



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

PŘESNOST MĚŘENÍ V KONTEXTU HISTORIE

ACCURACY OF MEASUREMENT IN THE CONTEXT OF HISTORY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristýna Jemelíková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Vdoleček, CSc.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Studentka:	Kristýna Jemelíková
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. František Vdoleček, CSc.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Přesnost měření v kontextu historie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Velmi často se v praxi řeší potřebná přesnost výsledků měření. Práce má rešeršní charakter a řeší tuto základní charakteristiku, jak procházela mnohdy složitým historickým vývojem, než se dospělo k dnešní úrovni měření a jeho přesnosti.

Cíle bakalářské práce:

Vypracujte teoretickou studii, zabývající se vývojem dosahované přesnosti měření v průběhu historie. Pokuste se vysledovat celý vývoj této základní charakteristiky důležitého oboru činnosti člověka od dávné historie až po dnešní moderní technologie. Všimněte si rovněž dřívějších hodnocení přesnosti v kontextu dnešní teorie nejistot měření. Veškeré obecné trendy dokumentujte také konkrétněji na vybrané technické veličině.

Seznam doporučené literatury:

AUGUSTA, P., KLŮNA, J. (1990): Tajemství přesnosti. Praha: SNTL Praha.

ŠINDELÁŘ, V. , TŮMA, Z. (2002): Metrologie její vývoj a současnost. Praha. Česká metrologická společnost Praha.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem měření z pohledu přesnosti. V první části je věnována pozornost obecnému vývoji měření od odhadování v dávnověku, přes určování chyb v minulosti, až po dnešní vyhodnocování nejistot měření. Druhá část se zaměřuje na vývoj měření a jeho přesnosti na zvolené reprezentativní veličině – teplotě.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with developments in measurement accuracy. First part is dedicated to developments in accuracy throughout history: from the ancient times, through historical error estimation methods and today's error and uncertainty evaluation methods. Second part focuses on developments in measurement and its accuracy of a chosen physical quantity – temperature.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přesnost, chyba měření, nejistota měření, teplota, teploměr

KEYWORDS

Accuracy, measurement error, measurement uncertainty, temperature, thermometer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JEMELÍKOVÁ, Kristýna. *Přesnost měření v kontextu historie*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117048>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce František Vdoleček.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě děkuji Ing. Františku Vdolečkovi, CSc. za odborné vedení, podnětné návrhy a trpělivost při vedení mé bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Františka Vdolečka a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 22. 5. 2019

.....

Kristýna Jemelíková

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	OBECNĚ O MĚŘENÍ.....	17
2.1	Rozvoj měření.....	17
2.2	Metrologie	17
2.2.1	Vybrané pojmy z metrologického slovníku.....	19
2.2.2	Metrologická návaznost.....	21
2.2.3	Mezinárodní soustava jednotek SI.....	22
3	VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	25
3.1	Chyby měření	25
3.1.1	Chyby systematické	25
3.1.2	Chyby náhodné	25
3.1.3	Chyby hrubé	26
3.2	Zdroje nepřesnosti měření	26
3.3	Nejistoty měření	27
3.3.1	Vyhodnocení standardní nejistoty typu A	27
3.3.2	Vyhodnocení standardní nejistoty typu B	27
3.3.3	Kombinovaná a rozšířená nejistota.....	28
4	HISTORIE MĚŘENÍ TEPLoty	29
4.1	Vývoj teplotních stupnic.....	29
4.1.1	Počátky měření teploty	29
4.1.2	Fahrenheitova stupnice	30
4.1.3	Réamurova stupnice	30
4.1.4	Celsiova stupnice	30
4.1.5	Kelvinova stupnice	30
4.1.6	Rankinova stupnice.....	30
4.1.7	Mezinárodní teplotní stupnice	31
4.2	Teploměry v historii	33
4.2.1	Měření teploty v 18. století.....	33
4.2.2	Měření teploty v 19. století.....	34
4.2.3	Měření teploty ve 20. století.....	35
5	MĚŘENÍ TEPLoty V SOUČASNOSTI	37
5.1	Definice teploty	38
5.1.1	Definice kelvinu	38
5.1.2	Mezinárodní stupnice ITS-90	39
5.2	Přehled zařízení	40
5.2.1	Dilatační teploměry	42
5.2.2	Elektrické teploměry.....	44
5.2.3	Pyrometry	47
5.3	Metrologie teploty v praxi	48
5.4	Další rozvoj měření	50
6	POROVNÁNÍ TEPLOMĚRŮ - EXPERIMENT.....	51
7	ZÁVĚR	53
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	55

1 ÚVOD

Od dávných dob měl člověk potřebu hodnotit svět kolem sebe. Zpočátku spíše odhadoval, ale postupně začal určovat vzdálenosti, množství nebo čas pro potřeby stavitelství, obchodu a zemědělství. Rozvoj lidského společenství měnil i pohled na měření a na jeho přesnost.

V první části tato práce mapuje vývoj metrologie od někdejších subjektivních odhadů po dnešní vysoce přesné metody. Ve druhé části bude historický kontext ilustrován na teplotě, která patří mezi nejdůležitější fyzikální veličiny a jako taková je jedním ze základních reprezentantů soustavy SI. Její význam spočívá v tom, že ovlivňuje další chování hmoty. Nejen pro technickou praxi je nezbytné znát teplotu prostředí i pracovní látky. Začátky určování teploty spočívaly na tělesném pocitu, dále hrála velkou roli zkušenost, např. při tepelném zpracování kovů se člověk řídil barvou rozžhavené látky. První seriózní pokusy o měření teploty a sestavení teploměru jsou ze začátku 17. století, kdy Galileo Galilei zhotovil primitivní teploměr založený na teplotní roztažnosti vzduchu. Vývoj pokračoval sestavením stupnic s ověřenými referenčními body, změnou teplotních médií až po bezdotykové metody měření. V dnešní době je co nejpreciznější určení teploty nepostradatelnou součástí výrobních procesů nebo nejrůznějších inteligentních systémů. Na závěr byl proveden drobný experiment, který porovnal běžné metody měření teploty.

2 OBECNĚ O MĚŘENÍ

Měření je souhrnem operací s cílem stanovit hodnotu měřené veličiny. Jeho výstupy slouží jako věrohodné zdroje informací pro zhodnocení stavu věcí prakticky ve všech odvětvích lidské činnosti.

2.1 Rozvoj měření

Už ve starověkých říších měli lidé potřebu měřit čas a vzdálenost. Rozvojem směnného obchodu se přidal požadavek na zavedení navzájem porovnatelného určení velikosti a objemu zboží. Až do pozdního středověku našlo měření uplatnění především v zemědělství, obchodu, astronomii a stavebnictví. Středověké definice byly nedostatečné, míry nestálé v čase a jednotka nebyla ani v rámci regionů. Jednotky se zaváděly podle postupu v poznání a to dosti nahodile, bez vzájemných souvislostí. Dalším vývojem se ukázalo, že existují veličiny nezávislé na ostatních a mohou tak být považovány za základní a další veličiny jsou z nich následně odvozeny. Vědecký a technický pokrok přinášel stále větší požadavky na přesnost měření i jejich reprodukovatelnost. Koncem 18. století byl ve Francii oficiálně definován metr jednotkou délky. Následovalo odvození jednotek objemu (dm^3) a hmotnosti (kg). Do metrického systému byla přidána ještě sekunda jako jednotka času. Na mezinárodní konferenci byla 20. května 1875 přijata 18 státy, včetně Rakouska-Uherska a USA, Metrická konvence (Dohoda o metru). Součástí dohody bylo i zřízení vrcholného orgánu Generální konference vah a měr, Mezinárodního výboru vah a měr a Mezinárodního úřadu vah a měr, jehož hlavním úkolem bylo uchovávat prototypy metru a kilogramu a porovnávání národních prototypů. K červenci 2014 má tato organizace 56 plných a 41 přidružených členů. Kvůli dalšímu rozvoji vědy, výroby a obchodu byla v roce 1960 přijata Mezinárodní soustava jednotek SI o 6 základních jednotkách: délka – metr (m), hmotnost – kilogram (kg), čas – sekunda (s), elektrický proud – ampér (A), termodynamická teplota – kelvin (K) a svítivost – kandela (cd). O několik let později byla přidána ještě jednotka látkového množství – mol (mol). Od vyhlášení této soustavy bylo provedeno několik drobnějších změn v ohledu přesnějších definic. Poslední velká změna definic vstoupí v platnost 20. května 2019. [1, 2, 3, 4, 5]

2.2 Metrologie

Metrologie je vědní a technický obor, který zahrnuje vše, co souvisí s měřením. Ve své činnosti se zaměřuje na definování mezinárodně uznávaných měřicích jednotek, jejich realizaci pomocí vědeckých metod a udává návaznosti při dokumentování správnosti měření. Metrologie se člení do 3 kategorií podle složitosti procesů a požadavků na přesnost:

Vědecká metrologie – zabývá se výzkumem, vývojem a organizací aktivit spojených s vývojem a uchováním etalonů a určování základních fyzikálních konstant. Jedná se z vědeckého hlediska o nejvyšší úroveň metrologie.

Průmyslová (podniková) metrologie – zajišťuje náležitou funkci měřidel používaných v průmyslu a ve výrobních, zkušebních a vývojových procesech, pro zajištění kvality života obyvatel a pro akademický výzkum.

Legální metrologie – vztahuje se na činnosti, které vyplývají ze zákonem stanovených požadavků a týkají se měření, měřících jednotek, měřidel a metod měření a jsou prováděny oprávněnými orgány.

Bez platné mezinárodní definice existuje ještě fundamentální metrologie, ale obecně je tak označována činnost s nejvyšší přesností měření v daném oboru. [6]

Mezinárodní orgány Metrické konvence:

Generální konference vah a měr (CGPM) – Vrcholný orgán Metrické konvence. Delegáti z členských zemí schvalují a aktualizují soustavu SI s výsledky základního metrologického výzkumu.

Mezinárodní úřad pro váhy a míry (BIPM) – Úřad řídí výzkum fyzikálních jednotek a etalonů.

Mezinárodní výbor pro váhy a míry (CIPM) – Výbor je řídicím orgánem, má 18 členů, kteří jsou voleni na CGPM. Provádí dohled nad BIPM a jmenuje předsedy poradních výborů.

České orgány metrologie:

Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO)

Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ)

Český metrologický institut (ČMI)

Český institut pro akreditaci (ČIA)

Český normalizační institut (ČNI)

výsledek měření (measurement result) – soubor hodnot veličiny přiřazený měřené veličině společně s jakoukoliv další dostupnou relevantní informací

naměřená hodnota veličiny, naměřená hodnota (measured quantity value, measured value of a quantity measured value) – hodnota veličiny reprezentující výsledek měření

pravá hodnota veličiny, pravá hodnota, skutečná hodnota (true quantity value, true value of a quantity, true value) – hodnota veličiny, která je ve shodě s definicí veličiny

přesnost měření, přesnost (measurement accuracy) – těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou veličiny měřené veličiny

pozn. Pojem není veličinou a není dán číselnou hodnotou veličiny. Měření je prohlášeno za přesnější, když nabízí menší chybu měření.

chyba měření, chyba (measurement error, error of measurement, error) – naměřená hodnota veličiny minus referenční hodnota veličiny

podmínka opakovatelnosti měření, podmínka opakovatelnosti (repeatability condition of measurement, repeatability condition) – podmínka měření ze souboru podmínek, který zahrnuje stejný postup měření, stejný obslužný personál, stejný měřicí systém, stejné pracovní podmínky a stejné místo, a opakování měření na stejném objektu nebo podobných objektech v krátkém časovém úseku

podmínka reprodukovatelnosti měření, podmínka reprodukovatelnosti (reproducibility condition of measurement, reproducibility condition) – podmínka měření ze souboru podmínek, který zahrnuje různá místa, obslužný personál, měřicí systémy a opakování měření na stejném objektu nebo podobných objektech

nejistota měření, nejistota (measurement uncertainty, uncertainty of measurement, uncertainty) – nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace

kalibrace (calibration) – činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace

ověřování (verification) – poskytnutí objektivního důkazu, že daná položka splňuje specifikované požadavky

metrologická srovnatelnost výsledků měření, metrologická srovnatelnost (metrological comparability of measurement results, metrological comparability) – srovnatelnost výsledků měření pro veličiny daného druhu, které jsou metrologicky návazné ke stejné referenci

měřidlo, měřicí přístroj (measuring instrument) – zařízení používané k měření buď samotné, nebo ve spojení s jedním nebo více přídatnými zařízeními

