, ale zcela selhával při popisu spektrální intenzity vyzařování při malých frekvencích. Na druhé straně Rayleigh a Jeans odvodili v roce 1900 tzv. **Rayleighův-Jeansův zákon** ve tvaru:

$$M_{\nu} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T}{c^2} \cdot \nu^2,$$

který velmi dobře fungoval pro malé frekvence záření. Pro vysoké frekvence záření se však odchyloval od naměřených údajů a navíc pro frekvenci jdoucí k nekonečnu rostla spektrální hustota vyzařování nade všechny meze, což je ve zjevném rozporu s realitou. Pro tuto odchylku teorie od fyzikální reality se vžil název ultrafialová katastrofa. Vzniklý problém vyřešil Max Planck, který v prosinci roku 1900 formuloval tzv. **Planckův vyzařovací zákon** ve tvaru:

$$M_{\nu} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h}{c^2} \cdot \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

Rozdíl od obou předchozích zákonů, jež způsobil, že Planckův zákon byl ve shodě s naměřenými údaji, spočíval v tom, že Planck předpokládal, že elektromagnetické záření je kvantováno, přičemž energie 1 kvanta je dána vztahem $E = h\nu$, kde h je tzv. Planckova konstanta, jejíž konkrétní hodnota je $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Později se ukázalo, že Planckův zákon je vlastně přímým důsledkem tzv. Boseho-Einsteinova rozdělení známého ze statistické fyziky. Konkrétní průběh spektrální hustoty vyzařování v závislosti na frekvenci je pro různé teploty schematicky znázorněn na obrázku 2.



Obrázek 2: Schematické znázornění Planckova zákona

Integrací spektrální hustoty vyzařování v mezích od nuly do nekonečna dostaneme celkovou intenzitu vyzařování, která je popsána tzv. **Stefanovým-Boltzmanovým zákonem** známým již od roku 1884:

$$M_e = \sigma \cdot T^4.$$

Zde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). Z výše uvedeného Wienova zákona lze klasickým postupem pro hledání maxima funkce snadno odvodit tzv. **Wienův posunovací zákon** (ten lze principiálně samozřejmě odvodit i ze správného Planckova zákona, problém je v tom, že při derivování se dostaneme k rovnici, která není analyticky řešitelná) ve tvaru:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}.$$

Zde b je konstanta ($b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$). Zásadní význam Wienova posunovacího zákona spočívá v tom, že dává do souvislosti vlnovou délku, na které těleso vyzařuje maximálně a teplotu tělesa. Díky tomuto zákonu je možné při znalosti spektrální hustoty intenzity vyzařování pro dané těleso stanovit jeho povrchovou teplotu. Právě to je principem termografie. Je známo, že právě tímto způsobem lze poměrně dobře stanovit např. povrchovou teplotu Slunce. Zdůrazněme, že získáváme “pouze” informaci o teplotě povrchu, Wienův posunovací zákon nám neříká vůbec nic o tom, jaká je teplota ve vnitřních oblastech daného tělesa.

Jak již bylo uvedeno, výše uvedené vztahy platí pouze pro absolutně černé těleso. Reálná tělesa pohlcují pouze část dopadajícího zářivého toku, nazýváme je proto tělesa šedá a zavádíme pro ně veličinu **pohltivost** α , jež je definována jako podíl skutečného pohlceného zářivého toku daným tělesem ku zářivému toku, které by pohltilo stejně velké absolutně černé těleso za jinak stejných podmínek [1]. Z této definice je patrné, že pohltivost je reálné číslo z intervalu $\langle 0;1 \rangle$, absolutně černé těleso má poté zjevně pohltivost 1. Z hlediska termografie však není ani tak důležité to, co dané těleso pohltí jako spíše to, co vyzáří. To popisuje veličina nazývaná **emisivita**, která je definována jako podíl zářivého toku vyzářeného daným šedým tělesem k zářivému toku stejně velkého absolutně černého tělesa za jinak stejných podmínek. Opět je zjevné, že emisivita je číslo z intervalu $\langle 0;1 \rangle$, absolutně černé těleso má poté emisivitu rovnu 1. Pohlcování a vyzařování spolu úzce souvisí a podle tzv. **Kirchhoffova zákona** je emisivita daného tělesa stejně velká jako jeho pohltivost. Emisivita má pro termografii zásadní význam a my se jí budeme podrobněji zabývat v podkapitole 3.2.

2.3. Stručný nástin historiografie termografie

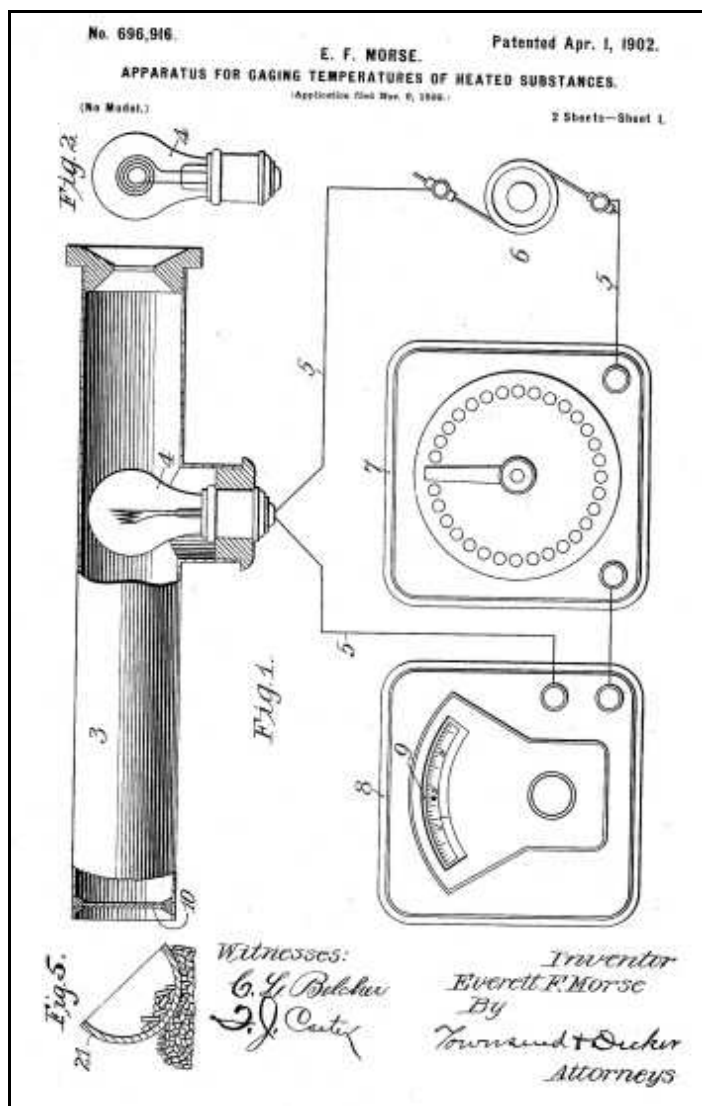
Termografie se zabývá určením prostorového rozložení povrchové teploty na základě záření vycházejícího z daného tělesa, jehož maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování a celková intenzita vyzařování podle výše uvedených zákonů úzce souvisí právě s povrchovou teplotou. Pro naprostou většinu těles, s nimiž se můžeme setkat, se uvedené maximum nachází v infračervené oblasti spektra. V důsledku toho se často mluví o tzv. **infračervené termografii**.

Infračervené záření objevil náhodou v roce 1800 britský astronom Frederik Viliam Herschel, který proslul mimo jiné i jako objevitel planety Uran z roku 1781. Herschel

testoval filtry, s nimiž chtěl pozorovat skvrny na Slunci. Za pomoci optického hranolu rozložil světlo přicházející ze Slunce a měřil teplotu jednotlivých barevných složek spektra. Poté, co zjistil, že teplota roste směrem k červenému okraji spektra, ho napadlo dát pro kontrolu teploměr ještě dále za červený okraj spektra. Překvapivě se ukázalo, že tento teploměr ukázal ještě vyšší teplotu, což znamenalo, že Slunce vysílá vedle viditelného světla ještě další druh záření, jímž přenášená energie je dokonce vyšší než u viditelného světla. Z dnešního pohledu se jedná o přirozený důsledek Wienova posunovacího zákona, tehdy se však jednalo o velmi překvapivé pozorování.

Úvahy o využití elektromagnetického záření a především jeho infračervené složky k měření teploty se začaly objevovat po roce 1884, kdy byl objeven Stefanův-Boltzmannův zákon. V roce 1892 byl poté zkonstruován francouzským průmyslníkem Le Chatelierem vůbec první infračervený pyrometr založený na tomto principu. Vylepšená verze tohoto pyrometru byla patentována v roce 1899 Morseem (viz obr. 3) a nezávisle na něm vyvinuli pyrometr fungující na podobném principu Holborn a Kurlbaum. Tyto pyrometry měřili teplotu vždy jen v jednom bodě, nejednalo se tedy ještě o přímé předchůdce termokamery, která snímá teploty z většího prostoru a graficky je zpracovává.

Za jejího předchůdce naopak lze považovat infračervený detektor patentovaný v roce 1913 Bellighamem, jenž sloužil primárně k vyhledávání ledovců na moři [2i]. Jeho výhodou bylo, že dokázal zjednodušeným způsobem zobrazit tělesa, jež byla podstatně chladnější než okolní prostředí, což ledovce pochopitelně splňují. Zajímavostí je, že tento objev přišel rok po zkáze Titaniku, jenž byla způsobena právě srážkou s ledovcem. Je pravděpodobné, že kdyby posádka měla k dispozici tento detektor, bylo by možné katastrofě zabránit. V roce 1929 zkonstruoval maďarský fyzik Kalmán Tihanyi jednoduchou infračervenou kameru, která měla sloužit pro účely protiletectvé obrany v Británii.



Obrázek 3: První patentovaný infračervený pyrometr (Morse, 1899)

První termokamera odpovídající svojí funkcí dnešním standardům poté byla zkonstruována v roce 1956. Od konce 50. let se termografie velmi intenzivně rozvíjí a proniká do různých oblastí výzkumu. Například v roce 1957 bylo zjištěno, že teplota pokožky při rakovině prsu je o něco vyšší než je normální stav, přičemž tento příznak je možné pozorovat podstatně dříve, než klasické projevy této nemoci. V důsledku toho začala být intenzivně zkoumána využitelnost termografie v této oblasti a od 70. let se jedná o celkem běžnou diagnostickou metodu dostupnou v mnoha nemocnicích. Vývoj termografie se s postupným rozvojem počítačů ubíral mnoha směry a postupně se objevovaly stále kvalitnější termokamery dosahující větší rychlosti a lepší citlivosti. I přesto zůstává v termografii řada problémů souvisejících především s měřením povrchů vykazujících velmi malou emisivitu, kde je přesnost měření stále nedostatečná. Na

závěr této podkapitoly uvedme některé výhody a nevýhody termografie tak, jak jsou chápány v současné době.

Výhody termografie

- je možné zobrazit rozložení teploty na poměrně velké ploše
- je možné měřit velmi rychlé změny teploty
- měření je možné provést i v nedostupných místech
- jedná se o nedestruktivní měřicí techniku minimálně ovlivňující měřený objekt

Nevýhody termografie

- jedná se stále o poměrně nákladnou technologii, z čehož vyplývá vysoká cena termokamer
- přesnost měření je silně ovlivněna mnohdy těžko určitelnou emisivitou povrchu a odraženým zářením
- je možné měřit pouze povrchovou teplotu, nikoliv teplotu uvnitř tělesa

3. Termokamera, technické aspekty problematiky

3.1. Termokamery obecně, jejich vlastnosti

V současné době působí na trhu značné množství firem (např. švédský FLIR, německý Infratech či Vesto nebo čínský UlirVision) vyrábějících různé termokamery lišící se jak svými parametry, tak i cenou. Cílem této podkapitoly je uvést základní informace o jednotlivých parametrech termokamer a stručně diskutovat jejich význam pro jednotlivé aplikace. Obecně platí, že srdcem termokamery je detektor, který zaznamenává dopadající elektromagnetické záření. Detektory lze rozdělit na dva základní typy: **tepelné** a **kvantové**. Tepelné detektory se používají v přenosných a stacionárních termokamerách nejnižší až střední třídy s cenami do cca 650 000 Kč. Kvantové detektory se používají u termokamer nejvyšší třídy s nejlepšími parametry. Od kvantových detektorů lze očekávat především menší chybu měření a větší citlivost [3i].

Významným parametrem detektoru je jeho rozlišení udávající počet bodů, do nichž bude rozdělena snímaná plocha. Čím větší je rozlišení termokamery, tím větší detaily při zachování vzdálenosti dokážeme na daném objektu zachytit. Standardní je v současné době rozlišení 640 x 480 pixelů, existují však i kamery s podstatně menším rozlišením (např. pouze 60 x 60, což je hodnota typická např. pro relativně levné termokamery vhodné např. pro potřeby diagnostiky a údržby elektrických strojů a zařízení, při kontrole elektrických rozvaděčů, svorkovnic a rozvodů apod.), ale i kamery mající rozlišení podstatně větší (např. 1280 x 1024 pixelů u velmi moderních a drahých kamer dosahujících vysoké citlivosti a uplatňujících se především v oblasti vědy a výzkumu a ve vojenských aplikacích).

Dalším velmi významným parametrem vedle rozlišení je teplotní rozsah, v němž lze měřit. Klasicky se pohybuje od mírných záporných hodnot (např. -20 °C) do několika set °C. Lze však najít speciální termokamery schopné měřit s dostatečnou přesností teploty v řádu tisíců stupňů Celsia. Důležitým parametrem je také citlivost definovaná jako nejmenší rozdíl teplot, který je schopná daná termokamera zachytit. Citlivost je obecně závislá na teplotě a pro klasické teploty v řádu desítek stupňů Celsia se u kvalitních termokamer typicky pohybuje v řádu setin stupně Celsia. S citlivostí samozřejmě úzce souvisí i přesnost měření. U termokamer sloužících ke sledování rychlých změn teploty je klíčovým kritériem vzorkovací frekvence udávající počet snímků vytvořených za jednu sekundu. Typicky se maximální hodnota pohybuje v řádu

desítek Hz, jsou však termokamery dosahující frekvence až 1000 Hz. Dalším faktorem je to, jakým způsobem je zaznamenáván průběh teploty ve sledované oblasti. Klasicky je možné nastavit buď měření maxima nebo minima, popř. průměrování teploty za danou oblast. Některé termokamery však dokáží měřit maximum i minimum zároveň, případně určovat další statistické charakteristiky rozložení teploty ve sledované oblasti.

Důležité je samozřejmě i to, v jakém rozsahu vlnových délek daná termokamera měří. Typicky se jedná o určitý podinterval v rámci intervalu 1 až 14 μm , u termokamer s tepelným detektorem je typické rozmezí 8 až 14 μm . Významná je samozřejmě i role optiky, u níž nás zajímá hlavně to, jestli příslušná termokamera umožňuje výměnu objektivu (to má velký význam, pokud pro některý účel potřebujeme objektiv s jiným zorným polem), zda je zde možnost ostření, jenž většinou chybí u nejlevnějších modelů, zatímco modernější a nákladnější typy umožňují dokonce digitální zoom a velikost zorného pole. Zorné pole objektivu volíme s ohledem na velikost objektu a vzdálenost, z níž provádíme příslušné měření. Další vlastnosti optiky jako je například útlum či odrazivost jsou v podstatě již zakomponovány v jiných parametrech termokamery (především v citlivosti a přesnosti měření).

