



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

## **APLIKAČNÍ MOŽNOSTI REFRAKTOMETRU K DIAGNOSTICE KAPALIN**

APPLICATION POSSIBILITIES OF REFRACTOMETER FOR LIQUIDS DIAGNOSTICS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**MILAN MACHÁČ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. MARTIN FRK, Ph.D.**

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Mikroelektronika a technologie**

**Student:** Milan Macháč

**ID:** 154798

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

### **Aplikační možnosti refraktometru k diagnostice kapalin**

#### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s optickými diagnostickými metodami používanými ke stanovení koncentrace či ověření struktury různých látek. Prostudujte fyzikální zákonitosti světelných jevů vznikajících při šíření světla a při vzájemném působení světla a látky (lom, odraz), které se využívají ke stanovení indexu lomu tuhých a kapalných materiálů v praxi.

S využitím stolních a ručních refraktometrů sestavte laboratorní pracoviště umožňující stanovit index lomu kapalných materiálů v teplotní oblasti. U vybraných vzorků kapalin používaných v nejrůznějších oblastech průmyslu, potravinářství či lékařství proměřte index lomu v teplotní závislosti. Proveďte přepočty indexu lomu na odvozené stupnice používané v jednotlivých odvětvích, případně na hodnotu molární refrakce za účelem potvrzení struktury sledovaného materiálu. Proveďte vyhodnocení výsledků jednotlivých vzorků kapalin za účelem stanovení koncentrace roztoků pomocí kalibračních křivek, určení bodu tuhnutí provozních kapalin apod. Na základě použitých metodických postupů a dosažených výsledků měření vytvořte zadání laboratorní úlohy využitelné v předmětech orientovaných na diagnostické metody v bakalářském studijním programu.

#### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 10.2.2015

**Termín odevzdání:** 4.6.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Frk, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na aplikační možnosti refraktometru k diagnostice kapalin. První část práce je zaměřena na teoretické základy šíření elektromagnetického vlnění. Další oddíl je orientován na měření indexu lomu, refraktometrii, popis jednotlivých typů refraktometrů a krátký úvod do interferometrie. Předposlední kapitola je věnována aplikačnímu využití refraktometrů a co díky refraktometrii můžeme změřit a spočítat. V poslední kapitole se nachází experimentální část, je zde popsán kalibrační postup, změřené hodnoty indexu lomu různých kapalin a vyhodnocení výsledků.

## Klíčová slova

Refraktometr; refraktometrie; interferometrie; index lomu; permitivita; hustota; elektromagnetické vlnění; světlo; odraz světla; lom světla.

## Abstract

This bachelor thesis focuses on application possibilities of refractometer for liquids diagnostics. The first part of the thesis focuses on the theoretical basics propagation of electromagnetic waves. The next section focuses on the measurement of refractive index, refractometry, a description of each type refractometers and short introduction to interferometry. The penultimate chapter is devoted to an application using a refractometer and what can measure and calculate. The last chapter is a practical part, there is described a calibration process, the measured values of the refractive index of liquids and evaluate the results.

## Keywords

Refractometer; refractometry; interferometry; refractive index; permittivity; density; electromagnetic waves; light; reflection of light; refraction of light.



## **Bibliografická citace**

MACHÁČ, M. *Aplikační možnosti refraktometru k diagnostice kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2015. 76 s., včetně příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „*Aplikační možnosti refraktometru k diagnostice kapalin*“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 4. června 2015

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Frkovi, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 4. června 2015

.....  
podpis autora

# Obsah

Seznam obrázků.....	viii
Seznam tabulek.....	ix
Úvod .....	1
1 Šíření elektromagnetického záření .....	2
1.1 Světlo jako elektromagnetické záření .....	3
1.2 Index lomu .....	3
1.2.1 Index lomu v kapalinách a tuhých látkách .....	5
1.3 Zákon odrazu světla .....	6
1.4 Zákon lomu světla.....	7
1.5 Mezní úhel a totální odraz světla .....	8
2 Měření indexu lomu .....	9
2.1 Refraktometrie .....	9
2.2 Abbého refraktometr.....	10
2.3 Pulfrichův refraktometr.....	13
2.4 Ponorný refraktometr .....	14
2.5 Ruční refraktometr .....	15
2.6 Interferometrie .....	16
3 Aplikační použití refraktometrů .....	17
3.1 Koncentrace látek pomocí indexu lomu .....	17
3.2 Molární refrakce .....	17
3.3 Hustota a index lomu .....	18
3.4 Permittivita a index lomu.....	19
3.5 Záporný index lomu.....	19
4 Experimentální část .....	21
4.1 Laboratorní pracoviště .....	21
4.2 Kalibrace a reprodukovatelnost měření .....	21
4.2.1 Kalibrace Abbého refraktometru.....	21
4.2.2 Kalibrace digitálního refraktometru Atago.....	22
4.2.3 Kalibrace ručních refraktometrů.....	23
4.3 Měření vzorků etanolu a destilované vody .....	23
4.4 Měření vzorků propanolu a destilované vody.....	27
4.5 Měření teplotní závislosti etanolu pro různé koncentrace .....	29
4.6 Měření teplotní závislosti 2 - propanolu pro různé koncentrace.....	32
4.7 Měření teplotní závislosti teplotnosných kapalin .....	34