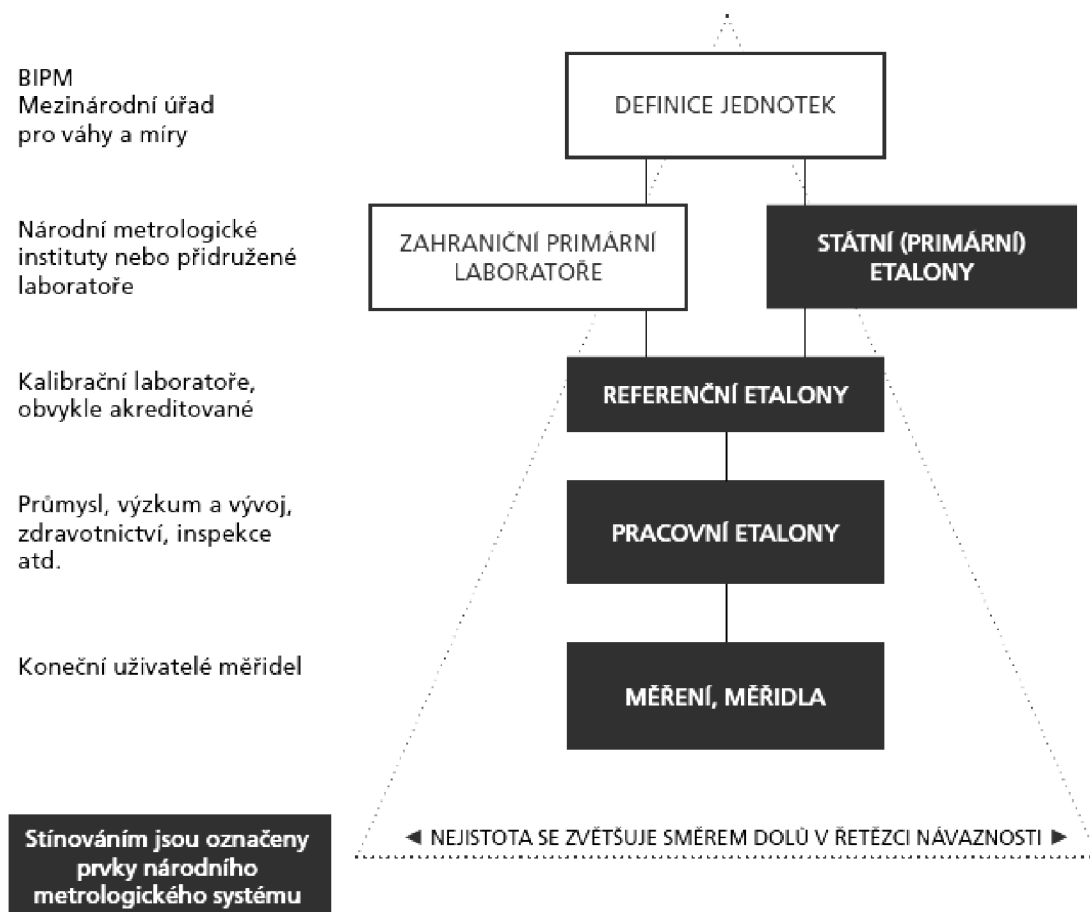
měřicí interval, pracovní interval (measuring interval, working interval) – soubor hodnot veličin stejného druhu, které mohou být měřeny daným měřidlem nebo měřicím systémem se specifikovanou přístrojovou nejistotou za definovaných podmínek

třída přesnosti (accuracy class) – třída měřidel nebo měřicích systémů, které splňují stanovené metrologické požadavky určené k udržení chyb měření nebo přístrojových nejistot za specifikovaných pracovních podmínek ve specifikovaných mezích

etalon, standard měření, standard (measurement standard, etalon) – realizace definice dané veličiny, se stanovenou hodnotou veličiny a přidruženou nejistotou měření, používaná jako reference

2.2.2 Metrologická návaznost

Řetězec návaznosti, viz Obr. 2.2, je nepřerušovaná posloupnost porovnání, pro něž jsou udány nejistoty. Je tak zajištěno, že výsledky měření jsou vztaženy k referencím vyšší úrovně, nakonec až k primárním etalonům. Koncový uživatel získává návaznost na nejvyšší mezinárodní úrovni prostřednictvím národního metrologického institutu nebo sekundární kalibrační laboratoře. [7]



Obr. 2.2: Řetězec metrologické návaznosti [7]

2.2.3 Mezinárodní soustava jednotek SI

Přijetím soustavy jednotek SI byla odstraněna rozmanitost používaných jednotek. Tato soustava je dnes uplatňována ve většině vědních a technických oborů. Hlavní snahou orgánů Metrické konvence je rozšíření do dalších oblastí. Mezinárodní soustava rozděluje jednotky na základní a odvozené. [5]

Tab. 2.1: Základní jednotky soustavy SI [8]

název veličiny	značka	jednotka
délka	l	metr
hmotnost	m	kilogram
čas	t	sekunda
elektrický proud	I	ampér
termodynamická teplota	T	kelvin
svítivost	I	kandela
látkové množství	n	mol

Na zasedání Generální konference pro míry a váhy byla dne 16. listopadu 2018 schválena změna definic základních jednotek SI. Stávající definice sekundy, metru a kandely pouze změni formulaci s ohledem na jednotný formát pro všechny jednotky. Definice kilogramu, ampéru, kelvinu a molu se změni tak, aby tyto jednotky byly pevně spjaty s určitou konstantou. Stávající a nové pojetí definic názorně přibližují schémata na obrázku 2.3. [9, 10]

S platností od 20. května 2019 jsou základní jednotky napevno navázány na následující fyzikální a technické konstanty:

frekvence záření, které vzniká při přechodu atomu cesia 133 mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu ($\Delta\nu_{Cs}$)

rychlost světla ve vakuu (c)

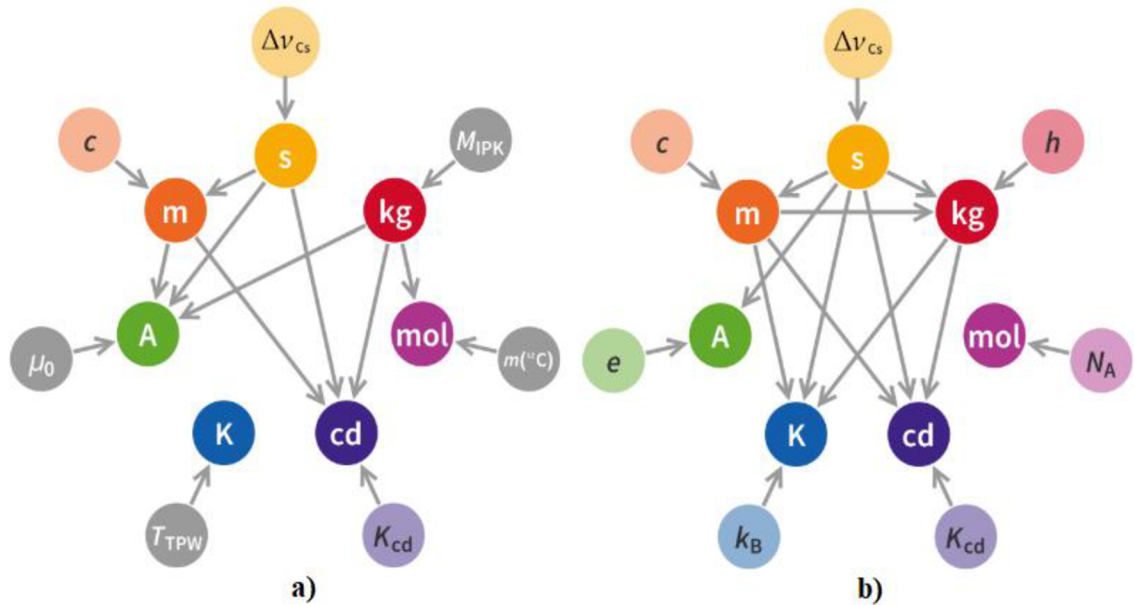
Planckova konstanta (h)

elementární náboj (e)

Boltzmannova konstanta (k)

Avogadrova konstanta (N_A)

světelná účinnost monochromatického záření o frekvenci 540 THz (K_{cd}) [10]



Obr. 2.3 Vzájemné návaznosti a) starých jednotek SI, b) nových jednotek SI [9]

V důsledku provedených změn známe skutečné hodnoty některých fundamentálních konstant (např. molární plynové konstanty, Faradayovy konstanty) bez nejistot daných měření. Kilogram již není navázán na mezinárodní etalon, který i přes veškerou péči měnil nepatrně svou hodnotu a tím vnášel nestabilitu do celé soustavy. Zásadně se změny projeví především u extrémně přesných přístrojů, pro které byly staré definice nedostatečné. [11]

3 VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

V dávnější minulosti naši předkové přesnost svých měření příliš neřešili, i když se dle požadavků a možností snažili. Až relativně nedávno se nepostradatelnou součástí měření stalo vymezení přesnosti, s jakou byla určena hodnota příslušné veličiny. Nejdříve byla přesnost vyjadřována pomocí chyby měření, ale zvýšené požadavky dnešní vědy a techniky si vyžádaly stanovení rozptylu hodnot, tedy hodnocení přesnosti výsledků měření prostřednictvím nejistoty. Chyby jsou však pro přiblížení situace používány v praxi stále.

3.1 Chyby měření

Každé měření je zatíženo určitou chybou, protože nelze zajistit zcela ideální podmínky. Naměřená hodnota se tak vždy pohybuje kolem skutečné hodnoty. Chyby je možno vyjádřit v absolutních nebo relativních hodnotách. Jako chyba absolutní $\Delta(x)$ je označován rozdíl mezi hodnotou naměřenou x_m a skutečnou x_s , viz rovnice 3.1.

$$\Delta(x) = x_m - x_s \quad (3.1)$$

Relativní chybu $\delta(x)$ určíme ze vztahu:

$$\delta(x) = \frac{\Delta(x)}{x_s} \quad (3.2)$$

Chyby můžeme rozdělit na systematické, náhodné a hrubé. [12]

3.1.1 Chyby systematické

Hodnota systematické chyby má při stejných podmínkách stálou velikost a znaménko nebo se změnou podmínek mění podle známé závislosti. Tuto chybu nelze charakterizovat na základě opakovaných měření. Je však možné označit v měřicím systému její zdroj a chybu zmenšit vhodnou kompenzací, zkorigováním nebo odstraněním příčiny. Část neodhalených systematických chyb zůstává i po pečlivém rozboru zdrojů. Množství odhalených chyb proto záleží na schopnostech a zkušenostech operátora. [5, 12, 13]

3.1.2 Chyby náhodné

Náhodné chyby jsou těžko předvídatelné, působí zcela nahodile a nelze jednoznačně určit jejich zdroj. Při opakovaných měřeních se mění velikost i znaménko, proto je nutné údaje z měření zpracovat statisticky, nejčastěji pomocí Normálního rozdělení. Rozptýlenost výsledků nejčastěji reprezentuje směrodatná odchylka výběrového souboru $s(x)$ nebo směrodatná odchylka aritmetického průměru $s(\bar{x})$, které vypočítáme dle vztahů:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (3.4)$$

$s(x)$ – odchylka výběrového souboru

x_i – naměřená hodnota

\bar{x} – aritmetický průměr z naměřených hodnot

n – počet měření

$s(\bar{x})$ – směrodatná odchylka aritmetického průměru [12, 13]

3.1.3 Chyby hrubé

Vznik hrubých chyb je především systémovým selháním, které znehodnocuje celé měření. Pokud se naměřená hodnota výrazně liší nebo systém vykazuje neobvyklé chování, je nutné zastavit měření a odstranit příčinu. Předcházet výskytu hrubých chyb lze pouze pečlivým dodržováním daných postupů. [12, 13]

3.2 Zdroje nepřesnosti měření

Zdroje, které ovlivňují přesnost měření, lze rozdělit do následujících skupin:

Přístrojové chyby – chyby, které vyplývají z nedokonalosti použitých měřidel. Tyto chyby vznikají při výrobě, montáži nebo změnou charakteristik po dlouhodobém používání zařízení. Hodnoty některých chyb udává výrobce formou korekčních křivek, ostatní chyby udává stanovením maximální dovolené chyby přístroje.

Chyby instalace – jsou chyby plynoucí z nedostatků v zapojení, uložení a nastavení měřidel. Dále zohledňují vzájemné ovlivňování měřidel nebo ovlivnění hodnot měřené veličiny měřidlem apod.

Chyby metody – tyto chyby jsou způsobeny nedokonalostí použitých měřících metod, nepřesností v hodnotách fyzikálních konstant nebo v odpovídajících závislostech.

Chyby pozorování (pozorovatele) – chyby způsobené nezkušeností nebo nedůsledností pozorovatele.

Chyby vyhodnocení – jsou chyby vzniklé při zpracování naměřených hodnot.

Vlivy prostředí – tyto chyby vnáší do měření nedokonalost a nestálost parametrů prostředí.

Celkový vliv všech zmíněných zdrojů je pomocí součtu systematické a náhodné chyby reprezentován chybou výslednou. Tyto zdroje se posléze staly i zdroji nejistot. [12, 14]

3.3 Nejistoty měření

Do 80. let 20. století byl výsledek měření doplněn údajem o chybě, který vycházel z určení směrodatné odchylky z opakovaných měření. Postupně začala být přesnost měření vyjadřována pomocí nejistoty. Nejistota je parametr přidružený k výsledku měření, který udává rozptyl hodnot důvodně přisuzovaných k měřené veličině.