V některých konkrétních situacích je pak přinejmenším stejně důležitým kritériem jako nejrůznější technické parametry velikost a hmotnost termokamery resp. náročnost manipulace s ní. To platí např. při využití termografie při hledání osob v silně zakouřených prostorách během požárů, jímž se budeme zabývat v podkapitole 5.3.

3.2. Problematika emisivity a teploty odraženého záření, jejich vliv na přesnost měření

Emisivita definovaná v podkapitole 2.2. je zásadním parametrem majícím vliv na přesnost měření. Obecně platí, že čím nižší je hodnota emisivity, tím méně přesné měření je. Klesá totiž zářivý tok emitovaný přímo sledovaným povrchem tělesa a naopak roste odražený zářivý tok, který je potřeba zohlednit. Ukazuje se, že pro korektní určení teploty je bezpodmínečně nutné nastavit na termokameře správnou hodnotu emisivity sledovaného povrchu, v opačném případě je možné dostat zcela nesmyslné výsledky. Určení emisivity však není vůbec jednoduché, protože závisí na celé řadě parametrů jako je teplota povrchu, vlnová délka emitovaného záření, úhel, pod nímž záření měříme, geometrie povrchu, případná povrchová úprava materiálu apod.

Typicky platí, že nejmenší emisivity mají leštěné povrchy kovů, kde je hodnota mnohdy menší než 0,1, pro upravený povrch zlata se dokonce uvádí i hodnota 0,01. V takových případech je extrémně náročné a někdy bez dostatku zkušeností prakticky nemožné měření provést správně. Naopak znatelně větší emisivitu mají oxidované povrchy kovů a emisivita nekovových materiálů se mnohdy pohybuje v poměrné blízkosti hodnoty 1 odpovídající absolutně černému tělesu. Přibližné údaje o emisivitě jednotlivých materiálů jsou uvedeny v tabulce 1.

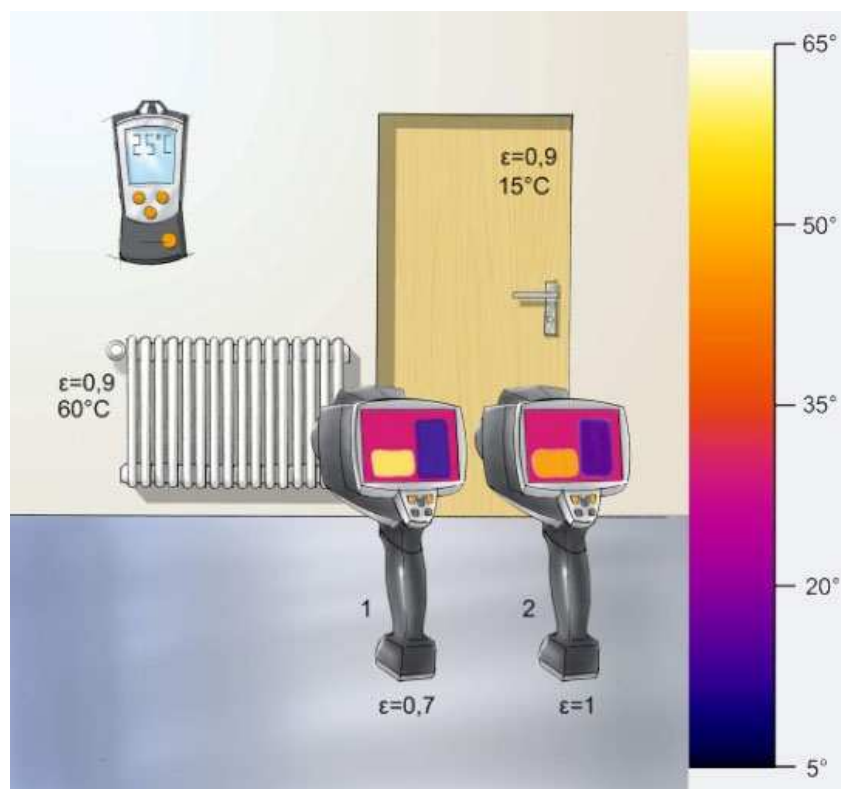
materiál	typická emisivita	materiál	typická emisivita
hliník leštěný	0,02-0,1	ocel oxidovaná	0,7-0,9
hliník oxidovaný	0,2-0,4	titan leštěný	0,05-0,2
mosaz leštěná	0,01-0,05	titan oxidovaný	0,5-0,6
mosaz oxidovaná	0,5	sklo	0,85
měď leštěná	0,03	keramika	0,95
měď oxidovaná	0,4-0,8	dřevo	0,9-0,95
železo leštěné	0,05-0,2	voda	0,93
železo oxidované	0,5-0,9	papír	0,95
ocel leštěná	0,1	písek	0,9

Tabulka 1: Typické emisivity vybraných materiálů (převzato z [2])

Vraťme se k tomu, jakým způsobem stanovit emisivitu daného povrchu, kterou je potřeba nastavit na termokameře. V zásadě existují 2 rozdílné přístupy:

1) Měříme teplotu povrchu nějakým spolehlivým teploměrem a hodnotu emisivity v nastavení termokamery upravujeme tak dlouho, dokud nebude ukazovat stejnou hodnotu jako kontaktní teploměr. V okamžiku, kdy dosáhneme shody, je aktuálně nastavená emisivita ta správná a můžeme s ní dále pracovat. Tento přístup lze samozřejmě použít pouze v případech, kdy jsme schopni dostatečně přesně měřit povrchovou teplotu konvenčním teploměrem

2) Na měřený objekt nalepíme speciální pásku pro úpravy emisivity, u níž je hodnota emisivity udána výrobcem. Po určité chvíli změříme termokamerou teplotu povrchu měřeného objektu v místě nalepení při nastaveném stupni emisivity lepící pásky. Získáme tak referenční teplotu. Dále regulujeme nastavení stupně emisivity, dokud nebude termokamera měřit na nezalepené oblasti povrchu měřeného objektu stejnou teplotu, jako je právě naměřená referenční teplota. Aktuálně nastavená emisivita je stupeň emisivity povrchu měřeného objektu. Alternativně k lepící pásce pro úpravu emisivity je možné rovněž natřít měřený objekt lakem nebo barvou se známou emisivitou popř. natřít měřený objekt silnou vrstvou ($> 0,13$ mm) žáruvzdorného oleje, jehož emisivita je zhruba 0,82.



Obrázek 4: Znázornění vlivu nastavení emisivity na přesnost měření

Negativní vliv chybně nastavené emisivity sledovaného povrchu na výsledek měření je ilustrován obrázkem 4. Na něm je vidět, že u teploty měřeného objektu vyšší, než je teplota okolí (viz topení na obr. 4):

- z nastavení příliš vysokého stupně emisivity vyplývá zobrazení příliš nízké teploty (viz kamera 2).

- z nastavení příliš nízkého stupně emisivity vyplývá zobrazení příliš vysoké teploty
(viz kamera 1).
- Naopak u teploty měřeného objektu nižší, než je teplota okolí (viz dveře na obr. 4):
- z nastavení příliš vysokého stupně emisivity vyplývá zobrazení příliš vysoké teploty
(viz kamera 2).
- z nastavení příliš nízkého stupně emisivity vyplývá zobrazení příliš vysoké teploty
(viz kamera 1).

Druhým faktorem ovlivňujícím přesnost měření je tzv. **teplota odraženého záření**, jež je dána teplotou dalších těles v měřeném emitujících záření, které se následně odráží a dostává se do termokamery společně se zářením přicházejícím z daného objektu. V ideálním případě, kdy se nám podaří odstranit všechny možné zdroje rušení, je teplota odraženého infračerveného záření rovna okolní teplotě, kterou změříme klasickým způsobem. Existují-li však v okolí měření další významné zdroje infračerveného záření, je nutné teplotu odraženého záření stanovit jiným způsobem. K tomu lze použít např. tzv. Lambertův zářič. To je objekt, který ideálně difúzně (tedy stejně silně ve všech směrech) odráží dopadající záření. Pro tento účel se dobře hodí jako náhrada za Lambertův zářič zmačkaná a opět narovnaná hliníková folie. Fólie má vysoký stupeň odrazu a díky zmačkané struktuře se záření odráží téměř ideálně difúzně. Pro měření teploty odraženého záření je vhodné položit folii do blízkosti měřeného objektu případně rovnou na plochu měřeného objektu. Potom na něm je třeba změřit teplotu při nastavené emisivitě 1. Kamera následně vypočítá teplotu záření, které na ni dopadá. Právě tuto hodnotu následně zadáme do termokamery jako teplotu odraženého záření a s dříve nastaveným stupněm emisivity povrchu měřeného tělesa můžeme provést měření teploty. Obecně platí, že čím menší je emisivita povrchu sledovaného povrchu, tím větší je vliv teploty odraženého záření. Přesnost měření pak rovněž klesá s tím, jak roste rozdíl mezi teplotou měřeného povrchu tělesa a teplotou odraženého záření.

Obecně lze říct, že vliv emisivity a teploty odraženého záření na přesnost měření je značný a provést, a především interpretovat kvalitní měření pomocí termokamery, není

zvláště v některých případech vůbec jednoduchou záležitostí. V této práci se problematikou přesnosti měření teploty nebudeme dále zabývat, protože nám jde především o kvalitativní informaci, jíž je možné získat celkem bez problémů i v případě, že emisivita či teplota odraženého záření jsou nastaveny zcela špatně a měřené číselné hodnoty vůbec neodpovídají realitě.

3.3. Termokamera thermoImager TIM 160 a software ke zpracování měření thermoIMAGER TIM Connect

Pro účely zpracování této diplomové práce byla z výzkumného centra Nové technologie ZČU (NTC) zapůjčena termokamera thermoImager TIM 160 (viz obr. 5) a software thermoIMAGER TIM Connect umožňující zpracování měření. Uvedená termokamera, jejíž cena je zhruba 300 000 Kč, je určena především pro průmyslové užití a v minulosti ji výzkumný tým NTC využil například k měření teploty solárních článků za různých podmínek. Výhodou kamery je její malý rozměr a velmi slušný poměr cena/výkon. Za slabinu by se dala považovat možná o něco nižší přesnost měření a grafické rozlišení výstupů než u některých větších a dražších kamer. Pro účely této práce však byly technické parametry uvedené kamery více než dostačující.



Obrázek 5: Termokamera thermolmager TIM 160

U kamery jsou přiloženy 3 různé objektivy o záběru 6°, 23° a 48°, k počítači je připojena pomocí klasického USB rozhraní. Měření je možné provádět v teplotních rozmezech -20 – 100 °C, 0 – 250 °C popř. 150-900 °C. Konkrétní rozsah je potřeba nastavit před začátkem měření. Vzorkovací frekvence kamery je maximálně 100 Hz. Je možné nastavit na snímku větší množství sledovaných oblastí a na každé z nich lze následně pozorovat časový vývoj teploty. Na výběr jsou možnosti sledovat maximální, minimální

nebo průměrnou teplotu v dané oblasti. Získaná data je následně možné snadno exportovat např. do programu EXCEL, kde lze provést další zpracování.

Z hlediska grafických výstupů kamera umožní nahrát video ve formátu .ravi. Video lze následně v software thermoIMAGER TIM Connect klasickým způsobem upravovat a lze z něj rovněž pomocí volby Snapshot v menu File vystříhat jednotlivé snímky. Jejich rozlišení je prvotně nastaveno na nedostatečných 160x120 pixelů, v menu Tools-Configuration, položce Snapshots, je však možné nastavením volby Draw overlay information zvýšit rozlišení na již dostačujících 640x480 pixelů. V menu Tools-Configuration-Measuring colors lze rovněž různým způsobem nastavovat barevnou škálu, v níž se budou grafické výstupy zobrazovat. Automaticky je nastavena duhová škála, je však možné rovněž zajistit, aby bylo pozadí černé a teplotní změny měřeného objektu tudíž mohly více vyniknout. Je možné samozřejmě realizovat i řadu dalších konkrétních úprav vhodných pro jednotlivá měření. Podrobný a poměrně srozumitelný návod k termokameře [2] i příslušnému software [3] je k dispozici na instalačním CD v anglickém a německém jazyce.

Software ukládá natočené videosekvence automaticky ve formátu .ravi, v němž je vedle grafického znázornění zachováno i rozvržení teploty, s nímž je možné dále pracovat. V nabídce Tools-Configuration-Recording je však možné v bodě General recording settings odškrtnout políčko Radiometric recording, čímž je zajištěno, že se nahrané videosekvence uloží ve formátu .avi. Ten na rozdíl od .ravi nezachovává informaci o teplotním rozložení a zcela tak znemožňuje případné další kvantitativní zpracování, je však na rozdíl od .ravi bez problémů přehratelný v jiném software. Soubory ve formátu .ravi se při přehrání v jiném než k tomu určeném software chovají nevyzpytatelně a zpravidla dochází k významné změně barev a k znehodnocení záznamu.

Záměna obou formátů po nahrání již bohužel není možná. Pokud tak chceme pořídit videosekvence, které by byly dostupné i uživateli bez odpovídajícího programového vybavení, je vhodné nahrávat ve formátu .avi. Bohužel videosekvence uvedené na DVD příloženém jsou ve formátu .ravi, což znamená, že k jejich přehrání v odpovídající kvalitě je potřeba autorizovaný software schopný s tímto formátem pracovat.

4. Zajímavé pokusy s termokamerou ve školské fyzice, didaktické zásady a zařazení do výuky

4.1. Úvodní poznámky, rozdělení experimentů do skupin

Dříve, než se pustíme do samotného popisu jednotlivých experimentů, je třeba uvést určité základní informace o charakteru pokusů a podmínkách, za nichž byly tyto pokusy realizovány. Po dohodě s vedoucí práce jsme vycházeli z toho, že se omezíme na kvantitativní popis pozorovaných jevů, který je mnohem bližší praktickému využití termokamery v prostředí základní školy. Z tohoto důvodu jsme se nijak nezabývali otázkami souvisejícími s nastavením emisivity, případně teploty odraženého záření, jež mají v souladu s tím, co bylo uvedeno v části 3.2., zásadní vliv na kvantitativní výsledky měření s termokamerou. Emisivita byla při realizaci všech pokusů ponechána na přednastavené hodnotě 1. Vzorkovací frekvence byla podle povahy jednotlivých pokusů měněna v rozsahu 1-5 Hz. Poměrně nízké hodnoty v porovnání s možnostmi termokamery (až 100 Hz) jsme zvolili s cílem snížit velikost videí natáčených během realizace experimentů. Vzhledem k tomu, že u žádného z pokusů nebylo cílem zaznamenávat velmi rychlé tepelné změny, byla uvedená vzorkovací frekvence dostatečná.

Náměty na experimenty jsme čerpali jednak z literatury (především články [4], [5] a bakalářská práce [6]), jednak z vlastní zkušenosti a po konzultaci s vedoucí diplomové práce. Celkově je možné pokusy realizované v této práci rozdělit do 4 základních skupin:

- pokusy zaměřené na sdílení tepla (rozdílná vodivost různých kovů, sdílení tepla prouděním, sdílení tepla vedením)
- pokusy zaměřené na indukční ohřev (princip indukčního ohřevu, levitující kroužek, rozsvícení malé či velké žárovky pomocí indukčního ohřevu)
- vybrané pokusy z elektřiny a magnetismu (princip Jákobova žebříku, zkratování baterky, ohřev odporového drátu, indukovaný proud v prstenci)
- další pokusy s termokamerou (zahřívání počítače, zahřívání rukou třením, vlastnosti plamene plynového hořáku)

V dalších podkapitolách se budeme zabývat konkrétně jednotlivými skupinami pokusů.