Ke stanovení standardní nejistoty, značené u , je možné použít metodu statistického zpracování naměřených údajů (metoda typu A) nebo jiné než statistické zpracování naměřených údajů (metoda typu B). Nejistota získaná metodou A se označuje jako nejistota typu A, nejistota získaná metodou B jako nejistota typu B. Nejistota zohledňující oba typy se nazývá kombinovaná. [12, 13]

3.3.1 Vyhodnocení standardní nejistoty typu A

Standardní nejistota typu A, značená u_A , je většinou způsobena náhodnými chybami. Tuto nejistotu určíme statistickým vyhodnocením série měření opakovaných za definovaných podmínek. Standardní nejistotu $u_A(x)$ vypočítáme jako aritmetický průměr směrodatné odchylky:

$$u_A(x) = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (3.5)$$

Hodnota nejistoty typu A klesá s menším rozptylem naměřených hodnot nebo s rostoucím počtem provedených měření. Podmínkou použití této metody je provedení minimálně 10 měření. V případě, že je měření méně, může být výsledek nepřesný a je vhodnější nejistotu odhadnout pomocí metody typu B. [12, 13, 14, 15]

3.3.2 Vyhodnocení standardní nejistoty typu B

Vyhodnocení standardní nejistoty typu B, značené u_B , se vztahuje na známé nebo identifikovatelné zdroje, kdy není nutné provádět opakovaná měření. Vyhodnocení spočívá v kvalifikovaném úsudku, který zahrnuje všechny dostupné informace o měřené veličině a jejích možných změnách. Pro stanovení nejistoty typu B se vychází z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů $u_B(z_j)$. Známe-li maximální odchylku j -tého zdroje nejistoty z_{jmax} , určí se nejistota $u_B(z_j)$ podle vztahu:

$$u_B(z_j) = \frac{z_{jmax}}{k} \quad (3.6)$$

kde k je hodnota, která přísluší zvolené aproximaci rozdělení pravděpodobnosti např. normální rozdělení $k=2$ nebo $k=3$, rovnoramenné $k=\sqrt{3}$, trojúhelníkové $k=\sqrt{6}$ atd.

Výslednou nejistotu $u_B(x)$ pro p zdrojů $z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_p$ určíme dle vztahu:

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 u_B^2(z_j)} \quad (3.7)$$

$u_B(z_j)$ – nejistoty jednotlivých zdrojů

A_j – součinitelé citlivosti jednotlivých zdrojů [12, 13, 14, 15]

3.3.3 Kombinovaná a rozšířená nejistota

Kombinovaná nejistota

Nejistoty se dělí podle způsobu popisu pomocí standardní nejistoty, v praxi je často potřeba využít metod A i B. Dopad této kombinace je vyjádřen pomocí vztahu:

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (3.8)$$

$u_C(x)$ – kombinovaná nejistota [12, 13, 14, 15]

Rozšířená nejistota

Intervaly standardních nejistot pokrývají skutečnou hodnotu měřené veličiny s pravděpodobností cca 68 %, viz tabulka 3.1. Dohodnuté pravděpodobnostní pásmo je však minimálně 95 %. Tohoto intervalu docílíme pomocí rozšířené nejistoty, dle vztahu:

$$U = k \cdot u \quad (3.9)$$

U – rozšířená nejistota

k – koeficient rozšíření

u – standardní nejistota [12, 13, 14, 15]

Tab. 3.1: Koeficienty rozšíření [15]

pravděpodobnost pokrytí (%)	koeficient rozšíření k (-)
68,27	1
95,45	2
99,00	2,58
99,73	3

4 HISTORIE MĚŘENÍ TEPLoty

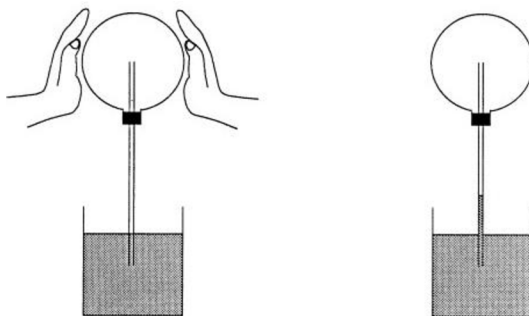
Na rozdíl od měření délky, hmotnosti nebo času, nesahají začátky měření teploty dál, než několik století do minulosti. Význam této stavové veličiny však dokládá zařazení mezi základní jednotky soustavy SI. Teplota, spolu s tlakem, může ovlivnit značnou část měření jiných veličin. Protože měření většinou nelze provádět v prostoru se stálou známou teplotou, je pro dosažení odpovídajícího výsledku nutné teplotu prostředí zaznamenávat a výsledky měření případně korigovat. [5, 16]

4.1 Vývoj teplotních stupnic

Od starověkých civilizací po středověk člověk prohluboval své poznání o teplotě minimálně. Neprobíhalo žádné měření, ale záleželo především na subjektivních pocitech a zkušenostech, např. při pálení hlíny nebo tepelném zpracování kovů. Vytvořit všeobecně platnou teplotní stupnici trvalo velmi dlouho. Bylo potřeba pro intenzitu zvolit stupnici jednotlivých stavů a tyto stavy označit číselnými hodnotami. Měření pak spočívalo v tom, že se daný stav umístil na vhodné místo stupnice a tím se určila jeho číselná hodnota. [16]

4.1.1 Počátky měření teploty

Až začátkem 17. století sestrojil Galileo Galilei svůj primitivní teploměr. Toto zařízení využívající roztažnost vzduchu nazval vzduchovým termoskopem. Jednalo se o tenkou skleněnou trubičku zakončenou baňkou. Baňka byla zahřívána rukou a trubička ponořena do nádoby s obarvenou vodou. Chladnoucí vzduch se smršťoval a vlivem tlaku okolního vzduchu na hladinu voda vnikala do trubičky. Čím více byla baňka zahřátá, tím výše následně vystoupala hladina v trubičce (Obr. 4.1). Tento termoskop sice zachytil i malé změny teploty, ale nedisponoval žádnou stupnicí. Na tento teploměr následně navázali další vynálezci úpravou konstrukce, změnou použité tekutiny a přidáním stupnice. Stupnice nebyly jednotné, proto se údaje navzájem lišily. V roce 1664 Robert Boyle začal používat teplotu tajícího ledu jako základní bod své stupnice a o rok později Christian Huygens došel k poznatku, že teplota varu vody je stálá v závislosti na tlaku. [16, 17]



Obr. 4.1: Galileův vzduchový termoskop [18]

4.1.2 Fahrenheitova stupnice

První známá teplotní stupnice pochází z roku 1724 od Daniela Gabriela Fahrenheita. Ten své teploměry plnil nejprve lihem a následně rtutí. Jako spodní referenční bod své stupnice zvolil teplotu směsi ledu, vody a salmiaku, o které se domníval, že je to nejnižší možná uměle dosažitelná teplota. Tomuto bodu přiřadil hodnotu 0 °F. Horním bodem byla teplota zdravého lidského těla s 96 °F. Vzdálenost mezi těmito teplotami rozdělil na dvakrát po dvanácti dílech a každý z nich ještě na 4 další. Jeden stupeň Fahrenheita (°F) odpovídá velikosti nejmenšího dílku stupnice. Později byla upravena hodnota teploty lidského těla na 98,6 °F a teplota pro tání ledu z 30 °F na 32 °F. Tato stupnice je dodnes používána v některých anglosaských zemích. [19]

4.1.3 Réamurova stupnice

V roce 1730 navrhl René Antoine Ferchault de Réaumur novou teplotní stupnici. Teplotu tání ledu označil číslem 0 a teplotu varu lihu číslem 80. Později, u rtuťových teploměrů, odpovídalo 80 °R teplotě varu vody. Svého času byla tato stupnice rozšířena po Evropě, zejména ve Francii, ale dnes už byla nahrazena jinými. [19]

4.1.4 Celsiova stupnice

Anders Celsius navrhl roku 1736 rtuťový teploměr se stupnicí o dvou referenčních bodech určených při tlaku 101 325 Pa. Jako první bod zvolil teplotu tání ledu, kterému přiřadil hodnotu 100 °C. Druhým bodem, s hodnotou 0 °C, byla teplota varu vody. Tato stupnice byla rozdělena na 100 dílků a každý dílek představoval velikost jednoho stupně Celsia. Autorství Celsiovi stupnice jak ji známe dnes, tedy s prohozenými hodnotami varu a tání vody, je připisováno několika autorům. Tato teplotní stupnice je v současnosti široce rozšířená a využívána především v běžném životě. [16, 19, 20]

4.1.5 Kelvinova stupnice

V roce 1852 William Thomson (lord Kelvin) sestavil na základě poznatků z termodynamiky teplotní stupnici, která byla nezávislá na teploměrné látce. Základní hodnotou této termodynamické stupnice zvolil teplotu trojného bodu vody a počátkem byla hodnota absolutní nuly, tedy teoretického stavu, kdy ustává pohyb částic. Jednotkou byl určen Kelvin, jako 1/273,16 termodynamické teploty trojného bodu vody. [21, 22]

4.1.6 Rankinova stupnice

V roce 1859 sestavil William John Macquom Rankin stupnici s počátkem v absolutní nule a rozměrem jednotky, která odpovídá stupni Fahrenheita. Jde tak o absolutní teplotní stupnici, která je ekvivalentem termodynamické teplotní stupnice. [19]

4.1.7 Mezinárodní teplotní stupnice

S koncem 19. století začaly snahy o sjednocení měřících přístrojů. Vedle kapalinových teploměrů vznikly teploměry odporové, termoelektrické, pyrometry apod. Vlivem odlišných náplní skleněných teploměrů (rtuť, líh, toluen apod.), se údaje naměřené mimo základní body od sebe lišily tím více, čím větší byla vzdálenost měřené teploty od těchto pevných bodů. [16]

Mezinárodní teplotní stupnice z roku 1927 (ITS-27)

V roce 1911 se ředitelé národních laboratoří v Německu, Velké Británii a Spojených státech amerických dohodli na sjednocení teplotní stupnice pro použití ve svých zemích. Ke schválení došlo však až na generální konferenci v roce 1927 a k dohodě se přidaly i další země. Základem přijaté stupnice byla řada pevných a reprodukovatelných rovnovážných teplot (tj. bodů tání nebo bodů varu čistých látek), zjištěných přesným plynovým teploměrem a přepočítaných na termodynamickou teplotu. Teploty, které se nachází mezi těmito pevnými body, se měří odporovým teploměrem, termočlánkem a radiačním pyrometrem. [16, 23]

Mezinárodní teplotní stupnice z roku 1948 (ITS-48)

Na základě nových zkušeností v oblasti termodynamiky byla na generální konferenci v roce 1948 přijata Mezinárodní praktická teplotní stupnice IPTS-48, která ve srovnání s ITS-27 doznala menších změn, za účelem přiblížení se k Celsiově termodynamické teplotě. Termoelektrický článek platil od teploty tuhnutí antimonu, při které byl kalibrován, dále byl zvýšen požadavek na čistotu platiny odporových etalonů a byly zúženy meze napětí etalonového termoelektrického článku v bodu tuhnutí zlata. Na generální konferenci v roce 1960 byly přijaty úpravy ITS-48. Změny byly pouze formální a neměnily naměřené hodnoty. Bod tání ledu byl nahrazen trojným bodem vody s teplotou 0,01 °C, vedle bodu varu síry bylo doporučeno používat bod tuhnutí zinku. [16, 23]

Mezinárodní praktická stupnice z roku 1968 (IPTS-68)

Na generální konferenci v roce 1968 byla vyhlášena Mezinárodní praktická teplotní stupnice IPTS-68. Tato stupnice přinesla rozsáhlé změny. Především byla posunuta dolní hranice stupnice na 13,81 K a byly zavedeny nové pevné body: trojný bod vodíku, bod přechodu rovnovážného vodíku, bod varu normálního rovnovážného vodíku, bod varu neonu a trojný bod kyslíku. Bod varu vody byl nahrazen bodem tuhnutí cínu a bod varu síry bodem tuhnutí zinku. Úprava IPTS-68 byla přijata na generální konferenci v roce 1975. Zásadními změnami byly definice trojného bodu kyslíku jako bodu kondenzace upřednostněného před bodem varu a zavedení trojného bodu argonu jako alternativy k bodu kondenzace kyslíku. Zároveň byla přijata provizorní teplotní stupnice pro teploty 0,5 až 30 K s označením EPT-76. [16]

Pevné body stupnic byly voleny tak, aby co nejpřesněji vyjadřovaly teploty, které přísluší termodynamické stupnici. I když byly body stupnic získány velmi přesnými metodami, jsou pouze přibližnou realizací termodynamické stupnice. Pro porovnání jednotlivých mezinárodních stupnic jsou v tabulce 4.1 uvedeny konkrétní hodnoty pevných bodů. Změna hodnot je ve většině případů v desetinách °C, výjimečně o více než 1 °C. Dosažená přesnost rostla s čistotou použitých kovů použitých. Stupnice z roku 1990 (ITS-90) je v současné době platnou stupnicí, proto se jí podrobněji věnuji v následující kapitole.