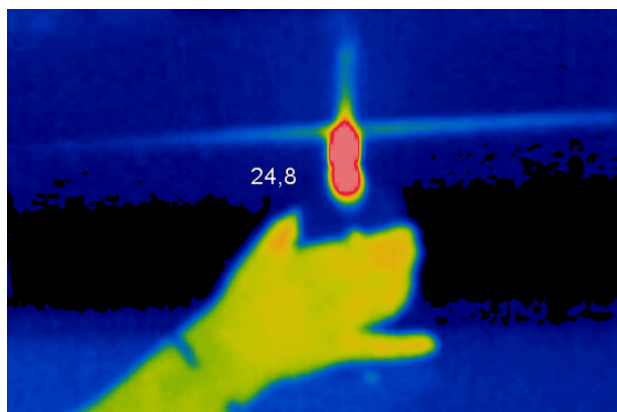
4. 2. Experimenty zaměřené na sdílení tepla

4.2.1. Rozdílná tepelná vodivost dvou kovů

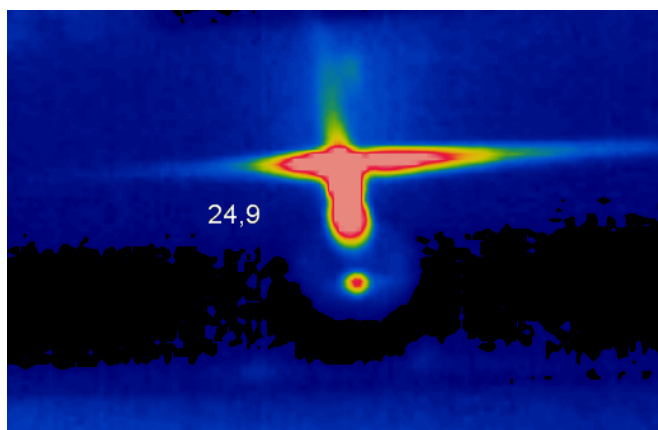
Provedení: na realizaci tohoto pokusu budeme potřebovat lihový kahan, dvě stejné tyčky vyrobené z dvou různých kovů, které mají jinou tepelnou vodivost. Budeme postupovat stejně jako u klasického školského pokusu demonstrujícího různou tepelnou vodivost dvou rozdílných kovů. Místo dotyku dvou tyčí z různých materiálů budeme zahřívat lihovým kahanem a budeme pomocí termokamery sledovat, jak se mění teplota v obou tyčích. Zjistíme, že v jedné tyči (vpravo na obrázku 6b) teplota roste podstatně rychleji než v druhé.



Obrázek 6: Uspořádání pokusu zahřívání tyčí z různých kovů



Obrázek 6a: Zahřívání dvou tyčí z různých kovů –počáteční stav



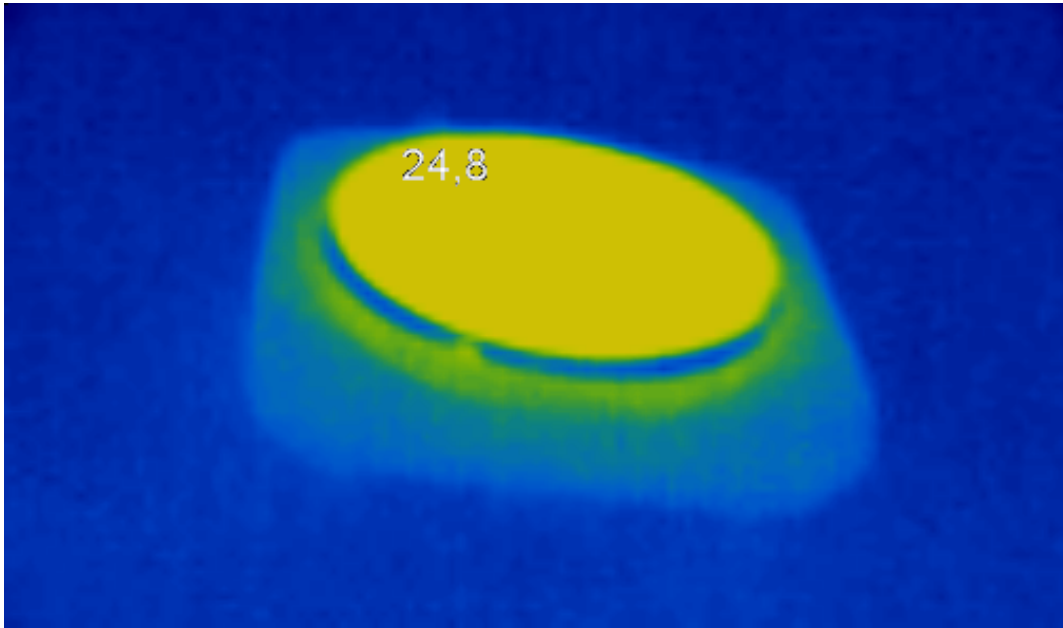
Obrázek 6b: Zahřívání dvou tyčí z různých kovů – rozdíl teplot

Fyzikální vysvětlení: Uvedený efekt je možné vysvětlit rozdílnou tepelnou vodivostí kovů, z nichž jsou tyče vyrobeny. Tepelná vodivost hliníku umístěného na pravé straně je podstatně vyšší, a proto se hliníková tyč zahřívá zřetelně rychleji.

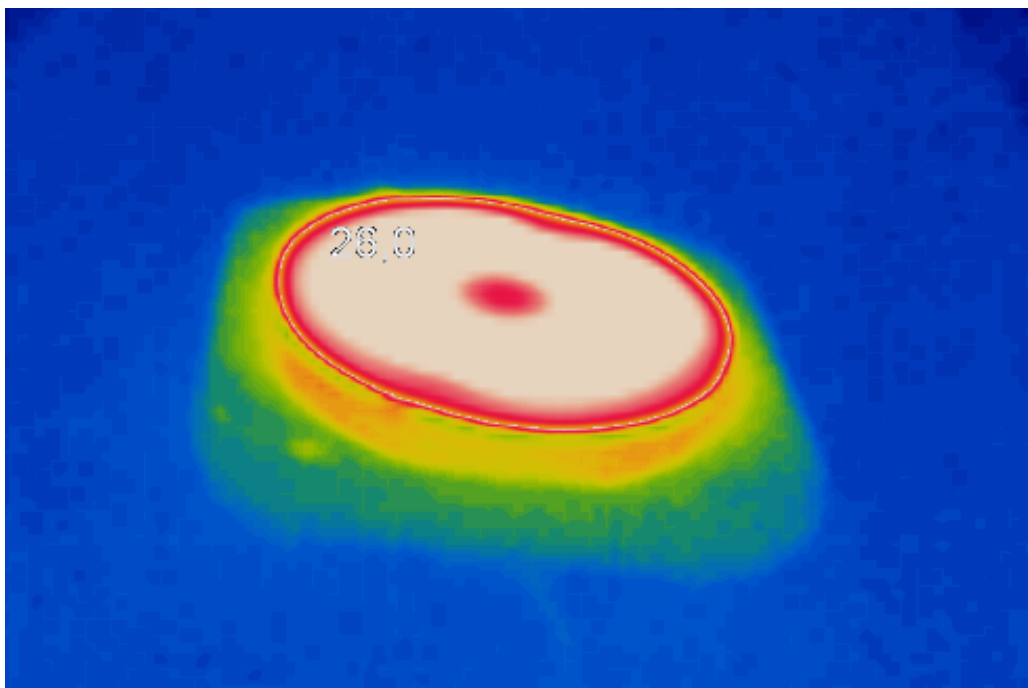
Poznámky: Žáky upozorníme na velmi rychlé zahřátí hliníkové lžičky, kterou dáváme do nápoje. Po nějaké době je lžička tak teplá, že jí neudržíme v ruce můžeme se způsobit popáleninu. Je možné uvedený pokus rozšířit tak, že budeme mít různé dvojice kovů a budeme zjišťovat, který z nich má větší tepelnou vodivost. Rovněž můžeme zmínit i to, že u kovů je úzce propojena vysoká tepelná vodivost s velmi vysokou vodivostí elektrickou. Při provedení je třeba dávat pozor, aby lihový kahan zahříval rovnoměrně místo dotyku obou tyčí.

4.2.2. Zahřívání litinové plotýnky

Provedení: Na tento pokus potřebujeme pouze klasickou litinovou plotýnku, kterou zapojíme do zásuvky. Budeme pozorovat změny teploty povrchu plotýnky a všimneme si, že její střed se na první pohled překvapivě ze začátku zahřívá pomaleji, než okrajové oblasti.



Obrázek 7a: Ohřev litinové plotýnky-počáteční stav



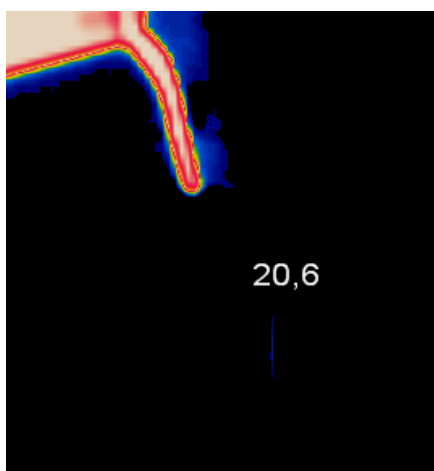
Obrázek 7b: Ohřev litinové plotýnky – nepřímé ohřívání středu

Fyzikální vysvětlení: Pomalejší zahřívání středu vařiče je dáno mechanismem ohřevu. Ten je zajištěn prostřednictvím odporové spirály, která je umístěna pod povrchem plotýnky po jejích krajích, ale nikoliv ve středu. Její zahřívání je tak realizováno pouze nepřímo prostřednictvím vedení tepla z přímo ohřátých odporových oblastí. Jinak je ohřev symetrický podle středu.

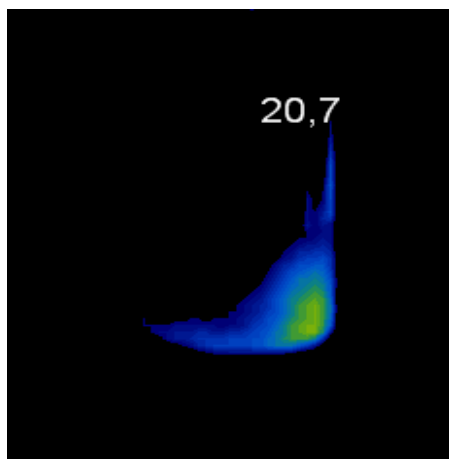
Poznámky: U některých typů můžeme plotýnku odklopit a přímo ukázat, kde se odporová spirála nachází. Nevýhoda tohoto experimentu je taková, že pokud chceme tento pokus opakovat, musíme čekat delší časový úsek, dokud vařič nevychladne. Rovněž je třeba dbát zvýšené opatrnosti vzhledem k vysoké teplotě plotýnky a hrozícímu nebezpečí popálení. U tohoto experimentu je třeba rovněž zdůraznit, že hodnoty teploty patrné z obrázku 7b neodpovídají realitě, což souvisí mimo jiné s tím, že při nastavení měření nebyla řešena otázka emisivity. Podrobněji o tom v podkapitole 4.6.

4.2.3. Vedení tepla prouděním – smíchání teplé a studené vody

Provedení: Budeme potřebovat dvě zhruba půllitrové nádoby. První z nich naplníme přibližně do poloviny studenou vodou z vodovodu, do druhé nalijeme teplou vodu zahřátou klasickým vařičem k teplotě varu. Následně budeme pomocí termokamery sledovat nalévání teplé vody do nádoby se studenou, teplou vodu naléváme z výšky zhruba 20 cm tak, aby voda mířila na jednu stranu nádoby. Pozorované rozložení tepoty je ilustrováno na obrázku 8b.



Obrázek 8a: Míšení vody různé teploty – efekt nalévání teplé vody



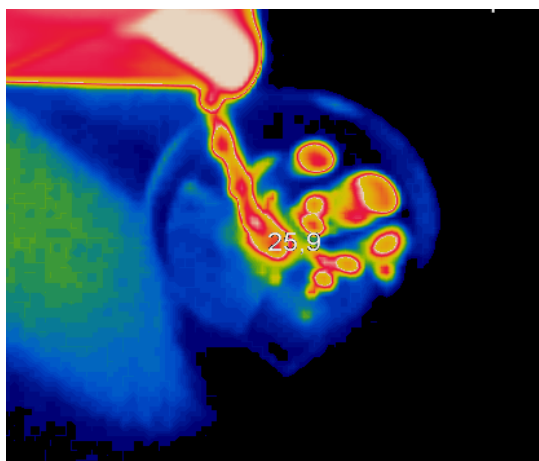
Obrázek 8b: Míšení vody různé teploty – efekt proudění

Fyzikální vysvětlení: Jedná se vlastně o demonstraci vedení tepla prouděním. Je jasně vidět, že vyšších teplot je nejprve dosaženo v dolní části nádoby v oblasti, do něhož jsme nalévali teplou vodu. Následně se teplejší voda dobře promíchává s vodou studenou a teplota rychle roste i v dalších částech nádoby.

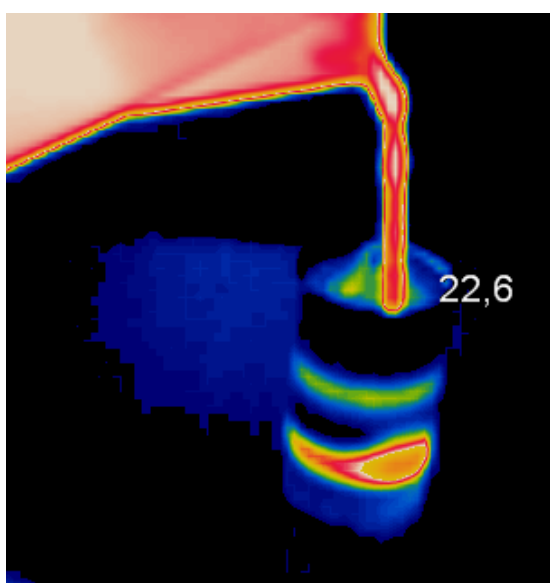
Poznámky: U tohoto pokusu je pomocí obrázku 8a možné hezky demonstrovat, že termokamera měří pouze povrchovou teplotu. Teplá voda nalévaná do nádoby zde přestane být pozorovatelná v okamžiku, kdy začne být obklopena okolní studenou vodou. Je potřeba dát pozor na to, abychom měli připraven dostatek teplé vody a efekt byl tak dobře pozorovatelný. Měření je možné provádět ze strany (jako na obrázku 8) nebo shora, pak je dobře vidět, že volný povrch kapaliny se ohřívá až s jistým zpožděním. Je rovněž možné se zabývat tím, jak proudění závisí na tom, z jaké výšky a jakou rychlostí teplou vodu doléváme.

4.2.4. Vedení tepla prouděním – smíchání teplé vody a studeného oleje

Provedení: Budeme postupovat analogicky jako v předchozím experimentu, do studeného oleje však budeme nalévat teplou vodu. Teplou vodu naléváme z výšky zhruba 20 cm. Sledování pomocí termokamery je vhodné provádět jednak z pozice shora, jednak z pozice z boku. U pozice shora nás zaujmou oblasti teplejší kapaliny patrné na obrázku 9a, u pozice z boku je poté na obrázku 9b jasně patrná oblast s vysokou teplotou ve spodní části nádoby sousedící s podstatně chladnější oblastí uprostřed, na kterou navazuje opět poněkud teplejší oblast u povrchu. Pozorované rozložení teploty je ilustrováno na obrázku 8b.