Tab. 4.1: Vybrané údaje z mezinárodních teplotních stupnic ITS-27 až ITS-90 [16]

Látka	Prodlévka	Mezinárodní teplotní stupnice z roku					
		1927	1948	1960	1968	1975	1990
vodík	T				-259,34	-259,34	-259,346 7
vodík	V				-252,87	-252,87	
neon	T				-248,595	-248,589	-248,593 9
dusík	T				-210,002	-210,004	
kyslík	T				-218,789	-218,789	-218,791 6
argon	T					-189,352	-189,344 2
kyslík	V	-182,97	-182,97	-182,97	-182,962	-182,962	
CO ₂	subl.	-78,5	-78,5	-78,5	-78,476	-78,476	
rtuť	T	-38,87	-38,87	-38,87	-38,862	-38,841	-38,834 4
voda	M,F	0	0	0	0	0	
voda	T			0,01	0,01	0,01	0,01
galium	M						29,764 6
voda	V	100	100	100	100	100	
k. benzoová	T		122,36	122,37	122,37	122,37	
indium	F			156,61	156,634	156,634	156,598 5
naftalen	V	217,96	218	218			
čín	F	231,85	231,9	231,91	231,968 1	231,968 1	231,928
vizmut					271,442	271,442	
benzofenon	V	305,9	305,9	305,9			
kadmium	F	320,9	320,9	321,03	321,108	321,108	
olovo	F	327,3	327,3	327,3	327,502	327,502	
rtuť	V	356,58	356,58	356,66	356,66		
zinek	F	419,45	419,5	419,505	419,58	419,58	419,527
síra	V	444,6	444,6	444,6	444,674	444,674	
Cu-Al	eut.				548,23	548,26	
antimon	F	630,5	630,5	630,5	630,74		
hliník	F		660,1	660,1	660,37		660,323
stříbro	F	960,5	960,8	960,8	961,93		961,78
zlato	F	1063	1063	1063	1064,43		1064,18
měď	F	1083	1083	1083	1084,5		1084,62
nikl	F		1453	1453	1455		
kobalt	F		1492	1492	1494		
paladium	F	1555	1552	1552	1554		
platina	F		1769	1769	1772		
rhodium	F		1960	1960	1963		
iridium	F		2443	2443	2447		
wolfram	M		3380	3380	3387		
čistota platiny: R100 : R0		1,39	1,391	1,392	1,392 5		
konstanta c ₂ (mm·K)		14,32	14,38	14,38	14,388	14,388	14,388

Poznámky k tabulce:

- 1) označení prodlév: V – var, T – trojný bod, M/F – tání/tuhnutí, eut. – eutektikum, subl. – sublimace
- 2) teploty (°C)
- 3) hodnoty za normálního tlaku 101 325 Pa

4.2 Teploměry v historii

Postupem času byly popsány vlastnosti teploměrů, které ovlivňují měření teploty. Lze je rozdělit na statické a dynamické.

Statické vlastnosti – popisují chování teploměrů v ustáleném stavu. Jednou z vlastností je statická charakteristika, která udává vztah mezi měřenou a výstupní veličinou. Mezi další statické vlastnosti patří citlivost, práh citlivosti, dynamický rozsah, reprodukovatelnost a rozlišitelnost. Tyto vlastnosti jsou u teploměrů reprezentovány v rámci přesnosti měření.

Dynamické vlastnosti – popisují chování teploměrů při časové změně měřené a výstupní veličiny. Tyto vlastnosti popisují příslušné diferenciální rovnice. Mezi nejvýznamnější patří časová konstanta určená vztahem 4.1. Tato konstanta udává čas, za kterou odezva na náhlou změnu teploty dosáhne 2/3 z ustálené hodnoty. [24]

$$\delta = \frac{V \cdot c \cdot \rho}{F \cdot \alpha} \quad (4.1)$$

δ – časová konstanta

V – objem omočené části teploměru (cm^3)

F – povrch omočené části teploměru (cm^2)

C – střední měrná tepelná kapacita omočené části teploměru ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)

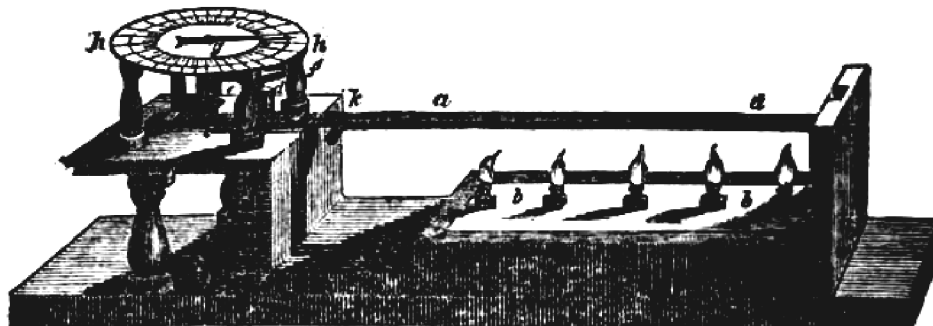
ρ – střední hustota omočené části teploměru ($\text{kg} \cdot \text{cm}^3$)

α – součinitel přestupu tepla z měřeného prostředí do teploměru ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$)

4.2.1 Měření teploty v 18. století

Pyrometr

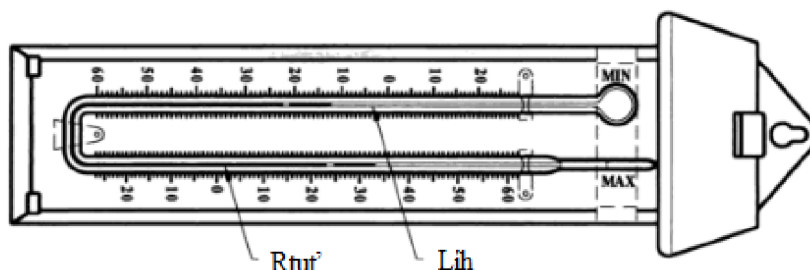
Za vynálezce prvního pyrometru pro bezkontaktní měření vysokých teplot je považován Pieter van Musschenbroek. Toto zařízení je zobrazeno na obrázku 4.2 a funguje na základě toho, že pohyb způsobený roztažností kovové tyče je přenášen ozubenými kolečky na dělenou stupnici. Musschenbroek byl schopný měřit teplotní roztažnost železa, oceli, mědi, mosazi se značnou přesností. [14, 25]



Obr. 4.2: Musschenbroekův pyrometr [25]

Sixův (maximo-minimální) teploměr

Sixův teploměr je plněný rtutí a lihem. Má dvě stupnice, které ukazují aktuální teplotu. Tím může teploměr zaznamenávat maximální a minimální teploty dosažené za určité časové období, například 24 hodin. Používá se k zaznamenávání extrémních teplot v daném místě. Je vhodný například pro meteorologii, ale zcela nevhodný pro vědecké měření. [26]

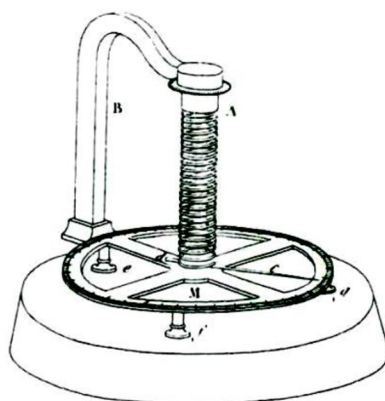


Obr. 4.3: Schéma Sixova teploměru [27]

4.2.2 Měření teploty v 19. století

Bimetalový teploměr

V roce 1817 sestrojil Abraham Louis Breguet bimetalový teploměr. Tento teploměr využíval různé teplotní roztažnosti kovů, byl tak citlivější a s vyšším měřicím rozsahem než rtuťové teploměry. Tenký pásek z platiny a stříbra byl stočen do šroubovice, nahoře připevněn ke konstrukci a dole k ukazateli. [28]



Obr. 4.4: Breguetův bimetalový teploměr [28]

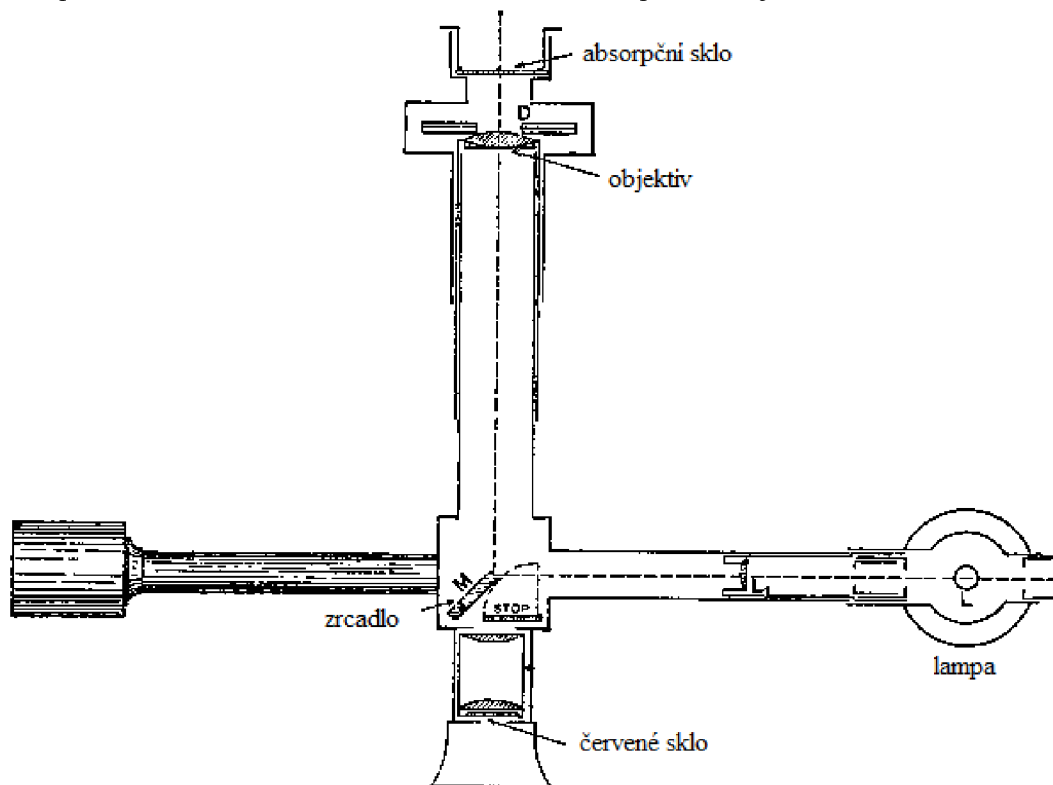
Skleněný teploměr

V rámci snahy Mezinárodního výboru pro míry a váhy o sjednocení v měření teploty, koncem 19. století porovnal P. Chappius čtyři rtuťové teploměry z tvrdého skla mezi 0 až +100 °C a mezi 0 až +32 °C se svým vodíkovým teploměrem. Tyto velmi přesné rtuťové teploměry měřily s rozlišením $\pm 0,01$ °C. [16]

4.2.3 Měření teploty ve 20. století

Optický pyrometr

Bezdotykové měření teploty má svůj původ v optickém pyrometru, který sestavil Henry Louis Le Chatelier. Měření optického pyrometru záviselo na přesném porovnání záření vycházejícího z ohřátého tělesa se standardizovanou lampou. Tento pyrometr bylo možné použít v rozsahu +700 až +2000 °C a měřil s přesností jednotek °C. [29]



Obr. 4.5: Schéma Le Chatelierova optického pyrometru [30]

Už u prvních teploměrů bylo nutné počítat s dynamickými vlastnostmi a nechat teploměr dostatečně ustávit. Stabilizace např. skleněných teploměrů trvala i několik minut. Dodnes je vhodné odečítat hodnotu za 3 až 5 násobek příslušné časové konstanty. Přesnost většiny prvních teploměrů byla z dnešního pohledu zcela nedostatečná. Přesto však precizně vyrobený rtuťový teploměr z 19. století měřil natolik přesně, aby mohl být využit pro vědecké účely a sady žároměrek z téže doby dostatečné pro použití v průmyslové výrobě.

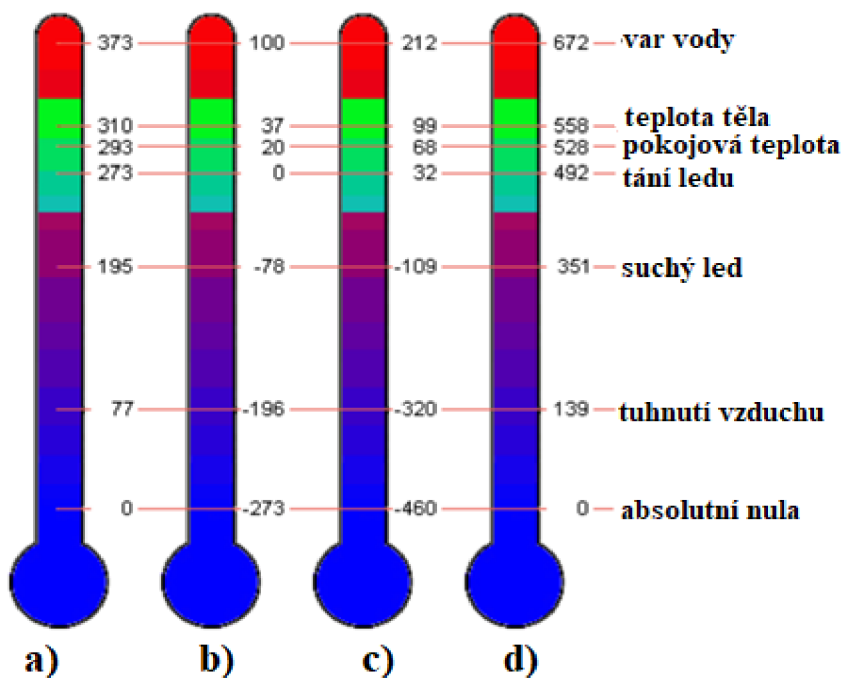
5 MĚŘENÍ TEPLoty V SOUČASNOSTI

Teplota určuje míru kinetické energie pohybu molekul a atomů. Nepůsobí-li na hmotu vnější vlivy, pak se teplota nemění. Za nejnižší teplotu lze považovat absolutní nulu, tedy stav hmoty, kdy ustává pohyb částic.

V soustavě jednotek SI je teplota definována jako termodynamická teplota s jednotkou kelvin. Generální konference vah a měr však rozhodla o rovnocennosti termodynamické (značíme T) a Celsiovy (značíme t) teploty. Stupnice Celsiova je v Evropě nejpoužívanější při běžném životě a termodynamická stupnice především na vědecké úrovni. Mezi méně používané stupnice patří např. Fahrenheitova nebo Rankinova. Porovnání jednotlivých stupnic znázorňuje obrázek 5.1 a převodní vztahy tabulka 5.1. Pro praktickou realizaci termodynamické teploty slouží Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90. [5, 12, 31]

Tab. 5.1: Přehled převodních vztahů vybraných teplotních stupnic [31]

	termodynamická	Celsiova	Fahrenheitova	Rankinova
termodynamická	= K	= °C - 273,15	= (°F + 459,67) · 5/9	= °Ra · 5/9
Celsiova	= K - 273,15	= °C	= (°F - 32) · 5/9	= °Ra · 5/9 - 273,15
Fahrenheitova	= K · 1,8 - 459,67	= °C · 1,8 + 32	= °F	= °Ra - 459,67
Rankinova	= K · 1,8	= °C · 1,8 + 491,67	= °F + 491,67	= °Ra



Obr. 5.1: Přehled teplotních: stupnic a) termodynamická, b) Celsiova, c) Fahrenheitova, d) Rankinova [22]

5.1 Definice teploty

Teplota je termodynamická veličina definovaná na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. V průběhu cyklu přechází termodynamická soustava postupně do tepelného kontaktu se dvěma tělesy různých teplot (T_1 a T_2) a nakonec dosahuje původního stavu.

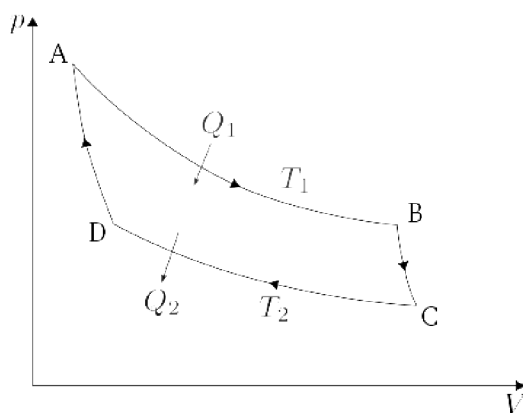
$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (5.1)$$

η – je účinnost Carnotova cyklu

Q_1 – je teplo odevzdané do lázně o teplotě T_1 (J)

Q_2 – je teplo odebrané z lázně o teplotě T_2 (J)

T – termodynamická teplota, platí $T_2 > T_1$ (K) [5, 31]



Obr. 5.2: Carnotův cyklus [32]

5.1.1 Definice kelvinu

Stávající definice kelvinu

Kelvin, jednotka termodynamické teploty, je rovna zlomku $1/273,16$ termodynamické teploty trojného bodu vody.

Současná definice kelvinu je vázána na teplotu trojného bodu vody. Tato skutečnost je v praxi poněkud problematická. Přesná teplota trojného bodu ve velké míře závisí na chemické čistotě a izotopovém složení použité vody. Dále je technicky obtížné tuto definici používat při teplotách blízkých absolutní nule. To bylo motivací k zavedení nové definice kelvinu. [9]

Nová definice kelvinu

Kelvin, symbol K, je SI-jednotka termodynamické teploty. Je definována fixováním číselné hodnoty Boltzmannovy konstanty k rovné $1,380\,649 \times 10^{-23}$, je-li vyjádřena v jednotkách $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$, což se rovná $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, kde kilogram, metr a sekunda jsou definovány ve smyslu h , c a $\Delta\nu_{\text{CS}}$.

5.1.2 Mezinárodní stupnice ITS-90

Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 nahradila dříve používané mezinárodní stupnice ITS-27, ITS-48, ITS-48/60, IPTS-68 a doplněné vydání z roku 1975. Nová vydání teplotních stupnic vždy zohledňují pokrok v přesnosti měření s cílem se co nejvíce přiblížit k termodynamické teplotní stupnici a kladou důraz na vysokou reprodukovatelnost měření. Pro porovnání jsou v tabulce 4.1 uvedeny hodnoty vybraných pevných bodů v jednotlivých stupnicích. ITS-90 je založena na primárních teplotních bodech, na interpolačních přístrojích a matematických vztazích pro tyto přístroje. Definované rozmezí stupnice je od 0,65 K do nejvyšších teplot v praxi měřitelných v podmínkách Planckova radiačního zákona. Celkové rozmezí je dále členěno:

- v rozsahu 0,65 až 5,0 K se teplota definuje pomocí tlaku páry ^3He a ^4He
- v rozsahu 3,0 až 24,556 K se teplota definuje prostřednictvím heliového plynového teploměru, kalibrovaného při experimentálně realizovatelných teplotách, které mají přiřazené číselné hodnoty
- v rozsahu 13,8033 až 1234,93 K se teplota definuje pomocí platinového odporového teploměru kalibrovaného v určitých pevných bodech
- nad teplotou 1234,93 K se teplota definuje pomocí definičních pevných bodů a Planckova radiačního zákona [12, 16]

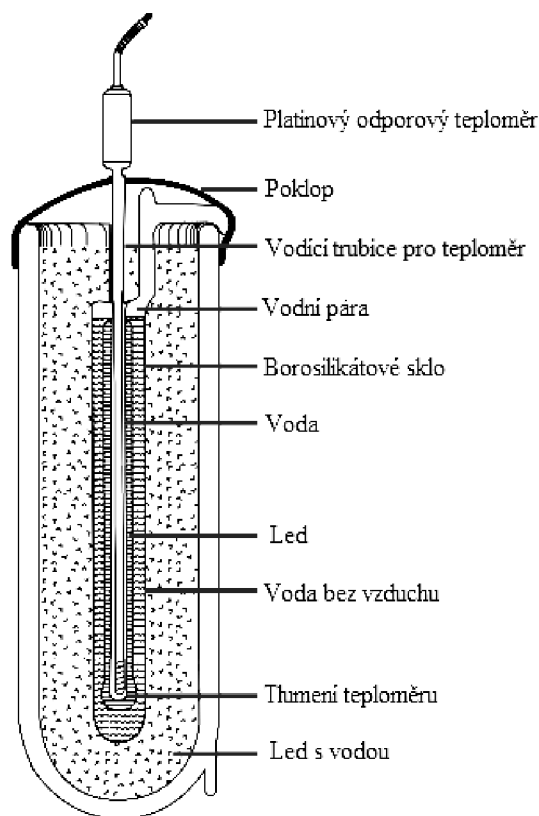
Realizace pevných bodů stupnice ITS-90

Realizace pevných bodů probíhá ve speciálních nádobách. V případě trojných bodů jde o uzavřenou válcovou buňku s trubkou pro vložení teploměru. Z buňky je odčerpán vzduch a vyskytuje se v ní pouze měřená látka a její páry. Před měřením je třeba vytvořit pevnou fázi tak, aby existovalo vnější (u stěny buňky) a vnitřní (u trubice) rozhraní s kapalinou. Pro uchování měrného systému v okolí požadované teploty je takto připravená nádoba uložena ve vhodné lázni. Přesnost měření trojného bodu ovlivňuje izotopické složení vody, efekt hydrostatického tlaku a doba existence ledového pláště. [33]

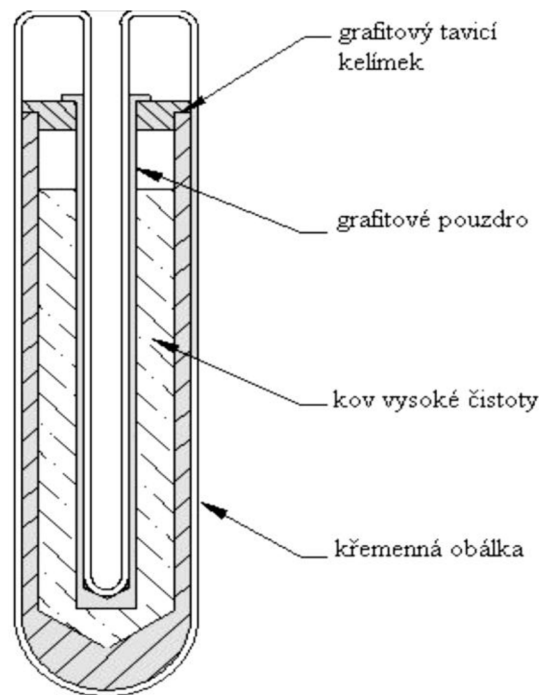
Nádoby pro realizaci bodů tání a tuhnutí kovů se obvykle skládají z tavicího kelímku z grafitu, ve kterém je ingot vysoce čistého kovu. Kelímek je s argonovou atmosférou zataven v křemenné obálce s trubicí pro zavedení teploměru. Opět je třeba vytvořit vnější a vnitřní rozhraní mezi kapalnou a pevnou fází. [33]

Etalony

Státní etalony jsou realizací mezinárodní teplotní stupnice ITS-90. Státní etalon pro kontaktní měření je realizován od -196 °C (bod varu dusíku) do $+1084,62\text{ °C}$ (bod varu mědi). Realizace teplotní stupnice pomocí bodů tání, tuhnutí a trojného bodu umožňuje kalibrovat etalonové odporové teploměry a termoelektrické články. Státní etalon pro bezkontaktní měření v rozsahu od -30 °C (černé těleso pro teploty blízké okolí) do $+1800\text{ °C}$ (vysokoteplotní černé těleso) je realizován pomocí pevných bodů vysoce čistých kovů a černých těles pro různé teploty. [35, 36]



Obr. 5.3: Schéma buňky pro realizaci trojného bodu vody [34]



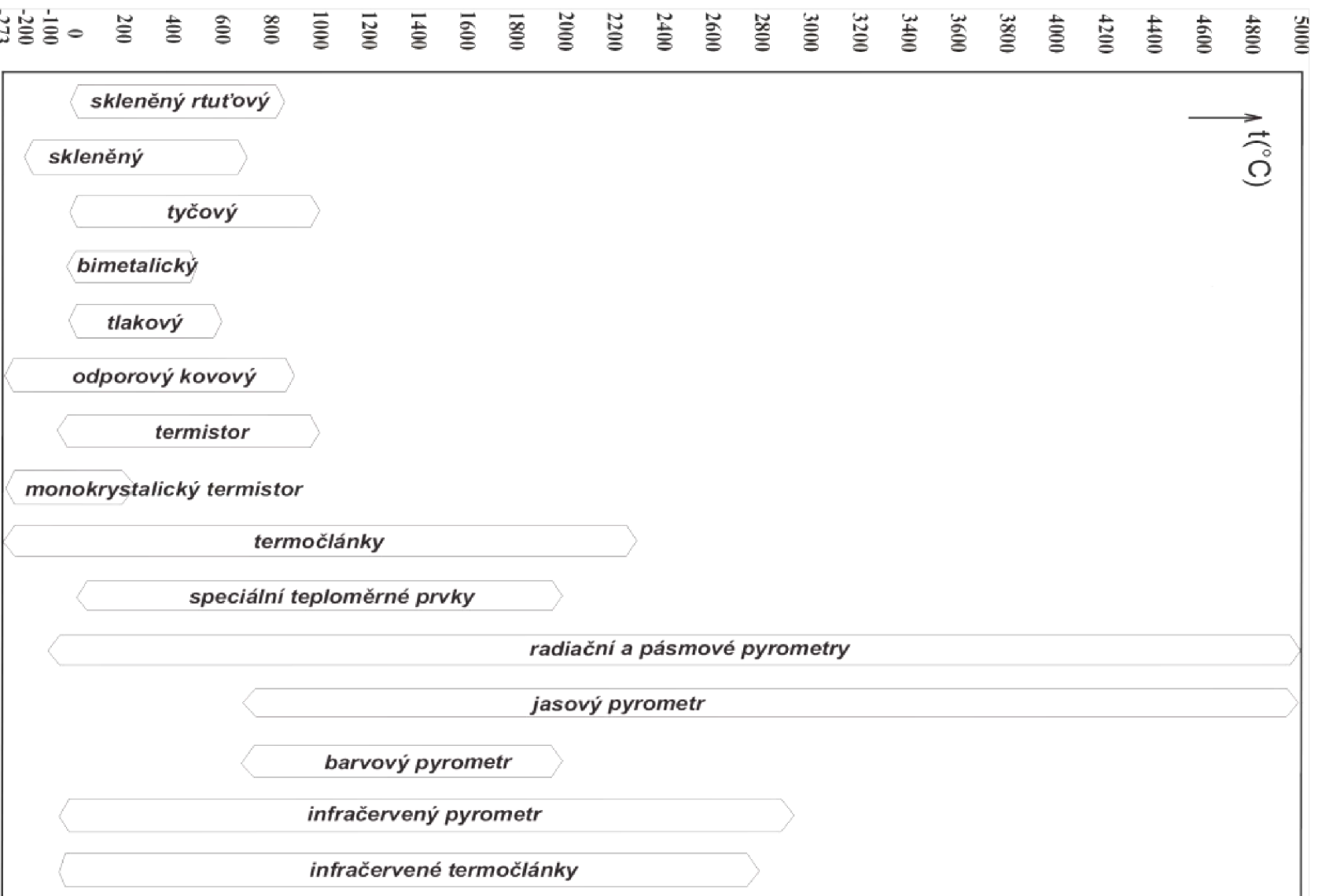
Obr. 5.4: Schéma pro realizaci bodů tání a tuhnutí [33]