Obrázek 9a: Míšení teplé vody a studeného oleje – pohled shora



Obrázek 9b: Míšení teplé vody a studeného oleje – pohled z boku

Fyzikální vysvětlení: Pozorované efekty jsou především důsledkem tzv. tepelného proudění (konvekce), při němž dochází k vzniku různých nestabilit majících za následek to, že se objevují různé charakteristické struktury. Vysvětlení těchto procesů je značně složité a velice úzce souvisí s problematikou tzv. nelineární termodynamiky. Teplejší oblasti viditelné na povrchu na obrázku 9a se nazývají Benardovy buňky na počest H. Benarda, který je popsal poprvé v roce 1900. S problematikou nelineární termodynamiky a jejích aplikací v hydrodynamice souvisí i nezvyklý teplotní profil pozorovaný na obrázku 9b. Více informací o problematice tepelné konvekce je možné získat v [4i].

Poznámky: U tohoto pokusu je náročnější přiblížit dětem na základní (ale i na střední) škole fyzikální podstatu daného jevu. Je tudíž vhodné, spíše, než se snažit o vysvětlení

pomocí velmi náročné nerovnovážné termodynamiky, raději ukázat třeba jiné situace, kde dochází ke vzniku Benardových buněk apod. Vznik těchto buněk při nalévání vody do oleje není ani pomocí termokamery vždy dobře pozorovatelný, je nutné počítat s tím, že pokus bude nutné vícekrát opakovat apod.

4.3. Experimenty zaměřené na indukční ohřev

4.3.1. Princip indukčního ohřevu

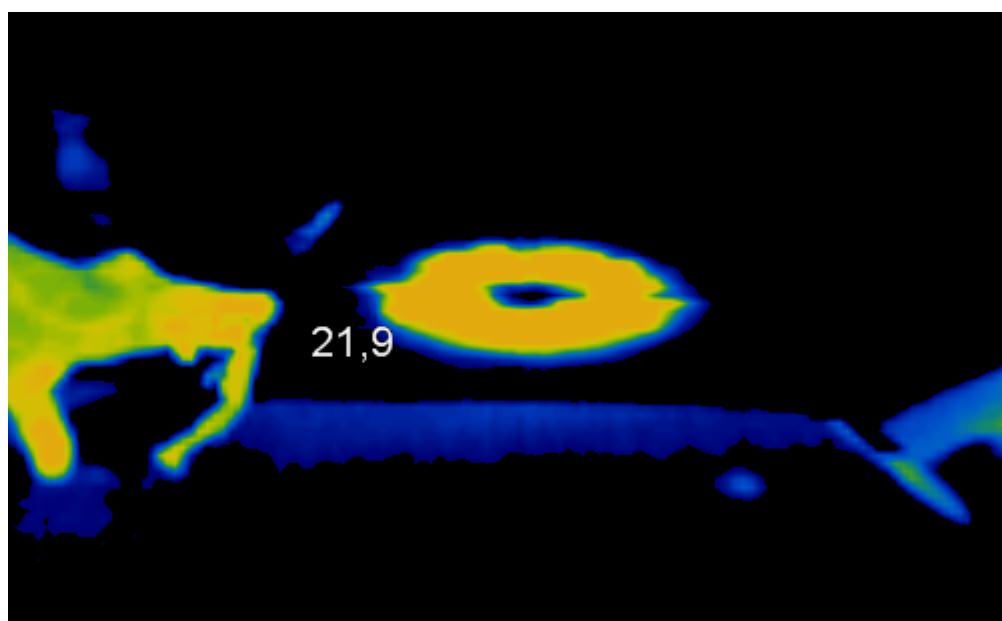
Provedení: při tomto pokusu budeme potřebovat indukční vaříč, který zapojíme do zásuvky a alobal, který umístíme přes plotýnku a z obou stran ho podržíme, aby se dotýkal plotýnky. Změny teploty alobalu budeme sledovat pomocí termokamery.



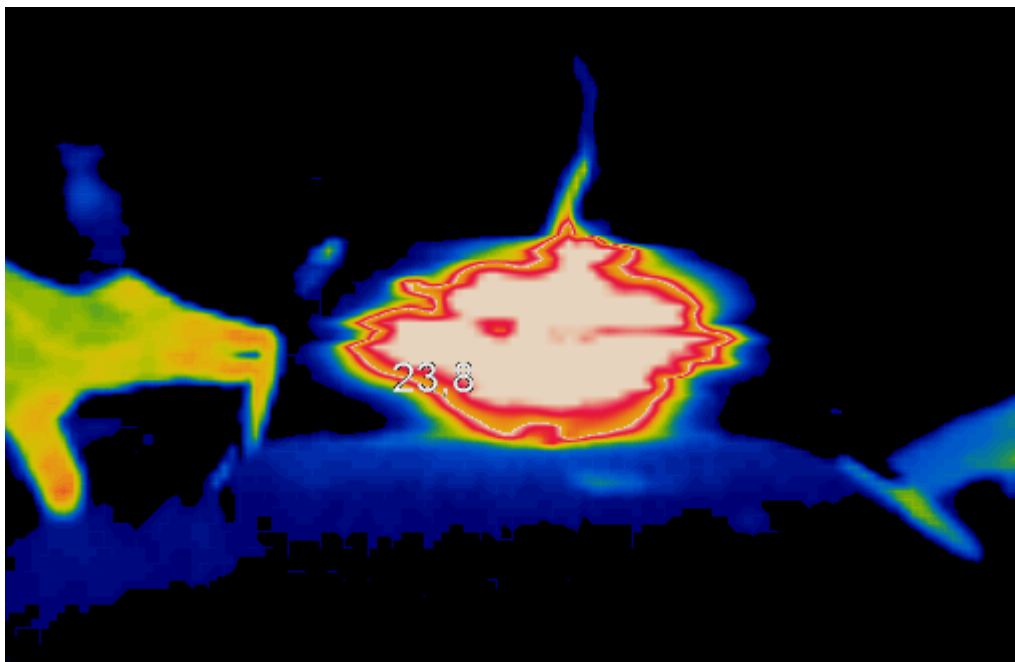
Obrázek 10: Indukční vaříč



Obrázek 10a: Uspořádání pokusu s alobalem



Obrázek 10b: Indukční ohřev alobalu – prvotní stav



Obrázek 10c: Indukční ohřev alobalu – jeho vznícení

Fyzikální vysvětlení: Plotýnka indukčního vařiče je vyrobena z cívky (viz obr. 10a, cívka je vyrobena z mědi, která je výborným vodičem, ve kterém nedochází k velkým ztrátám). Díky velkému střídavému napětí, které prochází cívkou, vzniká proměnné magnetické pole. Působením tohoto pole na elektricky vodivé dno nádoby se v nádobě indukují Foucaultovy vířivé proudy, které se díky elektrickému odporu nádoby mění na teplo [7]. Tím se ohřívá nádoba a později se od ní ohřeje i její obsah. Na tomto principu se ohřívá i alobal uvažovaný v našem pokusu, který v podstatě hraje stejnou roli jako výše popsaná nádoba.

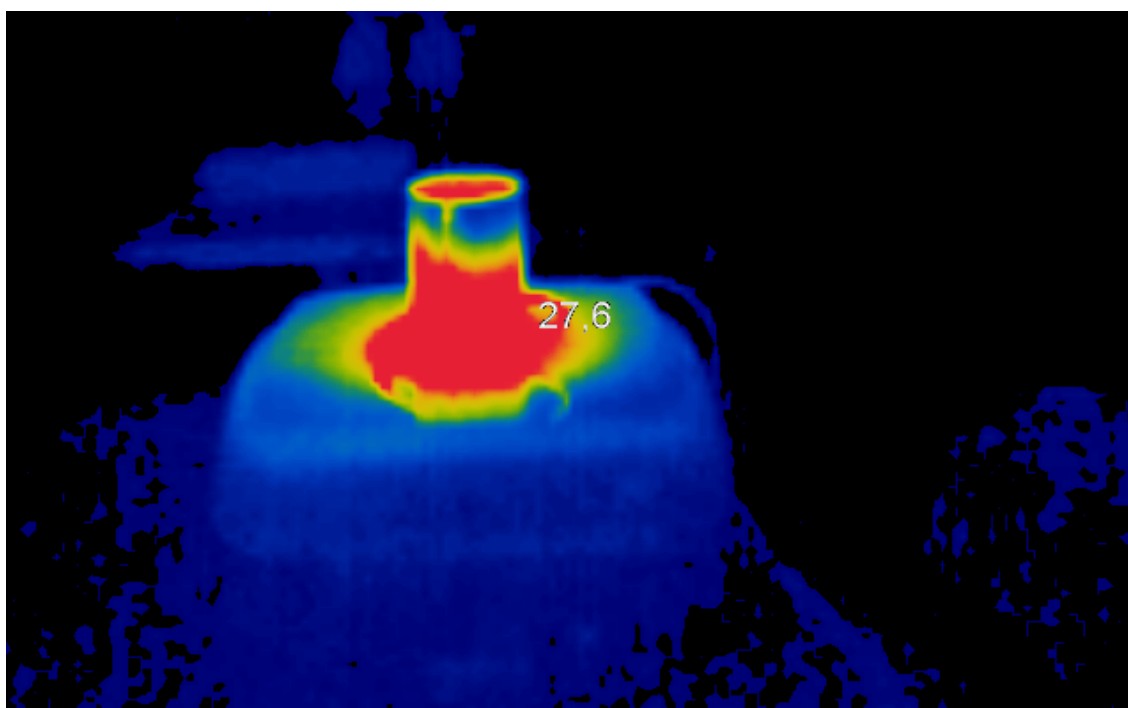
Poznámky: Alobal se zahřívá velice rychle a již po poměrně krátké době může dojít k jeho vznícení. Na obrázku 10b je vidět, že alobal se alespoň v první fázi nezahřívá uprostřed, ale na krajích. Je to dáno tím, že cívka umístěná v indukčním vařiči (viz obrázek 10a) nezasahuje do střední části, kde je tudíž magnetické pole téměř zanedbatelné. Ohřátí středu alobalu patrně z obrázku 10c je pak dáno vedením tepla v alobalu stejně jako u pokusu 4.2.2. s litinovou plotýnkou. Připomeňme, že alobal je z hliníku, což je podle pokusu 4. 2.1. velmi dobrý vodič tepla. Je rovněž zajímavé, že hořící část alobalu vypadá na snímku z termokamery uvedeném na obrázku 10c jako chladnější než zbytek alobalu, ačkoliv ve skutečnosti to bude určitě naopak. Je to pravděpodobně dáno rozdílnou emisivitou obou částí alobalu a nastavením termokamery.

4.3.2. Levitující kroužek - indukční ohřev

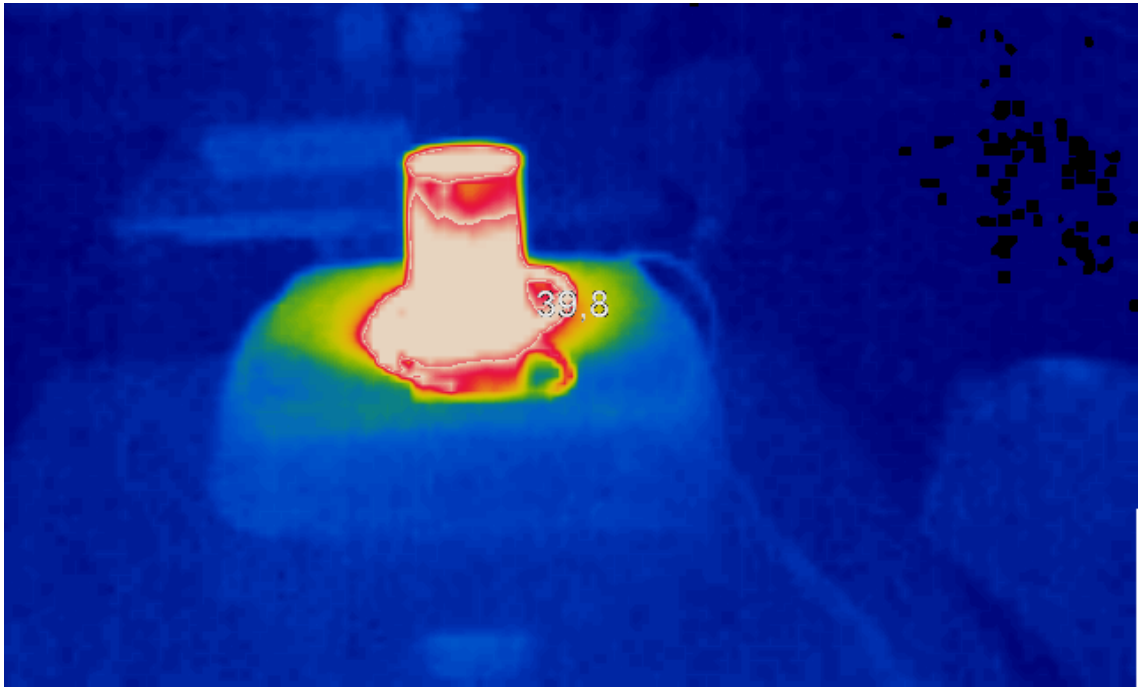
Provedení: Při tomto pokusu budeme potřebovat indukční vařič, který zapojíme do zásuvky. Dále na něj umístíme plechovku s vodou a přes něj umístíme hliníkový prstenec. Uspořádání pokusu je patrné z obrázku 11a. Po zapnutí vařiče se prstenec začne vznášet. Pokus neprovádíme dlouho, protože prstenec se silně zahřívá.



Obrázek 11a: Uspořádání pokusu s prstencem



Obrázek 11b: Levitující kroužek – počáteční stav při ohřevu



Obrázek 11c: Levitující kroužek – zahřátí a levitace

Fyzikální vysvětlení: v kroužku vyrobeném z hliníku vznikají stejně jako v plechovce vířivé proudy. Kroužek se však nachází v magnetickém poli proudů v plechovce, působí na něj tudíž magnetická síla stejně jako např. mezi dvěma vodiči, jimiž prochází elektrický proud. V důsledku působení této síly kroužek levituje, neboť je jí částečně kompenzována síla tíhová.

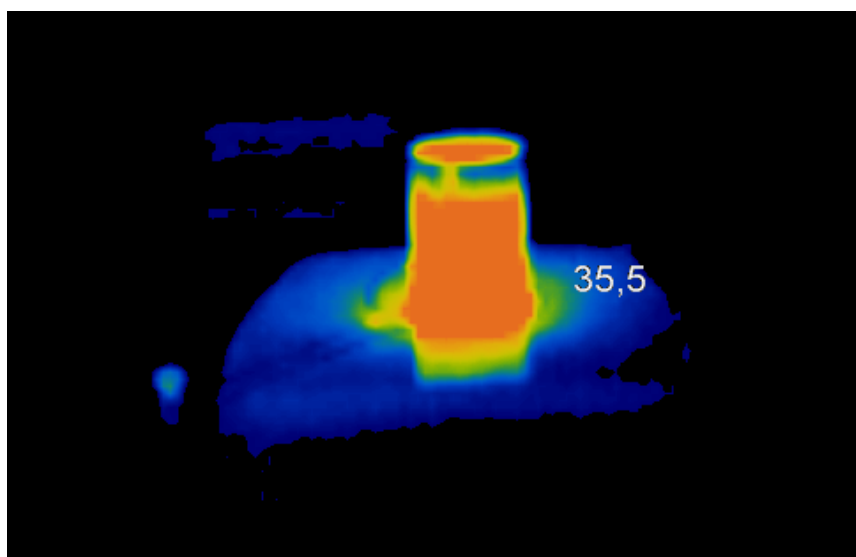
Poznámky: Je možné pokus ukázat s kroužkem nekovového materiálu a bude vidět, že se kroužek nezahřívá a nelevituje.