5.2 Přehled zařízení

Přístroje pro měření teploty, využívají teplotní roztažnost, změnu elektrických vlastností, spektrální záření nebo snímají celkovou energii záření. Vyskytují se v mnoha konstrukčních variantách. Základní dělení teploměrů:

- dle umístění snímací části na dotykové a bezdotykové
- dle využitého fyzikálního principu na dilatační, elektrické, speciální a optické
- dle použití teploměrné látky na kapalinové, kovové, polovodičové a plynové
- na základě konstrukce nebo teplotního rozsahu

Volba vhodného teploměru v praxi závisí na požadované přesnosti, podmínkách a na rozsahu teplot při měření. Proto je žádoucí, aby se jednotlivé typy svým určením doplňovaly a překrývaly, viz obrázek 5.5. [12]



Obr. 5.5: Měřicí rozsahy používaných teploměrů [14]

5.2.1 Dilatační teploměry

Fungování dilatačních teploměrů je založeno na rozpínání látek s rostoucí teplotou. Plyny, kapaliny a pevné látky mění své charakteristiky při změně teploty. Teplotní roztažnost ovlivňuje objem, délku nebo tlak dle následujících vztahů:

$$\begin{aligned} l &= l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \\ V &= V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta\vartheta) \\ p &= p_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta\vartheta) \end{aligned} \quad (5.2)$$

l, V, p – výsledná délka, objem, tlak (m, m³, Pa)

l_0, V_0, p_0 – původní délka, objem, tlak (m, m³, Pa)

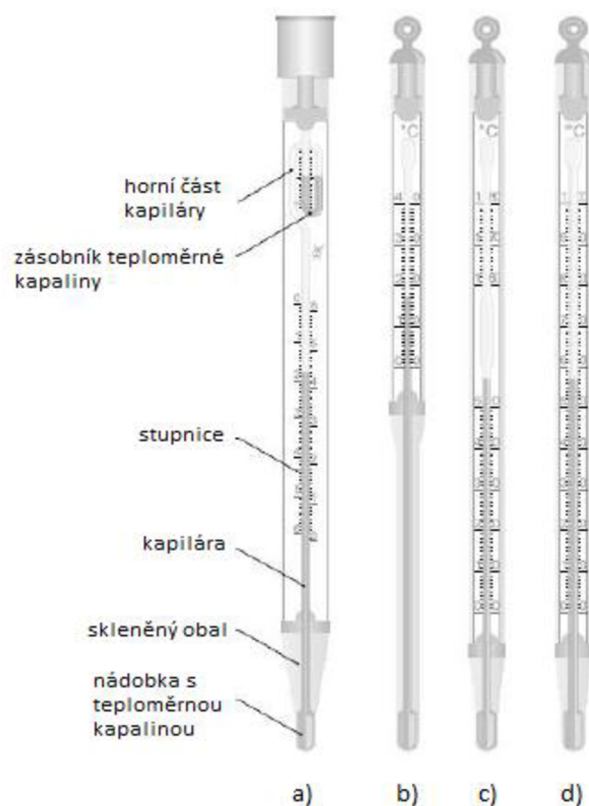
α – součinitel délkové teplotní roztažnosti (–)

β – součinitel objemové teplotní roztažnosti (–)

$\Delta\vartheta$ – teplotní rozdíl (°C, K)

Kapalinové teploměry

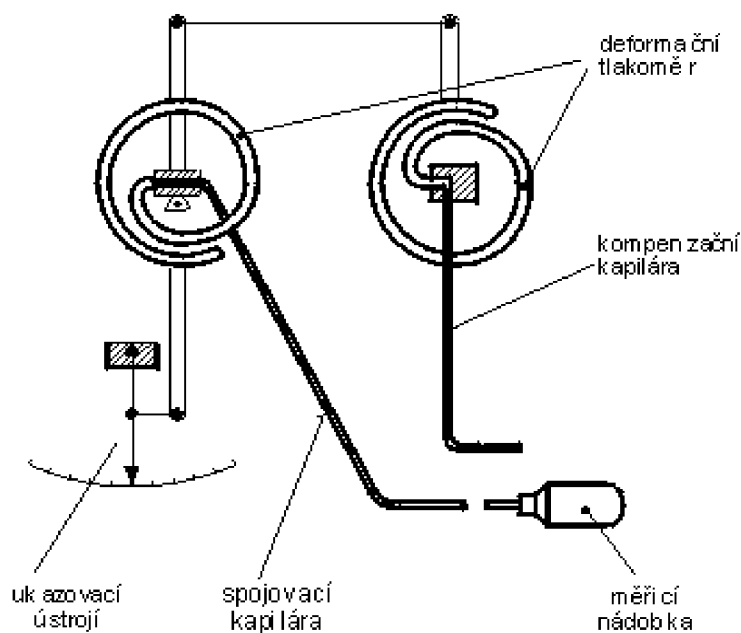
Kapalinové teploměry pracují na základě objemové roztažnosti teploměrné kapaliny, nejčastěji rtuti nebo lihu v menší míře pak pentanu či toluenu. Svou konstrukcí patří mezi nejjednodušší teploměry a díky tomu mají rozsáhlé praktické uplatnění. V závislosti na použité náplni, tlaku a konstrukci je rozsah teploměru od -200 do +750 °C s nejistotou ±0,1 %. [14, 37]



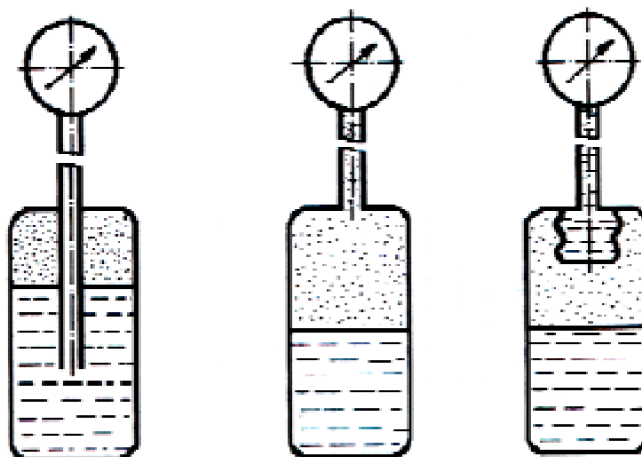
Obr. 5.6: Rtuťové teploměry: a) Beckmannův, b) stonkový, c) s potlačenou stupnicí, d) obalový [38]

Tlakové a parní teploměry

Změna objemu kapaliny v tlakovém (Obr. 5.7) i parním (Obr. 5.8) teploměru způsobuje elastickou deformaci, která je převáděna přes manometr na teplotní stupnici. Teploměr se skládá z kovové jímky, kapiláry a tlakoměrného systému. U parních teploměrů je jímka naplněna jen z části a zbytek je zaplněn sytou párou. Jako teploměrné kapaliny se proto používá lehce odpařitelných látek např. benzenu, acetonu, propanu nebo butanu. Náplní kapalinových tlakových teploměrů bývá rtuť, líh nebo petrolej. Podle druhu teploměrné kapaliny je možné teplotu měřit v rozsahu od -250 do 800 °C s nejistotou měření ± 1 % měřicího rozsahu. Díky netoxické náplni jsou tlakové teploměry velmi vhodné pro použití v chemickém průmyslu a farmacii. [12, 37]



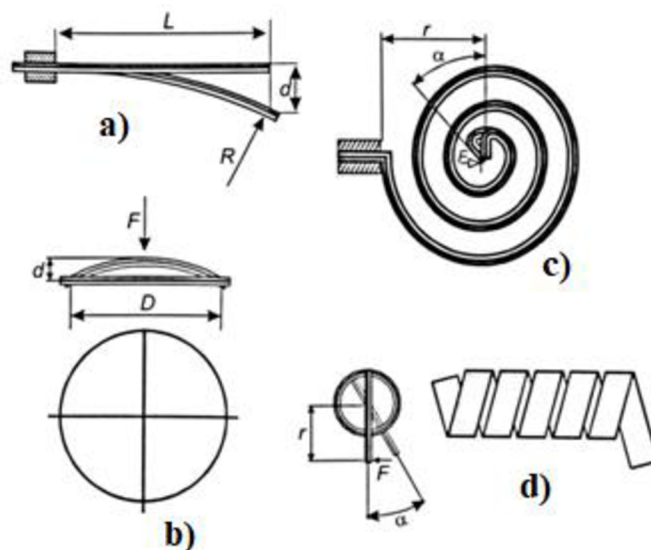
Obr. 5.7: Tlakový teploměr [39]



Obr. 5.8: Konstrukční řešení parních teploměrů [12]

Bimetalové teploměry

Kovové teploměry využívají délkové teplotní roztažnosti kovů v závislosti na teplotě. Konkrétně bimetalový (dvojkovový) funguje na deformaci dvou tenkých pevně spojených kovových pásků z materiálů s různou teplotní roztažností v kombinaci např. invar s mosazí nebo niklem. Ohřátím se pásek prohne na stranu kovu s menší délkovou roztažností. Při měření se používá především v provedení spirály (Obr. 5.9 c)) nebo šroubovice (Obr. 5.9 d)) a často jej můžeme najít jako součást regulační techniky. Rozsah bimetalových teploměrů je od -100 do 500 °C s nejistotou od ± 1 do ± 5 % měřícího rozsahu. [14, 40]



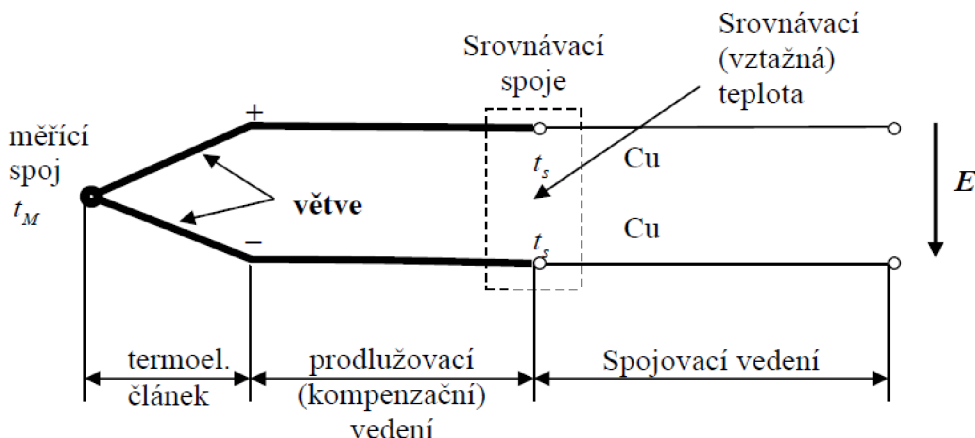
Obr. 5.9: Konstrukce bimetalových pásků: a) plochý nosník, b) disk, c) spirála, d) šroubovice [24]

5.2.2 Elektrické teploměry

Elektrické teploměry využívají změny elektrických vlastností snímače v závislosti na teplotě. Jedná se především o odporové teploměry a termočlánky, případně infračervené snímače. Těchto teploměrů se hojně využívá při automatizaci technologických procesů a to především díky kompaktním rozměrům, přesnosti, různorodosti provedení a ceně.

Termoelektrické teploměry (termočlánky)

Termočlánek je elektrický teploměr, který využívá vznik termoelektrického napětí vlivem teploty. Pro činnost termočlánu je využíván Seebeckův jev. Skládá se ze dvou různých kovových vodičů (např. Fe a Cu-Ni) spojených do uzavřeného obvodu, které umístíme do míst s rozdílnými teplotami a tím v obvodu vznikne termoelektrické napětí. Toto napětí je možné měřit citlivým voltmetrem. [12, 14, 40]



Obr. 5.10: Terminologie měřícího řetězce termočlánku [41]

V tabulce 5.2 je přehled nejčastějších typů termočlánků spolu s údaji o materiálu, o teplotním rozsahu při krátkodobém a dlouhodobém využití a o třídách přesnosti.