4.3.3. Indukční ohřev a malá žárovka

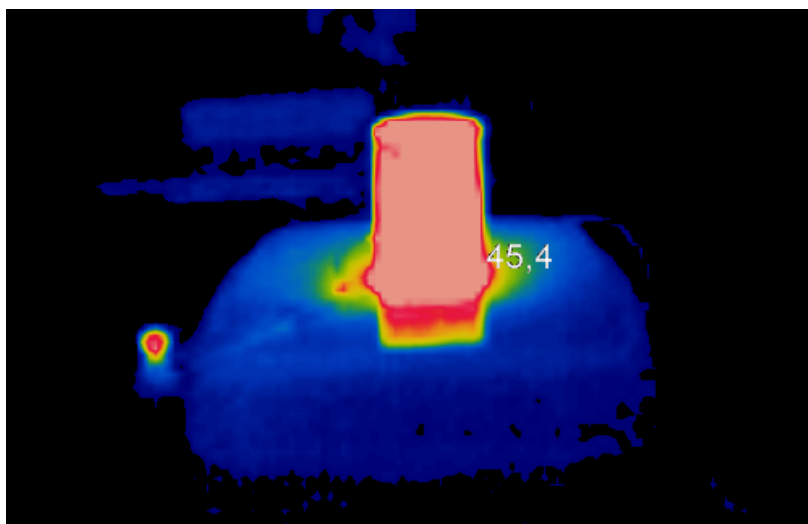
Provedení: K tomuto experimentu využijeme indukční vařič, dále vezmeme cívku s jedním závitem, která bude napájet malou žárovku 6 V (např. 0,1 A), cívku položíme přes plechovku s vodou stejně jako v předchozím experimentu. Uspořádání pokusu je patrné z *obrázku 12a*. Budeme sledovat pomocí termokamery teplotu plechovky a žárovky a uvidíme, že obě tyto teploty budou postupně růst. Žárovka se navíc rozsvítí.



Obrázek 12a: Uspořádání pokusu s malou žárovkou



Obrázek 12b: Indukční ohřev a malá žárovka – postupné zahřívání



Obrázek 12c: Indukční ohřev a malá žárovka – zvýšení teploty žárovky

Fyzikální vysvětlení: Umístěním cívky jsme vlastně vytvořili transformátor (primární cívka je indukční vaříč a sekundární cívka je závit z měděného drátu se žárovkou). Ačkoli sekundární cívka je tvořena pouze jedním závitěm, vzhledem k velmi rychlým změnám magnetického pole v ní indukované napětí stačí na rozsvícení malé žárovky.

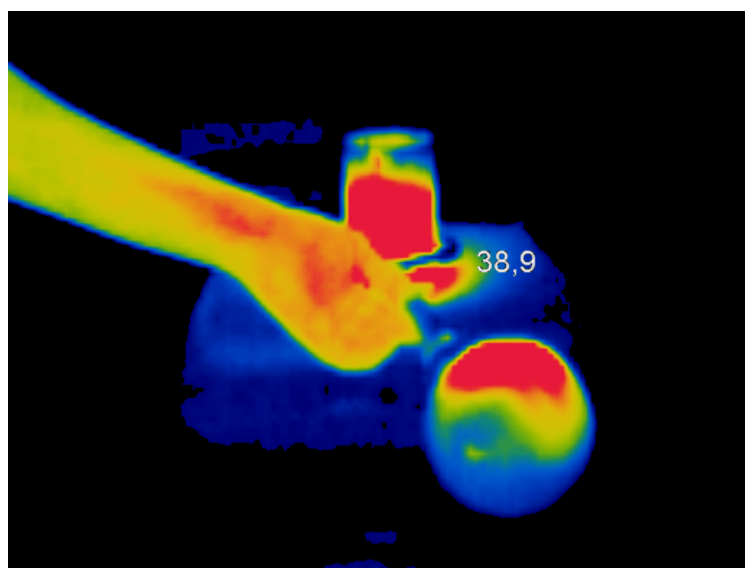
Poznámka: Tento experiment můžeme také zkusit žárovku 24 V / 100 W, která je běžně dostupná v jakékoli prodejně elektra. U této žárovky je vzhledem k většímu požadovanému napětí vhodná cívka o čtyřech závitěch, která je přímo připojena k velké objímce se žárovkou. Připomeňme, že napětí indukované v cívce je úměrné počtu jejích závitů. Pokus rovněž umožňuje demonstrovat to, jak se postupně zvyšuje teplota svítící žárovky.

4.3.4. Indukční ohřev a velká žárovka

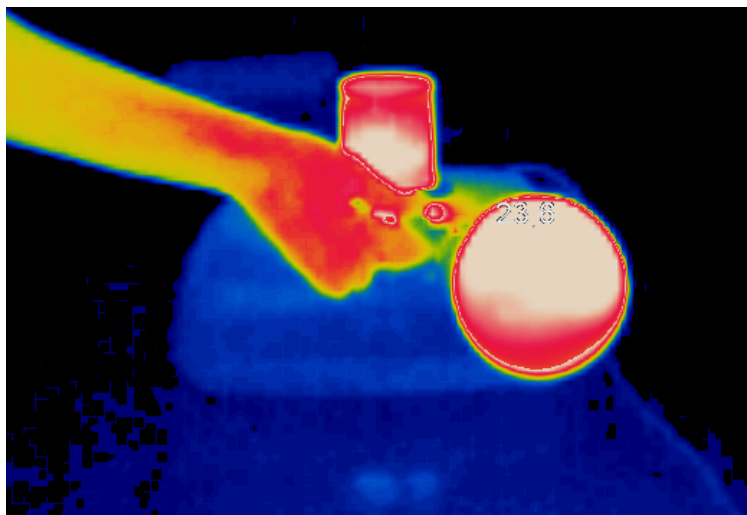
Provedení: Tento experiment je v zásadě podobný jako v minulém případě, jen místo malé žárovky zde použijeme velkou žárovku 230 V / 0,5 kW, kterou budeme napájet pomocí cívky s větším počtem závitů. Uspořádání pokusu je patrné z obrázku 13a.



Obrázek 13a: Uspořádání pokusu s velkou žárovkou i malou žárovkou



Obrázek 13b: Indukční ohřev a velká žárovka – postupné zahřívání



Obrázek 13c: Indukční ohřev a velká žárovka – zvýšení teploty žárovky

Fyzikální vysvětlení: Princip je stejný jako v předchozím pokusu, vzhledem k většímu požadovanému napětí žárovky nám však již nebude stačit jeden závit a buď musíme použít cívku s větším množstvím závitů. Protože indukované napětí je přímo úměrné počtu závitů, snadno zjistíme, že stejného efektu jako u malé žárovky (6 V) docílíme při použití sekundární cívky se zhruba 40 závitů.

Poznámka: Je nutné dbát zvýšené opatrnosti při demonstraci pokusu. Díky tomu, že cívka má 40 závitů a vytváří nebezpečné indukované napětí, musíme se pouze dotýkat objímky a ne vodičů, které nemusejí mít dostatečnou izolaci.

4.4. Vybrané pokusy z elektřiny a magnetismu

4.4.1. Jákobův žebřík a zahřívání transformátoru

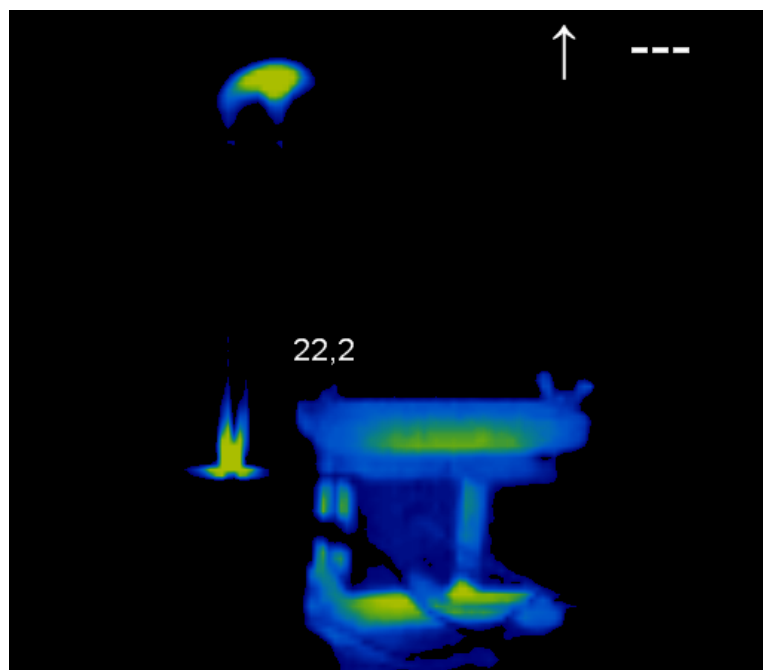
Provedení: Zde si připravíme transformátor s lístkovým jádrem tak, aby na sekundárním vinutí bylo podstatně vyšší napětí než na primárním (např. 600 závitů na primárním a 12 000 závitů na sekundárním), zdroj s vysokým napětím, model Jákobova žebříku (dvojici rozšiřujících se drátů). Uspořádání pokusu je patrné z *obrázku 14a*. Zapojíme do obvodu a budeme pomocí termokamery sledovat jednak teplotu jádra transformátoru, jednak teplotu drátů tvořících model Jákobova žebříku.

Fyzikální vysvětlení: Po zapojení přivedeme do sekundárního obvodu díky transformátoru vysoké napětí, v důsledku čehož dosáhneme vysoké intenzity elektrického pole. Dojde k elektrickému průrazu vzduchu a vzniku jiskrového výboje.

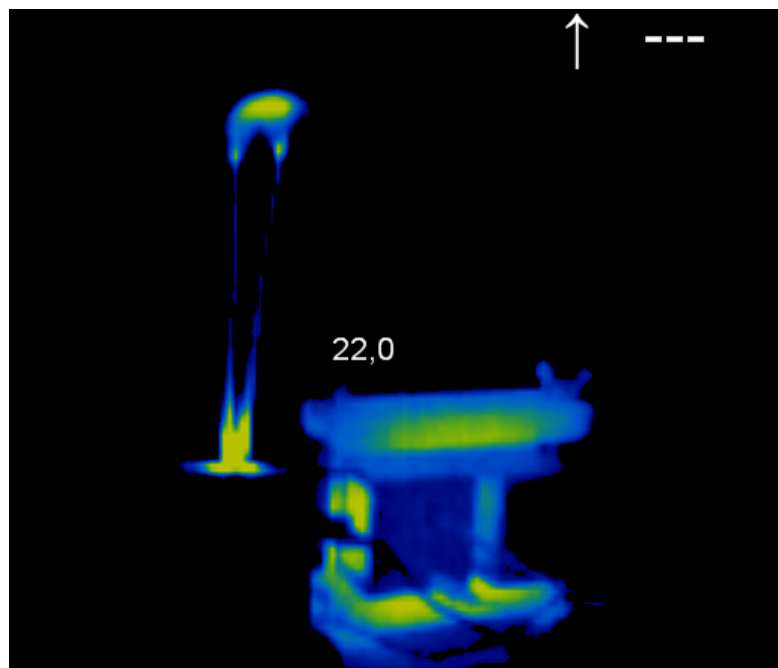
Je patné, že ve vyšší části Jákobova žebříku, kde jsou dráty od sebe více vzdáleny, jiskrový výboj zaniká. Podle vzorce $E = \frac{U}{d}$ klesá totiž s rostoucí vzdáleností hrotů intenzita elektrického pole a dojde k jejímu poklesu pod hodnotu nutnou k průrazu vzduchu.



Obrázek 14a: Uspořádání experimentu s Jákobovým žebříkem



Obrázek 14b: Zahřívání transformátoru a jiskrový výboj 1

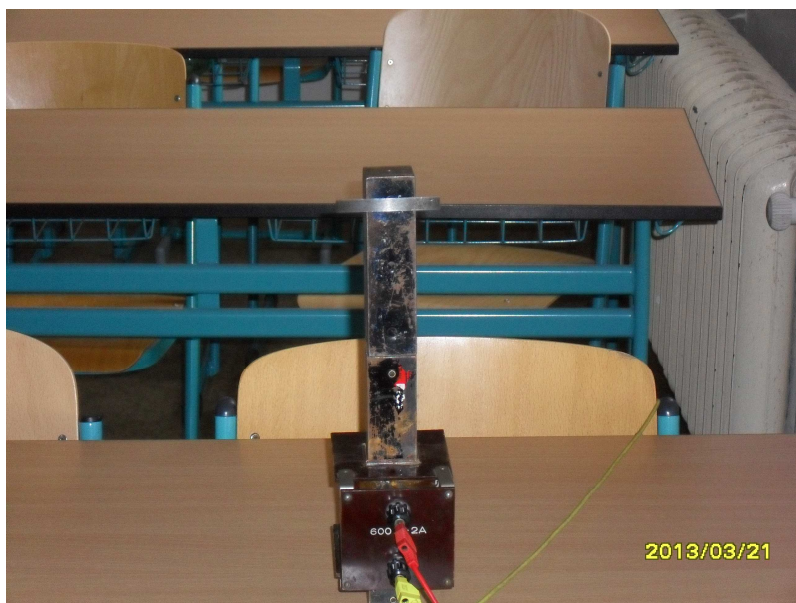


Obrázek 14c: Zahřívání transformátoru a jiskrový výboj 2 (vyšší teplota transformátoru)

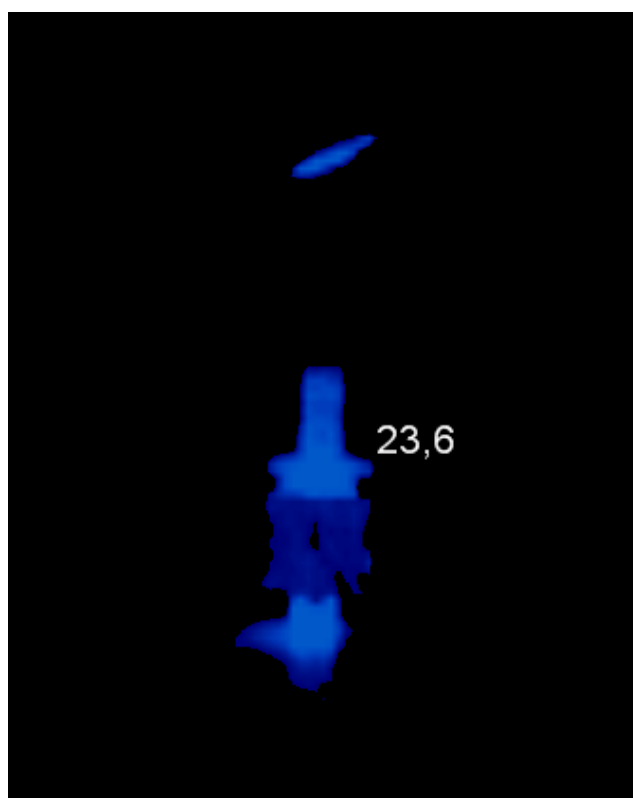
Poznámka: Pokus můžeme provést s transformátorem s plným nebo lístkovým jádrem a porovnáme, které z jader se zahřívá více. Zahřívá se více plné jádro a to díky Foucaultovým vířivým proudům, které jsou v plném jádře v daleko větším objemu, což způsobuje větší zahřívání jádra. Z tohoto důvodu se zpravidla používá jádro s jádrem tvořeným jednotlivými plechy, neboť se tak výrazně zmenšují tepelné ztráty.

4.4.2. Indukovaný proud v kroužku

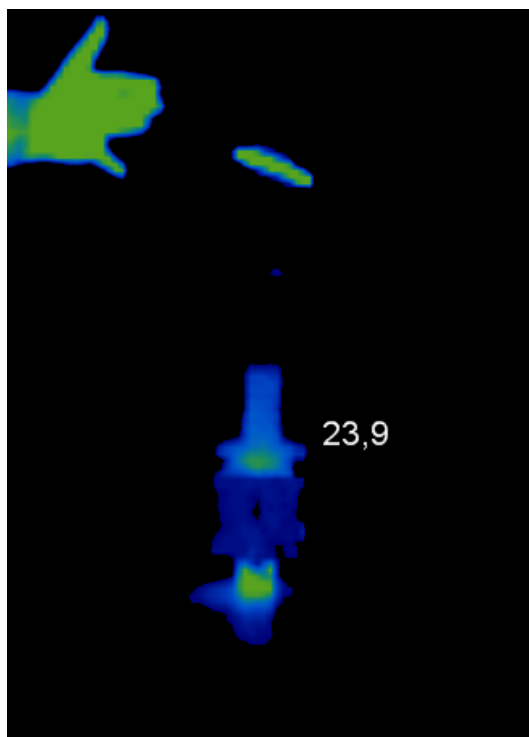
Provedení: Na jedno rameno U jádra nasuneme cívku a toto rameno prodloužíme pomocí dlouhého jádra. Na dlouhé jádro nasuneme hliníkový kroužek. Primární cívku připojíme ke zdroji střídavého napětí. Uspořádání pokusu je patrné z *obrázku 15a*. Budeme sledovat pomocí termokamery vzrůstající teplotu jádra i levitujícího kroužku.



Obrázek 15a: Uspořádání experimentu s kroužkem



Obrázek 15b: Levitující kroužek 1



Obrázek 15c: Levitující kroužek 2

Fyzikální princip: V hliníkovém kroužku vznikají Foucaultovy vířivé proudy, které způsobí, že prstenec v magnetickém poli vyvolaném prodlouženým magnetem levituje. Když se pokusíme prstenec tlačit směrem dolů, musíme překonat odpudivou sílu. Kroužek se zahřívá právě v důsledku vířivých proudů.

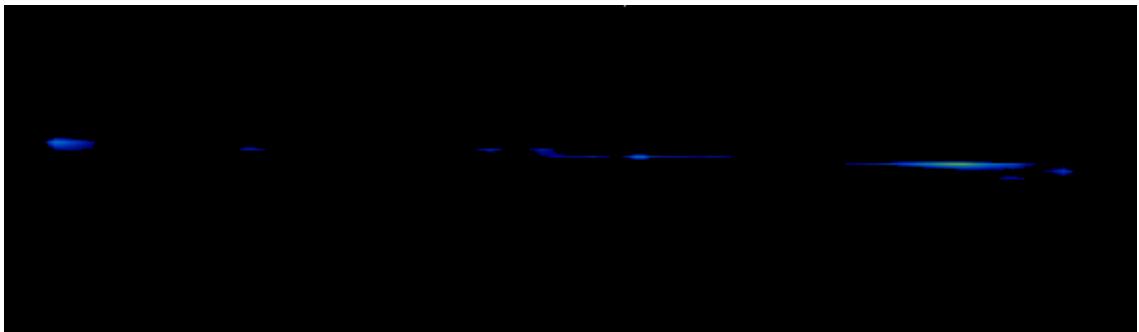
Poznámka: Je možné pokus ukázat s kroužkem nekovového materiálu a bude vidět, že se kroužek nezahřívá a nelevituje.

4.4.3. Zahřívání odporového drátu

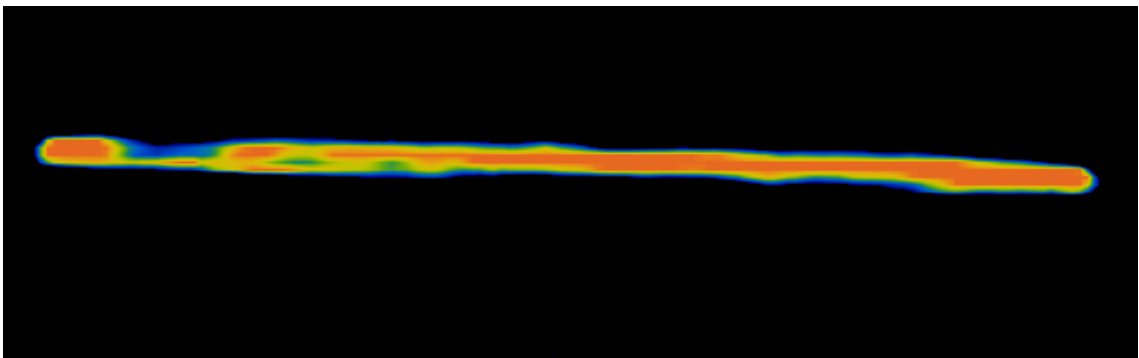
Provedení: Využijeme klasickou školskou pomůcku sloužící k demonstraci vlivu délky vodiče na jeho odpor. Zapojíme klasický školní zdroj nízkého napětí 12 V. Přívodní vodiče zapojíme tak, aby nám proud procházel částí uvedené pomůcky a budeme sledovat to, jak se nám část drátu, jíž prochází elektrický proud, celkem rovnoměrně zahřívá. Uspořádání pokusu je patrné z obrázku 16a.



Obrázek 16a: Uspořádání experimentu s odporovým drátem



Obrázek 16b: Ohřev odporového drátu – počáteční fáze



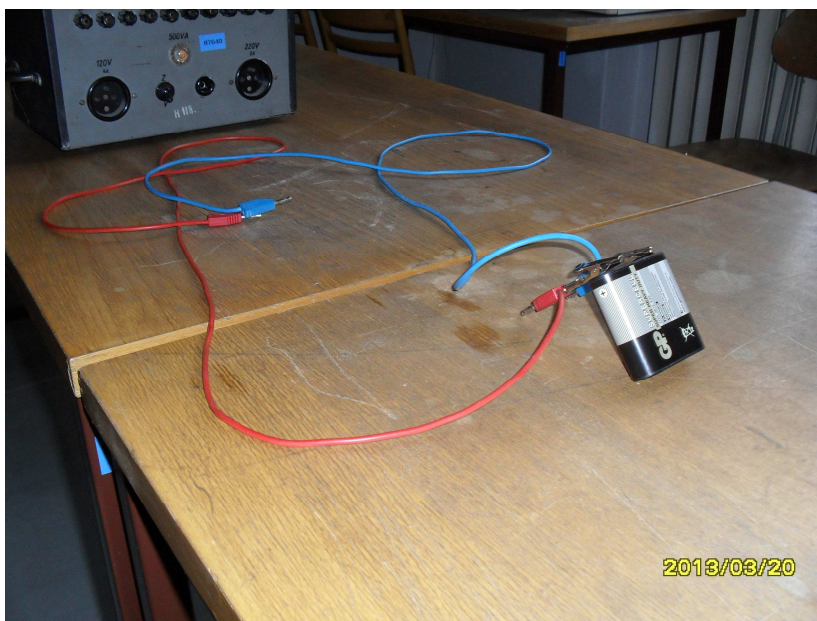
Obrázek 16c: Ohřev odporového drátu 2

Fyzikální vysvětlení: Je známo, že při průchodu vodiče proudem se v něm uvolňuje Jouleovo teplo, jehož velikost je dána vztahem $Q = R \cdot I^2 \cdot t$, kde R je odpor vodiče, I proud v něm procházející a t je čas, po který proud procházel. Toto teplo z většiny poslouží právě na zvýšení teploty vodiče, které je v podstatě homogenní v celé délce, kde prochází proud.

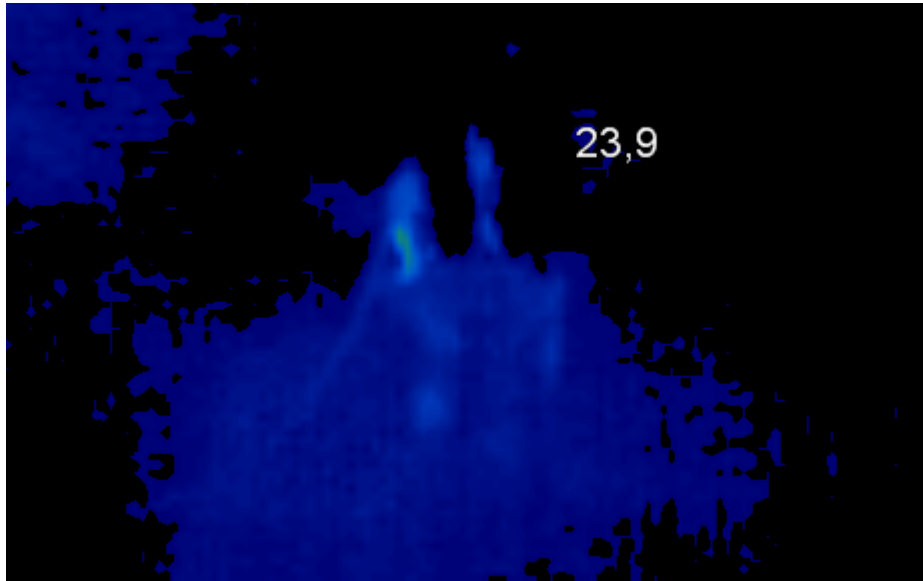
Poznámky: Je možné postupně měnit délku drátu procházeného proudem a sledovat vliv této délky na rychlost zahřívání. Toto měření je možné pojmout díky rovnoměrnému ohřevu drátu rovněž jako laboratorní úlohu, v níž bude zjišťováno, jak souvisí rychlost ohřevu drátu s dodaným teplem. K tomu je třeba znát rozměry drátu a měrnou tepelnou kapacitu materiálu, z něhož byl vyroben. Rovněž by bylo nutné dát pozor na nastavení emisivity v souladu s úvahami z podkapitoly 3.2. tak, aby bylo možné korektně určit časový vývoj teploty drátu.

4.4.4. Zkratování baterky

Provedení: Zkratujeme alkalickou baterii o napětí 4,5 V. Budeme sledovat teplotu po zkratování. Uspořádání pokusu je patrné z obrázku 17a.



Obrázek 17a: Uspořádání experimentu se zkratováním baterie



Obrázek 17b: Zkratování baterky – její zahřátí

Fyzikální vysvětlení: Při zkratování baterky začne procházet poměrně velký proud, jež vede v souladu s údaji uvedenými u minulého pokusu k jejímu zahřátí.

Poznámky: Uvedený efekt není vždycky jednoznačně patrný, značně závisí na typu baterie, míře jejího vybití a rovněž na nastavení termokamery. U některých typů baterií je třeba být velmi opatrný, neboť po zkratování může hrozit nebezpečí výbuchu nebo požáru.

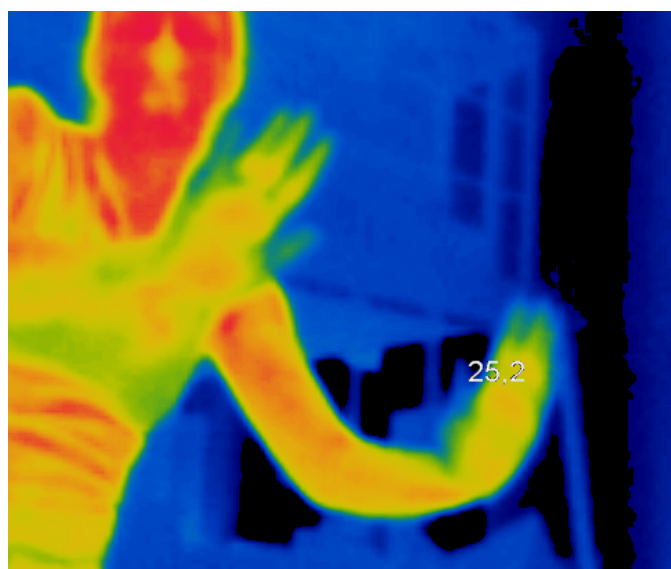
4.5. Další experimenty s termokamerou

4.5.1. Zahřívání dlaní při tření

Provedení: Při provedení tohoto jednoduchého experimentu je nutné, abychom měli studené ruce tak, aby během pokusu byly vidět změny teploty způsobené třením dlaněmi o sebe. Tudíž je vhodné si ruce nejprve omýt ve studené vodě. Následně sledujeme pomocí termokamery tepelné změny, k nimž dochází při tření.



Obrázek 18a: Zvýšení teploty třením – počáteční stav



Obrázek 18b: Zvýšení teploty třením – koncový stav

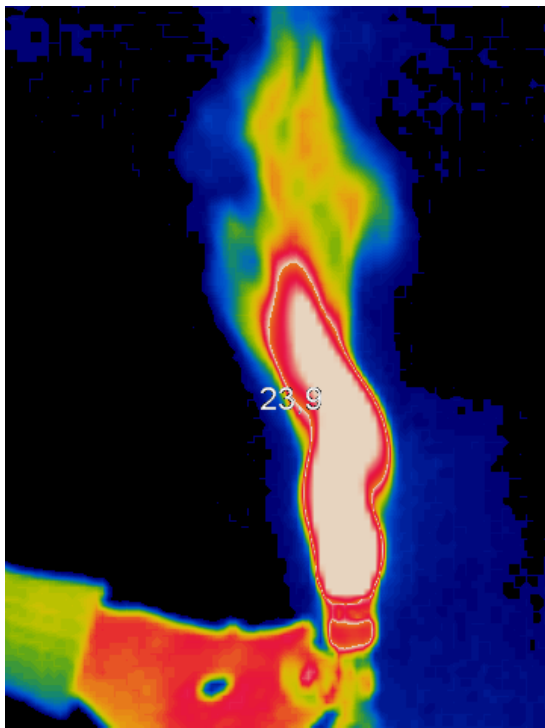
Fyzikální vysvětlení: Díky tření dlaněmi se zvyšuje vnitřní energie a to konáním práce (přemáháme třecí sílu). V důsledku toho rovněž roste teplota rukou, který o sebe třeme.

Poznámka: Je vhodné, než začneme experiment provádět, nejprve ruce ukázat pořádně na termokameru, aby po skončení pokusu byla patrná změna zahřátí obou dlaní. Další experimenty se třením sledovaným pomocí termokamery je možné najít v práci [6].

4.5.2. Plamen plynového kahanu

Provedení: Použijeme klasický plynový kahan, který zapálíme a budeme sledovat teplotu v různých vzdálenostech od kahanu.

Fyzikální vysvětlení: Nejvyšších teplot je podle očekávání dosahováno v místech blízko kahanu, kde dochází ke spalování plynu.