Tab. 5.2: Typy termočlánků, jejich základní údaje a nejistoty [42]

typ	složení	dlouhodobě krátkodobě (°C)	třída 1		třída 2		třída 3	
			(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)
K	NiCr (+)	0 až +1100	0,4	1,5	0,75	2,5	1,5	2,5
	NiAl (-)	-180 až +1350						
T	Cu (+)	-185 až +300	0,4	0,5	0,75	1	1,5	1
	CuNi (-)	-250 až +400						
J	Fe (+)	+20 až +700	0,4	1,5	0,75	2,5	-	-
	CuNi (-)	-180 až +750						
N	NiCrSi (+)	0 až +1100	0,4	1,5	0,75	2,5	1,5	2,5
	NiSiMg (-)	-270 až +1300						
E	NiCr (+)	0 až +800	0,4	1,5	0,75	2,5	1,5	2,5
	CuNi (-)	-40 až +900						
R	PtRh13 (+)	0 až +1600	1+0,3·(t-1100)	1	0,25	1,5	-	-
	Pt (-)	-50 až +1700						
S	PtPh10 (+)	0 až +1550	1+0,3·(t-1100)	1	0,25	1,5	-	-
	Pt (-)	-50 až +1750						
B	PtPh30 (+)	+100 až +1000	-	-	0,25	1,5	0,5	4
	PtPh6 (-)	+100 až +1820						
G	W (+)	+20 až +2320	-	-	1	4,5	-	-
	WRh (-)	0 až +2600						
C	WRh5 (+)	+50 až +1820	-	-	1	4,5	-	-
	WRh26 (-)	+20 až +2300						

Poznámka k tabulce: typ G a C není oficiální nebo normované značení

Odporové teploměry

Odporové teploměry využívají změnu elektrického odporu vodičů nebo polovodičů na měnící se teplotě. Tyto teploměry rozlišujeme podle typu použitého materiálu na kovové a polovodičové.

Kovové odporové teploměry

Elektrický odpor s rostoucí teplotou narůstá a tento princip je základem fungování kovového odporového teploměru. Změna odporu je charakterizována teplotním koeficientem odporu α . Závislost odporu na teplotě lze v rozsahu od 0 do +100 °C linearizovat vztahem:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad (5.3)$$

α – průměrný teplotní koeficient odporu (K⁻¹)

R_t – odpor vodiče při měřené teplotě (Ω)

R_0 – odpor vodiče při referenční teplotě 0 °C (Ω)

t – teplo vodiče (°C)

Pozn. pro lepší přesnost nebo pro větší rozpětí teplot je nutné závislost vyjádřit ve formě polynomu vyššího stupně.

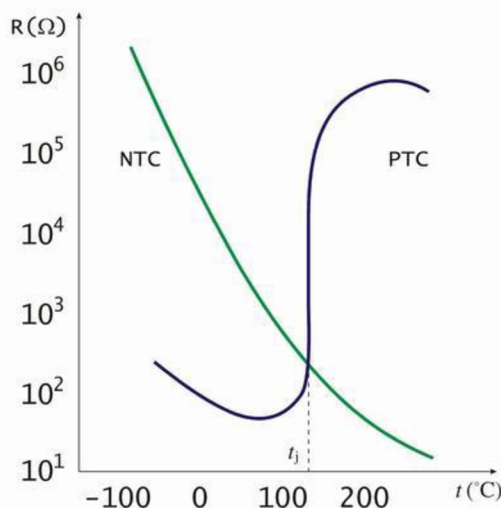
K výrobě se používají čisté kovy, které jsou fyzikálně a chemicky stálé, neoxidují ani nereagují s obalem a mají nízký teplotní koeficient odporu. Nejčastěji se jedná o platínu. S čistotou 99,999 % se platinové senzory uplatňují jako etalonové senzory v rozsahu teplot od -259,3467 do +961,78 °C. Při čistotě 99,9 % pak v technické praxi s měřícím rozsahem a odchylkou, viz tabulka 5.3. Kromě platiny se používá nikl, měď nebo pro měření nízkých teplot slitiny železa a rhodia. [14, 24]

Tab. 5.3: Dovolené tolerance dle IEC-751 [24]

Teplota [°C]	Třída přesnosti A		Třída přesnosti B	
	(Ω)	(°C)	(Ω)	(°C)
-200	±0,24	±0,55	±0,56	±1,3
-10	±0,14	±0,35	±0,32	±0,8
0	±0,06	±0,15	±0,12	±0,3
+100	±0,13	±0,35	±0,30	±0,8
+200	±0,20	±0,55	±0,48	±1,3
+300	±0,27	±0,75	±0,64	±1,8
+400	±0,33	±0,95	±0,79	±2,3
+500	±0,38	±1,15	±0,93	±2,8
+600	±0,43	±1,35	±1,06	±3,3
+650	±0,46	±1,45	±1,13	±3,6
+700	–	–	±1,17	±3,8
+800	–	–	±1,28	±4,3
+850	–	–	±1,34	±4,6

Polovodičové odporové teploměry

Polovodičové odporové teploměry jsou obdobně jako teploměry kovové založeny na závislosti odporu na změně teploty. Rozdělujeme je na termistory a monokrystalické odporové teploměry. Hlavní rozdíl mezi polovodičovým a kovovým odporovými teploměry spočívá v tom, že s rostoucí teplotou může elektrický odpor klesat (negastory – NTC termistory) nebo růst (pozistory – PTC termistory). Výhodou termistorů je velká teplotní citlivost, ale dochází ke ztrátě linearit, viz Obr. 5.11. U běžných zařízení se rozsah pohybuje od -80 do $+250$ °C s výrobní tolerancí ± 1 °C. [14, 24]



Obr. 5.11: Závislost odporu na teplotě pro NTC a PTC [37]

5.2.3 Pyrometry

Pyrometry jsou bezdotykové teploměry určené původně pro vysoké teploty. Snímají teplo nebo světelné záření na povrchu tělesa zahřátého na vyšší teplotu, než má jeho okolí. Předností pyrometrů je možnost měřit pohybující se objekty, rychlé teplotní změny nebo provádět měření z bezpečného místa. Při měření pyrometry je nutné znát emisivitu měřeného objektu a zjištěné hodnoty mohou být ovlivněné i fyzikálními vlastnostmi optické cesty mezi detektorem a objektem. Běžně se využívají v rozsahu teplot od -40 do $+3500$ °C s dovolenou chybou 1 až 7 % měřicího rozsahu. Podle způsobů měření je možné rozdělení na radiační, fotoelektrické, spektrální a distribuční pyrometry. [12, 14, 24]

Radiační pyrometry

Radiační (úhrnné) pyrometry vyhodnocují tepelné záření na základě Stefan-Boltzmannova zákona (rov. 5.4) v celém spektru vlnových délek. Měřicí rozsah je od $+50$ do $+1500$ °C, ve speciálních případech od -100 do $+5000$ °C s dovolenou chybou 1 až 2 % z měřicího rozsahu. Pro eliminaci chyb je důležité, aby měřený povrch překryl celé zorné pole. Kvůli tomu, že zcela černá tělesa nejsou vhodným objektem k měření pomocí radiačního pyrometru, je nutné použít korekci dle rovnice 5.5. Podobně jako radiační pyrometry fungují termovize. [12, 14]

$$M_0 = \sigma \cdot T^4 \quad (5.4)$$

M_0 – hustota intenzity záření ($W \cdot m^{-2}$)

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

T – teplota zářícího tělesa (K)

$$T_S = \frac{T_P}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon}} \quad (5.5)$$

ε – emisivita radiálního záření

T – teplota (K)

T_S – skutečná teplota (K)

T_P – teplota uvedená pyrometrem (K)

Fotoelektrické pyrometry

Fotoelektrické (pásmové) pyrometry fungují obdobně jako radiální pyrometry. Měří však teplotu jen v úzkém pásmu vlnových délek určených např. použitou optikou nebo citlivostí detektoru záření. Skutečná teplota měřeného objektu se určí dle rovnice 5.6. Kvůli kolísání pásmové emisivity skutečných objektů je možné chybu měření pouze odhadnout. [12, 14, 24]

$$\frac{1}{T_S} = \frac{1}{T_P} + \frac{\lambda_p}{c_2 \cdot \ln(\varepsilon_p)} \quad (5.6)$$

λ_p – charakteristická vlnová délka záření ve vymezeném pásmu (m)

ε_p – pásmová emisivita měřeného objektu (–)

c_2 – druhá vyzařovací konstanta (m·K)

T_S – skutečná teplota (K)

T_P – teplota pyrometru (K)

5.3 Metrologie teploty v praxi

Díky sledování teploty je možné regulovat výrobní procesy, diagnostikovat elektrické nebo mechanické součásti, tepelné vlastnosti budov nebo kontrolovat provozní stavy strojů a zařízení. V důsledku toho dochází k optimalizaci celého výrobního a technologického procesu. Sledovatelnost, přesnost, preciznost a vyhodnocení nejistoty měření teploty jsou nezbytnou součástí systému řízení kvality. Úkolem podnikové metrologie je zajištění celkové organizace metrologie daného podniku, ale i správa, ověřování a kalibrace měřidel. Kalibrací vůči podnikovému etalonu je zajištěna návaznost výsledků měření. Ověřování údajů z teploměru je prováděno především prostřednictvím pevných teplotních bodů ITS-90 uvedených v tabulce 4.1. Příslušný bod je volen adekvátně k ověřovanému teploměru. Kontrola mimo pevné body probíhá pomocí teploměru s vyšší třídou přesnosti. Porovnání metrologických vlastností měřidla lze např. kalibrační pecí, černým tělesem atd. [39, 43]

Kalibrační pec

Princip kalibrační pece je založen na suchém kovovém bloku, kontrolovaném pomocí topných těles a řídicího teploměru. Pro dosažení maximální stability teploty je regulován výkon topných těles. Fyzikální možnosti pecí umožňují rozsah -80 až $+1800$ °C s přesností $\pm 0,01$ až 1 °C. [41]

Kalibrační pírka série CL 900/950

Tato pírka firmy Omega umožňuje kalibrovat termočlánky a odporové teploměry v rozsahu $+22$ až $+482$ °C s přesností $0,9$ °C. [44]



Obr. 5.12: Kalibrační pírka série CL 900/950 od firmy Omega [44]

Černé těleso

Černé těleso dokonale pohlcuje i vyzařuje záření bez ohledu na úhel, vlnovou délku a použitý materiál. Záření černého tělesa se poměrně dobře blíží záření Slunce. Slouží pro kalibraci pyrometrů a termovizních kamer. Jsou to kalibrátory s terčem o známé emisivitě, s vysokou stabilitou a volitelnou teplotou. [39]

Černé těleso BB-4A

Tento výrobek firmy Omega kalibruje infrateploměry v rozsahu $+100$ až $+982$ °C s přesností $\pm 0,1$ °C, $\pm 0,25$ % čtené hodnoty. Vyhřívaná kalibrační plocha představuje cíl, u kterého je nastavitelná teplota a hodnota emisivity $\varepsilon = 0,99$. [45]



Obr. 5.13: Černé těleso BB-4A od firmy Omega [45]

5.4 Další rozvoj měření

Podle Koncepce rozvoje metrologie 2017-2021, dostupné z [46], bude rozvoj nových technologií znamenat další ústup klasických měřidel. Samostatná měřidla budou postupně nahrazována jednotlivými prvky zapojenými do větších celků, které budou zpracovávat a vyhodnocovat data z různých druhů měření. Základní metrologie bude ovlivněna aplikacemi z oboru kvantové fyziky a realizací nových definic jednotek SI. S tímto vývojem se změní měřicí principy, metody a zařízení, následně i technická harmonizace a metrologická legislativa. Legální metrologie tímto směřuje k rozsáhlejší globalizaci. V oblasti měření teplot je předmětem zájmu kromě přesnosti i metrologie vysokých teplot nebo optické vláknové senzory.

6 POROVNÁNÍ TEPLOMĚRŮ - EXPERIMENT

Předložená práce má sice rešeršní charakter, ale pro zajímavost byly načerpané poznatky ověřeny i jednoduchým experimentem v laboratoři měření ÚAI. Bylo využito staršího typu termostatu U 10 s vodní lázní, kde byly nastaveny postupně tři pracovní teploty. A po jejich dostatečném ustálení byly odečteny teploty z několika běžných snímačů (měřidel) teploty.