Obrázek 19: Rozložení teplot u plamene plynového kahanu

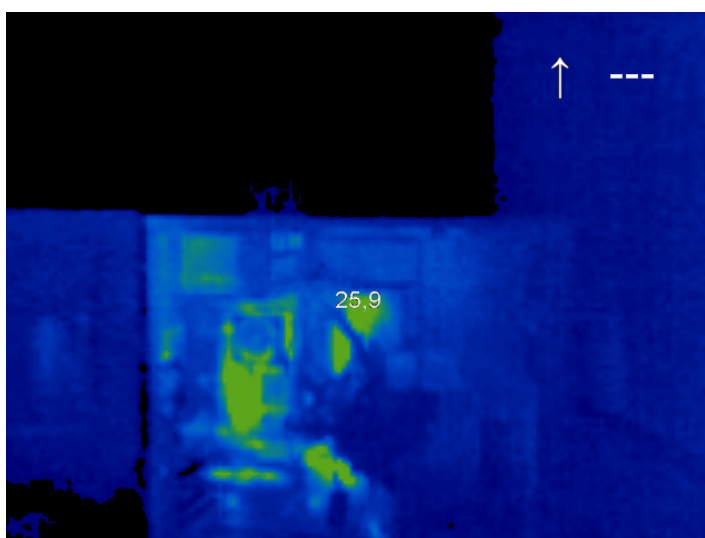
Poznámka: U kahanu je možné redukovat množství přiváděného plynu, což má velký vliv na výšku plamene, nikoliv však již na teplotu a její rozložení. Teplota plynového kahanu se zpravidla pohybuje mezi 1700 a 2000 °C, což jsou hodnoty, které většinou termokamer nelze změřit. Informace o rozložení teplot je tak pouze kvalitativní.

4.5.3. Zahřívání počítače

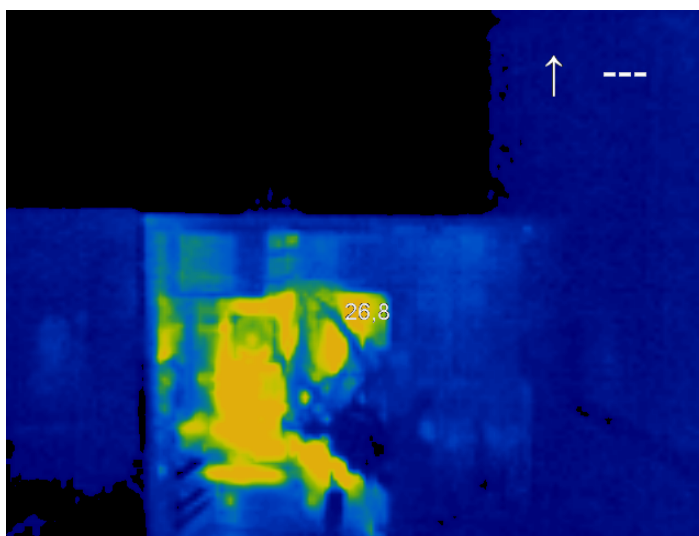
Provedení: Vyjmeme boční kryt u základní desky počítače a počítač spustíme. Pozorujeme, jak se počítač zahřívá a především to, které jeho části se zahřívají nejvíc. Uspořádání experimentu je patrné z obrázku 20a.



Obrázek 20a: Fotka počítače



Obrázek 20b: Zahřívání počítače – počáteční stadium



Obrázek 20c: Zahřívání počítače – stav po delší době

Fyzikální vysvětlení: Nejvíce se zahřívá procesor, jehož teplota při plném vytížení dosahuje i při správném chlazení hodnot 55 – 70 °C. Ke sledování aktuální teploty jednotlivých částí počítače slouží různé programy jako například program SensorsView. Více o problematice zahřívání počítač lze nalézt např. v [5i].

Poznámky: Je zajímavé tento pokus realizovat u nějakého vyřazeného počítače s vypnutím chlazením. V takovém případě zkoumaném v [5] se velmi rychle zahřeje procesor na teplotu 250 °C, přičemž na této teplotě zůstává delší dobu. Poté dojde k jeho vznícení. Velmi rychle se zahřívají také stabilizátory napětí. Zahřívání počítače při zapnutém chlazení je poměrně pomalé a proto si experiment v plném rozsahu vyžádá nejméně 10 minut. Během jeho průběhu je však možné realizovat další pokusy a později se k němu vrátit.

4.6. Didaktické zásady při realizaci experimentů s termokamerou

Při realizaci pokusů s termokamerou ve školském prostředí je vhodné dodržet určité didaktické zásady tak, aby bylo dosaženo kýženého efektu. Těmi se budeme zabývat v této podkapitole.

Především je nutné dávat pozor, aby žáci nevníмали termokameru pouze jako hračku, jejímž prostřednictvím lze zjistit, jestli máme teplejší ruce nebo hlavu, ale jako velmi užitečnou pomůcku, která umožňuje kvalitativně i kvantitativně sledovat rozložení teploty na povrchu daného tělesa. Zobrazení rozložení teploty udané termokamerou nám umožňuje znázornit efekty, které by jinak bylo možné znázornit pouze těžko. Před realizací experimentu je vhodné nechat žáky hádat, jaký výsledek očekávají. Poté následuje samotné provedení pokusu a vysvětlení pozorovaného jevu.

Je velmi důležité upozornit žáky na to, že teploty, které se na termokameře objevují při školských pokusech, velmi často neodpovídají realitě a že nám jde hlavně o kvalitativní určení toho, co je teplejší a co studenější. V opačném případě hrozí nebezpečí, že si žáci odnesou z pokusů tohoto typu zcela mylné představy např. o teplotě plamene plynového hořáku (připomeňme, že při nastavení užitém v pokusu 4.5.2. ukazovala termokamera teplotu ve vnitřní oblasti plamene jen zhruba 100 °C, přitom je známo, že teplota plamene lihového hořáku se ve skutečnosti pohybuje zhruba v rozmezí 1700 – 2000 °C)! Na straně druhé je určitě vhodné uvést, že termografie umožňuje při správném nastavení parametrů určovat teplotu i kvantitativně a to mnohdy velice

přesně. To je možné a užitečné ilustrovat na konkrétních příkladech aplikací, lze použít například ty uvedené v 5. kapitole této diplomové práce.

Při práci s termokamerou je potřeba být maximálně opatrný, protože se jedná o poměrně nákladné zařízení, které je možné snadno poškodit. Po umístění kamery do stativu je nutné zkontrolovat, že je tam kamera dobře uchycena a nemůže dojít k jejímu vypadnutí. Také je třeba dát pozor na to, aby kamera nebyla umístěna v prostřední nespĺňujícím údaje od výrobce např. z hlediska okolní teploty či vlhkosti vzduchu. Rovněž je třeba dát pozor na propojení termokamery do počítače, v některých případech zde může nastat problém se správným zapojením propojovacího kabelu do termokamery. Určitě je pak nutné před hodinou zkontrolovat funkčnost kamery i softwaru instalovaného v počítači. Při dodržení těchto zásad je možné realizovat v této práci popsané i další experimenty poměrně jednoduše, přičemž je pravděpodobné, že užití termokamery přispěje k oživení hodiny a žáci se budou zajímat o různé věci související s tímto tématem.

5. Vybrané aplikace termografie

5.1. Měření rychlých časových změn teploty – vysokorychlostní termografie

V průmyslových aplikacích se poměrně často setkáváme se situací, kdy je potřeba změřit časový vývoj teploty povrchu nějaké součástky, přičemž zde dochází k velmi rychlým změnám. Konvenčními metodami měření teploty je toto určení prakticky nemožné, neboť je zde nutný určitý čas na ustálení systému měřený objekt-teploměr. Naopak termografie v současném stadiu vývoje umožňuje měřit teplotu s vzorkovací frekvencí až 1 kHz, získáváme tak o teplotě měřeného povrchu tisíc údajů za jedinou sekundu. Vzhledem k způsobu měření je přitom jasné, že měříme skutečně aktuální hodnoty, není zde potřeba žádný čas na ustálení.

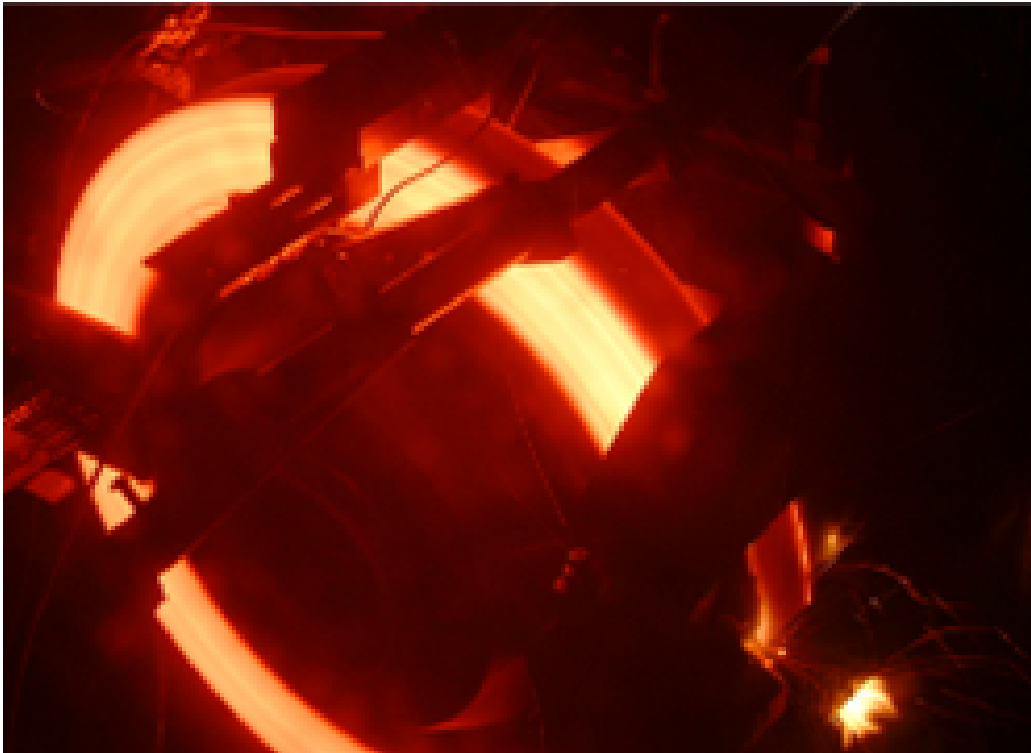
Měření velmi rychlých změn teploty budeme demonstrovat na konkrétním příkladu. Před několika lety realizoval výzkumný tým NTC projekt s průmyslem, v jehož rámci měřil teplotu brzdových kotoučů u brzdových systémů pro vozy Formule 1, které vyrábí firma AP Racing. Tato společnost má s výrobou brzdových systémů velké zkušenosti a v současné době její výrobky využívá hned několik týmů ve Formuli 1 (Ferrari, Renault, McLaren).



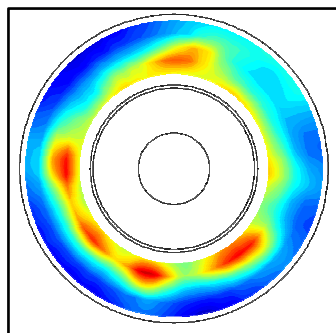
Obrázek 21: Auto formule 1

První vítězství vozu s brzdami od AP Racing si připsal jezdec Mario Andretti z týmu Ferrari na Velké ceně Jižní Afriky v roce 1971. Je jasné, že při prudkém brzdění se brzdové kotouče výrazně zahřívají, přičemž se jedná o velmi rychlý proces. Pro výrobce je samozřejmě velmi důležité vědět, kde konkrétně je toto zahřátí největší a jakých

teplot je zde dosahováno. To je nesmírně důležité například z hlediska výběru správného materiálu pro výrobu daných kotoučů.



Obrázek 22: Zahřívání brzdových kotoučů během brzdění - uspořádání



Obrázek 23: Schematické rozložení teploty u brzdového kotouče během brzdění

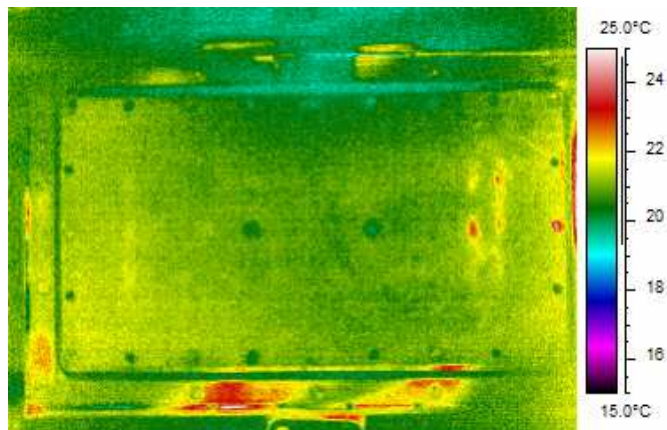
Problém je ten, že vzhledem k rychlosti procesu není možné teplotu změřit klasickým způsobem. Termografie je zde ideálním řešením, neboť umožňuje podchytit i takto rychlé změny a dát přesnou představu o časové a prostorové závislosti povrchové teploty brzdových kotoučů. Samozřejmě nebylo možné měření provést přímo při brzdění vozu Formule 1, brzdění za daných podmínek lze však snadno simulovat způsobem, jež je patrný z obrázku 22. Vzhledem k tomu, že bylo třeba změřit co nejpřesněji průběh teploty, bylo nutné správně nastavit řadu parametrů měření jako

emisivitu či teplotu odraženého záření (viz podkapitola 3.2.). Pro provedení řady experimentů však bylo možné skutečně stanovit rozložení teploty v jednotlivých částech, výstup z měření je schematicky uveden na obrázku 23. Samozřejmě celá problematika je podstatně komplexnější, tento příklad však velmi dobře ilustruje jednu z oblastí aplikací, kde hraje termografie prakticky nezastupitelnou roli.

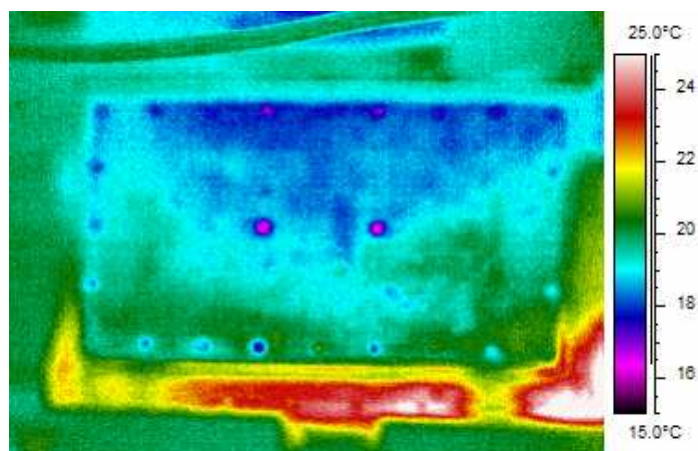
5.2. Měření malých teplotních rozdílů pomocí termografie

Díky vysoké citlivosti kvalitních termokamer je možné pomocí termografie zachytit i malé rozdíly teplot, které jsou klasickými metodami měření často těžko zjištělné či prakticky nezjištělné. Tuto skutečnost budeme demonstrovat na praktickém příkladu z laboratoře Katedry fyziky ZČU z roku 2011. V této laboratoři se provádí depozice tenkovrstvých materiálů metodou magnetronového naprašování, tj. pomocí plazmového výboje za nízkého tlaku. Plazmový výboj výrazně zahřívá rozprašovaný terč, který je přilepen k základní měděné desce indiem majícím teplotu tání 156,6 °C. Při překročení této teploty dojde k roztavení india, jež má za následek vznik oblouků a okamžité ukončení depozice vrstvy. Z tohoto důvodu je třeba terč efektivně chladit vodou. V roce 2011 došlo k opakovanému roztavení india, což nasvědčovalo tomu, že chlazení prováděné pomocí kanálek v měděné desce není zcela v pořádku, ačkoliv voda proudila do chladicího systému stejně jako dříve.