Byly použity následující teploměry:

Lihový teploměr s rozsahem 0 až +130 °C a rozlišením 1 °C

Přesný Rtuťový teploměr s rozsahem +50 až +100 °C a rozlišením 0,1 °C

Bimetal (zavařovací teploměr) s rozsahem +20 až +110 °C a rozlišením 2 °C

Odporový teploměr Sensit TGL 40 - PT 100/385 s rozsahem -40 až +105 °C

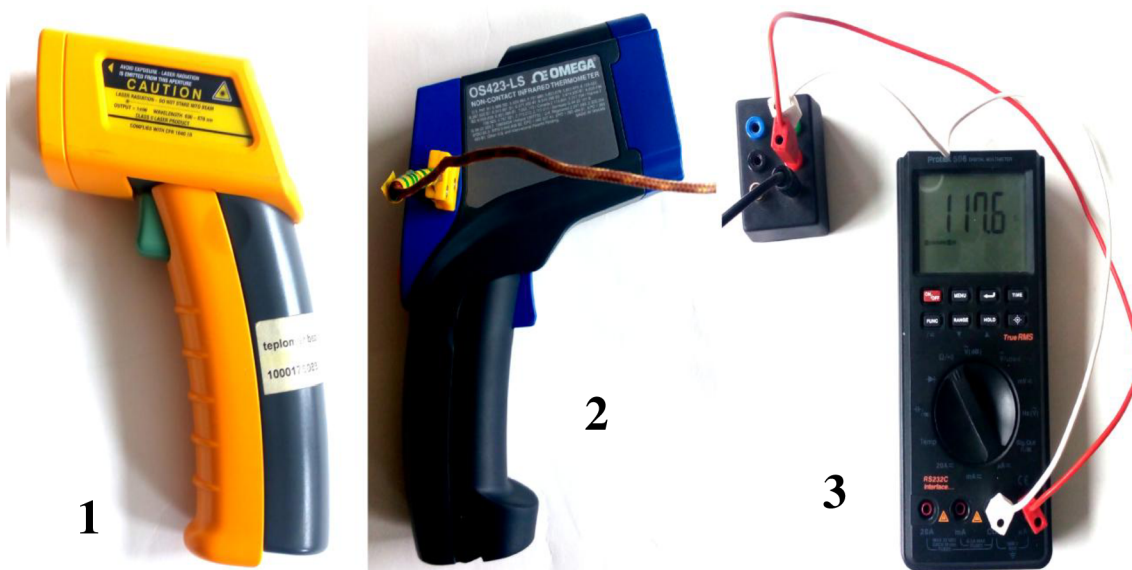
Pyrometr Fluke 62 Mini

Pyrometr Omega OS 423-LS s externím dotykovým čidlem K

Tab. 6.1: Naměřené hodnoty

Nastavená teplota	(°C)	50	60	75
Teploměr termostatu	(°C)	52	61	76
Přesný rtuťový	(°C)	50,2	59,8	75,0
Lihový	(°C)	51	61	78
bimetal	(°C)	51	60	76
Fluke 62	(°C)	51,4	59,6	72,3
Omega OS 426-LS	(°C)	51,7	60,0	72,9
Ext čidlo K Omega	(°C)	52,1	60,4	75,4
PT 100 Sensit	(Ω) / (°C)	119,6/ 50,5	123,0/ 59,5	128,2/ 73,0
Celkové rozpětí hodnot	(°C)	1,9	0,9	5,7

Experiment ukázal, že nejlepší shodu vykazují výsledky v okolí 60 °C a naopak nejhorší při 75 °C. Měření jako celek nebylo vhodné ke statistickému zpracování, protože nastavení termostatu neumožňuje dostatečnou opakovatelnost měření. Důvěryhodné výsledky poskytuje přesný rtuťový teploměr s velmi jemným dělením stupnice, ale i u něj mohl být výsledek ovlivněn hloubkou ponoru do lázně termostatu, stejně jako u méně přesného lihového teploměru. Měření obou pyrometrů ovlivnil částečně zkorodovaný povrch nádoby, kdy nebyla hodnota emisivity konstantní po celé ploše. Cílem experimentu bylo zhodnotit jaké rozdíly poskytne jednotlivá měřicí technika v závislosti na přesnosti a rozlišovací schopnosti za stejných vstupních parametrů. Z tohoto pohledu lze hodnotit i jediný výsledek každého měření jako reprezentativní hodnotu. Závěrem lze proto říci, že získané výsledky poskytly vcelku dobrou ukázkou běžné dosažitelné přesnosti a rozptylu získaných hodnot, při měření běžnou měřicí technikou.



Obr. 6.1: 1) Pyrometr Fluke, 2) Pyrometr Omega s externím dotykovým čidlem, 3) multimetr s odporovým teploměrem Sensit



Obr. 6.2: Termostat v laboratoři ÚAI s přesným rtuťovým teploměrem, bimetalovým teploměrem a lihovým teploměrem

7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat rešerši o historickém vývoji přesnosti měření s ohledem na konkrétní veličinu. Protože rozvoj lidského poznání kladl vyšší nároky na preciznost provedení, vznikla specializovaná odvětví. Tato odvětví zajišťují náležitou standardizaci, bez které nelze spolupracovat v dnešním propojeném světě. Bez aplikací měření a měřicí techniky by tento rozvoj nebyl možný. Rostoucí úroveň nových technologií umožňuje zavádění přesnějších metod a prostředků měření a naopak jakékoli další zdokonalování těchto technologií si vynucuje zase zpřesnění měření. Přesnost měření a rozvoj technologií se takto stále vzájemně posouvají.

V úvodní části byla pozornost věnována právě obecnému rozvoji metrologie. Zásadním krokem pro zvýšení přesnosti měření byl vznik Metrické konvence. Jejíž instituce dnes zajišťují správu a organizaci v oblasti metrologie. Také náležitě reagují na nově se rozvíjející metrologické obory (např. nanometrologie, metrologie tenkých vrstev a povrchů, metrologie vakua), které vyvolávají potřebu zcela nových metrologických služeb a kalibračních postupů. Právě požadavky těchto oborů vedly ke změně definic základních jednotek soustavy SI.

Dále bylo popsáno, jakým způsobem lze vyjádřit chyby a nejistoty měření. Přesnost můžeme vyjádřit pomocí několika typů chyb měření nebo jako interval nejistoty, ve kterém se nachází s danou pravděpodobností pravá hodnota.

Pro historický přehled byla jako reprezentující veličina vybrána teplota. Ta značně ovlivňuje měření jiných veličin, ale její měření začalo až v 17. století, kdy vznikaly první teplotní stupnice a teploměry. Již od počátku bylo pro měření teploty využíváno interpolace mezi body se známou stálou teplotou. Tento princip je využíván dodnes, s patřičnou úpravou v rozsahu měřených teplot, počtu známých teplotních bodů a dosahované přesnosti. V realizaci současné mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 je možné kalibrovaným etalonovým odporovým teploměrem dosáhnout nejistoty 0,5 až 2 mK. Pro běžné procesy je dosahováno přesností v řádu jednotek procent měřicího rozsahu, ale záleží na jakém principu konkrétní teploměr funguje a na vhodnosti použití v daném prostředí. Pomocí kalibrace lze však přesnost měřidla zvýšit.

Cílem provedeného experimentu bylo ukázat přesnost, se kterou je možné měřit běžnými metodami. Za stejných podmínek byly výstupy z jednotlivých teploměrů vyhovující s ohledem na rozlišitelnost dilatačních teploměrů a vhodnost pyrometrů.

Určování přesnosti měření je specifické pro každou veličinu. Především historický přehled, nejen měření teploty, by vyžadoval rozsáhlejší prověřování, na které není v bakalářské práci již prostor.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Metrická konvence. *Český metrologický institut* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/metricka%20konvence>
- [2] MACH, Přemysl. *Historie metrologie*. 2016. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/6063032-Historie-metrologie-soustava-merovych-jednotek-galileo-galilei-kvantifikace-fyzikalnich-velicin-prirodni-konstanty-celistvych-mocnin-deseti.html>
- [3] Dějiny metrologie a způsoby měření v historii. *Studentino.cz* [online]. 2015 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.studentino.cz/up/ff/khi-pv1/dejiny-metrologie-a-zpusoby-mereni-v-historii-26890-p1.html>
- [4] SCHREIER, Jiří. *Metrologie*. Opava, 2007, 58 s.
- [5] ŠINDELÁŘ, Václav a Zdeněk TŮMA. *Metrologie, její vývoj a současnost*. Praha: Česká metrologická společnost, 2002, 384 s.
- [6] LUDVÍK, Vladimír a Miroslav POSPÍŠIL. *Terminologie z oblasti metrologie*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 162 s. Sborníky technické harmonizace.
- [7] HOWARTH, Preben, ed. *Metrologie v kostce III*. 3. Praha, 2009. Sborníky technické harmonizace.
- [8] Základní jednotky SI. *Eluc* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1636>
- [9] Nové definice SI. *Wikiwand* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: http://www.wikiwand.com/cs/Nov%C3%A9_definice_SI
- [10] MEISTROVÁ, Jana. Nová definice základních jednotek SI. In: *Český metrologický institut* [online]. Brno, 16. 11. 2018 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/1115>
- [11] KULHÁNEK, Petr. Už není kilo to, co dříve bylo. *Aldebaran* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018_43_kil.php
- [12] VDOLEČEK, František. *Technická měření*. Brno, 2002. Dostupné také z: http://xyz12345.wz.cz/tmr/TMR_vutbr.pdf
- [13] NĚMEČEK, Pavel. *Nejistoty měření*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008, 98 s. Kvalita, quality, Qualität. ISBN 978-80-02-02089-9.
- [14] CHUDÝ, Vladimír. *Meranie technických veličín*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-1275-2.
- [15] TŮMOVÁ, Olga. *Metrologie a hodnocení procesů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 232 s. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [16] Teplotní stupnice. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2003(1) [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/teplotni-stupnice-2003_01_28679_2520/
- [17] AUGUSTA, Pavel a Jindřich KLŮNA. *Tajemství přesnosti*. 2. Praha: STNL, 1990, 212 s. ISBN 80-03-00087-4.

- [18] *Galileo's Air Thermoscope* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://sharepoint.umich.edu/lisa/physics/demolab/SitePages/4E10.11%20-%20Galileo%27s%20Air%20Thermoscope.aspx>
- [19] HAMERNÍK, Jan. *Historie definic etalonů základních fyzikálních veličin soustavy SI*. Plzeň, 2013, 53 s. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [20] Anders Celsius. *ConVERTER* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/fyzici/celsius.htm>
- [21] *Teplo a teplota*. Dostupné také z: http://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2017/12/Teplo_a_teploata.pdf
- [22] *Přehled teplotních stupnic* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.prevod.cz/popis.php?str=220&parent=y>
- [23] VOJČINÁK, Petr. *Metodika automatizovaného měření a vyhodnocování teplot v hlubinných vrtech*. Ostrava, 2015. Disertace. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [24] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 240 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [25] *Natural Philosophy: With an Explanation of Scientific Terms, and an Index*. Londýn, 1832.
- [26] *Starodávné teploměry* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://danyk.cz/reaumur.html>
- [27] BENTLEY, Robin E. *Handbook of temperature measurement*. New York: Springer, 1998, 183 s. ISBN 98-140-2111-3.
- [28] MCDONALD, Donald a Leslie B. HUNT. *A history of platinum and its allied metals*. London: Distributed by Europa Publications, 1982, 450 s. ISBN 09-051-1883-9.
- [29] *Pyrometry: The Papers and Discussion of a Symposium on Pyrometry*. New York, 1920, 701 s.
- [30] WAIDNER, C. W. a G. K. BURGESS. *Optical pyrometry*. Dostupné také z: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/bulletin/01/nbsbulletinv1n2p189_A2b.pdf
- [31] TELECKÝ, Jakub. *Metrologické charakteristiky elektrických teploměrů*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [32] *Kruhový děj a Carnotův cyklus* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/struktura-a-vlastnosti-latek/kruhovy-dej-a-carnotuav-cyklus>
- [33] BOHMOVÁ, Pavlína. *Termodynamika pevných bodů Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90*. Praha, 2008. Bakalářská práce. Univerzita Karlova.
- [34] *Guidelines for Realizing the ITS-90*. Dostupné také z: <https://www.omegaeng.cz/temperature/Z/pdf/z158-185.pdf>
- [35] Státní etalon teploty pro bezkontaktní měření. *Český metrologický institut* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/448>
- [36] Státní etalon teploty pro kontaktní měření. *Český metrologický institut* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/412>
- [37] TOMŠEJ, Radek. *Dynamické vlastnosti teploměrů*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [38] JIRMÁSEK, Jakub. *Chyby a nejistoty při měření teploty*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [39] MIKULA, Martin. *Termodiagnostika - Dotykové a bezdotykové měření teploty*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [40] SLÁDEK, Zdeněk a František VDOLEČEK. *Technická měření*. Brno: VUT Brno, 1992, 220 s. ISBN 80-214-0414-0.
- [41] ZÁBRANSKÝ, Jaroslav. *Korekce a kompenzace při měření teplot*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [42] FRK, Martin a Zdenka ROZSÍVALOVÁ. Přehled, přesnost a citlivost teplotních senzorů v praxi. *Elektrorevue* [online]. **2012**(4), 9 [cit. 2019-05-18]. ISSN 1213-1539.
- [43] JANSKÝ, Ondřej. *Metrologický systém výrobního podniku*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [44] Kalibrační pícky pro teplotní sondy. *Omega* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.omegaeng.cz/pptst/CL900_950.html
- [45] Přenosné černé těleso pro vysoké teploty. *Omega* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz/pptst/BB-4A.html>
- [46] Koncepce rozvoje metrologie 2017-2021. *Český metrologický institut* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/koncepce-rozvoje-metrologie-2017-2021>