Vzhledem k tomu, že k roztavení india došlo vždy na jedné straně terče, vzniklo podezření, že chlazení není homogenní např. z důvodu ucpání některých kanálek v jedné části měděné chladicí desky. Toto podezření bylo třeba ověřit. Měření teploty chladicí desky během samotného výboje je však vzhledem k povaze procesu v podstatě nemožné a při situaci s vypnutým výbojem by případný teplotní rozdíl způsobený nehomogenním chlazením byl velmi malý a jen stěží zjištělný klasickými způsoby (ostatně na dotyk se obě strany desky zdály stejně teplé). Bylo rozhodnuto zkusit ověřit případné nehomogenní chlazení desky pomocí termografie s tím, že budou pořízeny snímky před zapnutím chlazení a následně po jeho zapnutí. Výsledek je vidět na obrázku 24. Je patrné, že po zapnutí chlazení se jedna strana desky skutečně ochladila o něco méně než druhá. Rozdíl teplot nebyl velký, po zapnutí výboje však stačil k tomu, aby na jedné straně terče došlo k překročení teploty tání india, zatímco na druhé nikoliv.



Obrázek 24a: rozložení teploty v chladící měděné desce před zapnutím chlazení



Obrázek 24b: rozložení teploty v chladící měděné desce po zapnutí chlazení

Termografie tak umožnila potvrdit podezření o nerovnoměrném chlazení, které by jinak bylo ověřitelné jen těžko. Poznamenejme ještě, že měření bylo možné rozumně provést jen díky tomu, že měděná deska byla na povrchu zoxidovaná a tudíž její emisivita byla v souladu s údaji z tabulky 1 uvedené v části 3.2. poměrně velká. Po jejím vyleštění, které bylo z určitých důvodů vhodné provést, již nebylo možné kontrolní měření rozumně vyhodnotit vzhledem k prudkému poklesu emisivity a rostoucímu vlivu odraženého zářivého toku vyvolaného jinými zdroji v laboratoři.

5.3. Užití termografie v boji proti požárům

Poměrně často se ve zprávách o požárech objevuje věta „K vyhledání možných skrytých ohnisek požáru pomohla hasičům termokamera, která umožňuje odhalit skrytá ohniska i pod povrchem“. Jakým způsobem tato aplikace termografie funguje a není uvedená informace v rozporu s tím, že pomocí termokamery se určuje vždy povrchová teplota a nikoliv teplota uvnitř tělesa?

O žádný rozpor se nejedná, termokamera sice skutečně měří teplotu povrchu, ale není překvapivé, že nad skrytým ohniskem požáru je i povrchová teplota vyšší, než ve větší vzdálenosti od něj. Tato technologie má neocenitelný význam např. při dohašování rozlehlých lesních požárů, kdy v minulosti docházelo často k tomu, že se již zdánlivě uhašený oheň znovu rozhořel ze skrytých ohnisek pod povrchem. Při velké rozloze zasaženého území bylo extrémně náročné prohledávat shořelou oblast a tato skrytá ohniska odhalovat a dohašovat. Termokamera zde umožnila výrazné zlepšení.

Termokameru ovšem hasiči nevyužívají zdaleka pouze k lokalizaci skrytých ohnisek požáru. Využije se i při vyhledávání osob v zakouřeném prostředí, kde je viditelnost omezena na minimum. Díky tomu bylo zachráněno velké množství lidských životů, uvádí se, že poprvé byla termokamera využita v roce 1988 při požáru v New Yorku . Další informace o využití termokamery v boji proti požáru lze najít například v [6i], touto problematikou se však zabývají i výzkumníci ze ZČU, kteří na toto téma v roce 2012 publikovali článek [8].

6. Závěr, další náměty na využití termokamery

V předkládané diplomové práci jsem se zabývala problematikou experimentů s termokamerou ve školské fyzice. Pomocí termokamery vypůjčené ve Výzkumném centru Nové technologie (NTC ZČU) jsem realizovala celkem 15 různorodých pokusů rozdělených do 4 skupin a sepsala k nim návody využitelné učiteli majícími zájem o zařazení tohoto tématu jako motivačního prvku sloužícího ke zatraktivnění výuky. Vedle návodu doplněného o obrázky v samotném textu práce jsou na přiloženém DVD k dispozici i videa z realizace jednotlivých pokusů.

Je třeba zdůraznit, že v podstatě všechny pokusy realizované v této práci jsou kvalitativního charakteru, časový průběh teploty zde nebyl studován. Kvantitativní měření by bez sporu bylo zajímavé, přínosné a umožňovalo by realizaci řady dalších experimentů. Jeho správné provedení by však vyžadovalo podstatně větší zkušenosti, než jaké jsem mohla získat v omezené době práce na tomto materiálu. Ostatně ani u učitelů základních škol se nedá předpokládat, že by se termografií měli možnost zabývat natolik vážně, aby dokázali tuto technologii zvládnout na úrovni umožňující provádět kvalitní měření kvantitativního rázu. Spíše termokameru využijí jako motivační prvek sloužící k oživení výuky a demonstraci určitých efektů, jež jsou bez ní prakticky neprokazatelné nebo prokazatelné podstatně složitější a divácky méně atraktivní cestou.

Na druhé straně je třeba říct, že u některých témat by realizace kvantitativního měření byla velmi lákavá. Z mého pohledu je to například problematika tzv. Mpembova jevu, kterým jsem se zabývala ve své bakalářské práci. Zde by užití termokamery a provedení pečlivé interpretace naměřených hodnot mohlo přinést nové zajímavé informace o tomto stále zcela neobjasněném efektu. Určitě by bylo možné rovněž výrazně rozšířit množinu kvalitativních experimentů s termokamerou a zaměřit pozornost na další témata, která v této práci nejsou zmíněna nebo jsou zmíněna pouze okrajově. Inspiraci k dalším experimentům lze najít v zahraniční literatuře, například v Německu byla vytvořena diplomová práce věnující se především problematice tření s užitím termokamery.

Mým cílem bylo vytvořit kompaktní materiál, který by v sobě zahrnoval nejzákladnější informace o teoretických principech termografie, jejím historickém vývoji, technických aspektech problematiky, významných praktických aplikacích a především školských pokusech realizovatelných s pomocí této moderní technologie. Věřím, že se tento cíl

podánilo alespoň částečně naplnit, a že vytvořený materiál bude přínosný pro některé učitele i další zájemce o tuto zajímavou a stále se rozvíjející tematiku.

Přehled použité literatury

Knižní a časopisecké zdroje

- [1] Randa, M, Prokšová, J. Sbíрка úloh z fyziky IV, Atomová a jaderná fyzika, Západočeská univerzita Plzeň, ISBN: 80-7043-099-0
- [2] Infrared thermocamera thermoIMAGER TIM, Operators manual
- [3] Software for infrared camera thermoIMAGER 160, Operators manual
- [4] Strahl, A., Müller, R. Was passiert eigentlich, wenn ich mal keinen Lüfter auf meinem Prozessor habe? - Versuche mit der Wärmebildkamera, Didaktik der Physik, Frühjahrstagung Bochum 2009
- [5] Schormann, J., Priemer, B. Der „Knickwärmer“ im naturwissenschaftlichen Unterricht. PRAXIS DER NATURWISSENSCHAFTEN – PHYSIK IN DER SCHULE, 2009, roč. 57, č.8, s. 26-31. ISSN: 0177-8374
- [6] Neupert, A. Infrarotaufnahmen im Physikunterricht, Bakalářská práce (Univerzita Lipsko), 2010.
- [7] Žilavý, P. Tajemství indukčního vařoče, sborník z konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 13 (editor K. Rauner), Západočeská univerzita Plzeň. ISBN: 978-80-7043-728-5.
- [8] Švantner, M., Vacíková, P., Honner, M. IR thermography heat flux measurement in fire safety applications. *INFRARED PHYSICS & TECHNOLOGY*, 2012, roč. 55, č. 1, s. 292-298. ISSN: 1350-4495

.Zdroje z internetu

- [1i] On the possible future revision of the International System of Units (závěry z 24. konference o mírách a váhách), dostupné on-line na http://www.bipm.org/utis/en/pdf/24_CGPM_Resolution_1.pdf (citováno dne 8. 4. 2013)
- [2i] Infrared History, dostupné on-line na <http://www.zytemp.com/infrared/history.asp> (citováno dne 2. 4. 2013)

[3i] Termokamera- základní parametry, dostupné on-line na <http://www.centrumtermografie.cz/termokamera-zakladni-parametry/> (citováno dne 3. 4. 2013)

[4i] Duršpek, J., Prokšová, J. Aplikace nerovnovážné termodynamiky v hydrodynamice, chemii a biologii, dostupné on-line na <http://nelterm.kof.zcu.cz/projekt/projekt.htm> (citováno dne 8. 4. 2013)

[5i] Dlouhý, M. Přehřívání počítače: Jak proti tomu bojovat a co je pro váš počítač už škodlivé?, dostupné on-line na <http://objevit.cz/prehrivani-pocitace-jak-proti-tomu-bojovat-a-co-je-pro-vas-pocitac-uz-skodlive-t10164> (citováno dne 1. 4. 2013)

[6i] Thermal imaging for firefighting applications, dostupné na <http://www.infraredcamerasinc.com/infrared-thermography-firefighting.html> (citováno dne 7. 4. 2013)

Seznam obrázků a tabulek v textu

Obrázek č.1. <http://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/planck.html>

Obrázek č. 2. <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0202.htm>

Obrázek č. 3. <http://www.zytemp.com/infrared/history.asp>

Obrázek č. 4. <http://www.termokamera.com/testo/0/0/2/11>

Obrázek č. 5 poskytnut Ing. Jiřím Tesařem z NTC ZČU

Obrázek 6: Uspořádání pokusu zahřívání tyčí z různých kovů

Obrázek 6a: Zahřívání dvou tyčí z různých kovů –počáteční stav

Obrázek 6b: Zahřívání dvou tyčí z různých kovů – rozdíl teplot

Obrázek 7a: Ohřev litinové plotýnky-počáteční stav

Obrázek 7b: Ohřev litinové plotýnky – nepřímé ohřívání středu

Obrázek 8a: Míšení vody různé teploty – efekt nalévání teplé vody

Obrázek 8b: Míšení vody různé teploty – efekt proudění

Obrázek 9a: Míšení teplé vody a studeného oleje – pohled shora

Obrázek 9b: Míšení teplé vody a studeného oleje – pohled z boku

Obrázek 10: Indukční vařič

Obrázek 10a: Uspořádání pokusu s alobalem

Obrázek 10b: Indukční ohřev alobalu – prvotní stav

Obrázek 10c: Indukční ohřev alobalu – jeho vznícení

Obrázek 11a: Uspořádání pokusu s prstencem

Obrázek 11b: Levitující kroužek– počáteční stav při ohřevu

Obrázek 11c: Levitující kroužek – zahřátí a levitace

Obrázek 12a: Uspořádání pokusu s malou žárovkou

Obrázek 12b: Indukční ohřev a malá žárovka – postupné zahřívání

Obrázek 12c: Indukční ohřev a malá žárovka – zvýšení teploty žárovky

Obrázek 13a: Uspořádání pokusu s velkou žárovkou i malou žárovkou

Obrázek 13b: Indukční ohřev a velká žárovka – postupné zahřívání

Obrázek 13c: Indukční ohřev a velká žárovka – zvýšení teploty žárovky

Obrázek 14a: Uspořádání experimentu s Jákobovým žebříkem

Obrázek 14b: Zahřívání transformátoru a jiskrový výboj 1

Obrázek 14c: Zahřívání transformátoru a jiskrový výboj 2 (vyšší teplota transformátoru)

Obrázek 15a: Uspořádání experimentu s kroužkem

Obrázek 15b: Levitující kroužek 1

Obrázek 15c: Levitující kroužek 2

Obrázek 16a: Uspořádání experimentu s odporovým drátem

Obrázek 16b: Ohřev odporového drátu – počáteční fáze

Obrázek 16c: Ohřev odporového drátu 2

Obrázek 17a: Uspořádání experimentu se zkratováním baterie

Obrázek 17b: Zkratování baterky – její zahřátí

Obrázek 18a: Zvýšení teploty třením – počáteční stav

Obrázek 18b: Zvýšení teploty třením – koncový stav

Obrázek 19: Rozložení teploty u plamene plynového kahanu

Obrázek 20a: Fotka počítače

Obrázek 30b: Zahřívání počítače – počáteční stadium

Obrázek 20c: Zahřívání počítače – stav po delší době

Obrázek 21: Auto formule 1

<http://images.google.cz/imgres?q=formule+1+ferrari+br%C5%BE%C4%9Bn%C3%AD&hl=cs&biw=1400&bih=767&tbn=isch&tbnid=D75xTiuIPWxpFM:&imgrefurl=http://f1news.autoroad.cz/novinky/42084-neobvykle-problemy-ferrari-ve-trech-oblastech-zaroven-motor-brzdy-prevodovka/&docid=sLeMN-8e8RojhM&itg=1&imgurl=http://f1news.cz/pictures/photo/2012/09/07/134704512314234.jpg&w=351&h=234&ei=FytjUbDWK8it4AS->

4IDYBA&zoom=1&iact=rc&dur=344&page=1&tbnh=142&tbnw=224&start=0&ndsp
=25&ved=1t:429,r:20,s:0,i:144&tx=122&ty=68

Obrázek 22: Zahřívání brzdových kotoučů během brzdění – uspořádání, převzato z motivační prezentace Katedry fyziky FAV pro střední školy

Obrázek 23: Schematické rozložení teploty u brzdového kotouče během brzdění, převzato z motivační prezentace Katedry fyziky FAV pro střední školy

Obrázek č. 24: poskytnuto Mgr. Jiřím Kohoutem z archivu laboratoře UF 006 KFY ZČU

Tabulka č. 1. zpracována na základě reference [2]

Resume

This diploma thesis is devoted to using of thermographic measurements in school physics. Practically no material about this topic was published in Czech Republic in spite of that thermography is very fast growing part of applied physics and for example in Germany, great attention was devoted to experiments with thermocamera in school physics. My aim was to prepare compact material which could be used as a some kind of manual by teachers of Czech schools interested in this topic.

In the second chapter (after the short Introduction), I briefly discussed the term temperature from the point of view of thermodynamics and statistical physics. Some usual methods of the measurements of temperature are given in this chapter too. Moreover, the theory of radiation of black body which is the physical background of thermography is described here and some basic information about historiography of thermography are given here too.

The third chapter is devoted to discussion of technical details of thermography. The important parameters of thermocamera are described in the first part of the chapter followed by description of emissivity and other factors strongly influencing accuracy of the thermographic measurements. Technical information about thermocamera borrowed from New Technology Center of University of West Bohemia are given in the last part of this chapter.

In the fourth chapter, the experiments, partly original and partly taken from the literature, are divided to four groups in order to increase of clarity of the thesis. The experiments are described from the point of view of their arrangement, physical explanation and applications in the school physics. The categorization to the education in physics in basic level is briefly discussed in the last part of the chapter.