4.8	Měření roztoků AdBlue .....	36
4.9	Měření cukernatých vzorků s využitím stupnice Brix .....	37
4.10	Měření s nemrznoucí směsí do ostříkovačů .....	39
4.10.1	Určení bodu tuhnutí kapalin .....	41
4.11	Měření roztoků chloridu sodného .....	43
4.12	Měření indexu lomu olejů .....	45
4.13	Potvrzení struktury měřené kapaliny pomocí molární refrakce .....	46
5	Návrh laboratorních úloh do předmětu Diagnostika a zkušebnictví .....	50
5.1	Úloha č. 1: Měření teplotní závislosti kapalin s využitím Abbého refraktometru	51
5.2	Úloha č. 2: Měření indexu lomu pomocí stolního Abbého refraktometru, digitálního refraktometru Atago a ručního refraktometru .....	53
5.3	Úloha č. 3: Měření kapalin s ručními refraktometry .....	55
	Použitá literatura.....	60
	Seznam použitých symbolů.....	64
	Přílohy .....	65

# Seznam obrázků

Obr. 1.1 Šíření elektromagnetického záření [3] .....	2
Obr. 1.2 Průchod světla rozhraním .....	4
Obr. 1.3 Lom ke kolmici .....	7
Obr. 1.4 Lom od kolmice .....	7
Obr. 1.5 Znázornění mezního úhlu a úplného odrazu .....	8
Obr. 2.1 Princip Abbého refraktometru.....	10
Obr. 2.2 Princip Amiciho hranolu .....	11
Obr. 2.3 Abbého refraktometr [21].....	12
Obr. 2.4 Vnitřní blokové schéma refraktometru [21].....	12
Obr. 2.5 Pulfrichův refraktometr[22] .....	14
Obr. 2.6 Ponorný refraktometr [23].....	15
Obr. 2.7 Ruční refraktometr .....	16
Obr. 4.1 Blokové schéma laboratorního pracoviště .....	21
Obr. 4.2 Měřicí stupnice ručního refraktometru pro měření alkoholu .....	26
Obr. 4.3 Závislost indexu lomu směsi etanol / voda na koncentraci měřený Abbého a digitálním refraktometrem.....	27
Obr. 4.4 Závislost indexu lomu směsi 2 - propanol / voda na koncentraci měřený Abbého a digitálním refraktometrem.....	29
Obr. 4.5 Teplotní závislost indexu lomu etanolu pro různé koncentrace .....	32
Obr. 4.6 Teplotní závislost indexu lomu 2 - propanolu pro různé koncentrace .....	34
Obr. 4.7 Graf závislosti indexu lomu na teplotě pro teplotně nestabilní kapaliny .....	35
Obr. 4.8 Stupnice refraktometru pro automobilový průmysl - zvýrazněné AdBlue .....	37
Obr. 4.9 Stupnice Brix ručního refraktometru.....	39
Obr. 4.10 Stupnice refraktometru pro automobilový průmysl. ....	40
Obr. 4.11 Závislost bodu tuhnutí na koncentraci etanolu v destilované vodě.....	42
Obr. 4.12 Stupnice ručního refraktometru pro měření salinity .....	44
Obr. 4.13 Závislost indexu lomu na hmotnostním roztoku směsi NaCl.....	45
Obr. 4.14 1. C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O, 2. C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O, 3. C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> .....	47

# Seznam tabulek

Tab. 1.1 Index lomu vybraných kapalin [11] .....	6
Tab. 1.2 Index lomu vybraných tuhých látek [11] .....	6
Tab. 4.1 Naměřené hodnoty indexu lomu destilované vody Abbého refraktometrem.....	22
Tab. 4.2 Naměřené hodnoty indexu lomu destilované vody refraktometrem Atago .....	22
Tab. 4.3 Naměřené a vypočtené hodnoty směsi etanolu a destilované vody: .....	24
Tab. 4.4 Naměřené hodnoty indexu lomu pro různé koncentrace etanolu a destilované vody: .....	25
Tab. 4.5 Naměřené hodnoty zakoupených vzorků alkoholu: .....	26
Tab. 4.6 Naměřené a vypočtené hodnoty směsi 2 - propanolu a destilované vody: .....	28
Tab. 4.7 Naměřené hodnoty indexu lomu pro různé koncentrace 2 - propanolu a destilované vody: .....	28
Tab. 4.8 Tabulky naměřených teplotních závislostí etanolu pro různé koncentrace:.....	30
Tab. 4.9 Tabulky naměřených teplotních závislostí 2 - propanolu pro různé koncentrace:	32
Tab. 4.10 Naměřené hodnoty indexu lomu kapaliny Solarten Super v teplotní závislosti:	34
Tab. 4.11 Naměřené hodnoty indexu lomu kapaliny SolarHeat Plus v teplotní závislosti:	35
Tab. 4.12 Naměřené hodnoty kapaliny AdBlue: .....	36
Tab. 4.13 Naměřené hodnoty ovocných šťáv: .....	38
Tab. 4.14 Naměřené hodnoty nemrznoucích směsí pomocí refraktometrů při 20 °C .....	40
Tab. 4.15 Charakteristika bodu tuhnutí [44] a indexu lomu pro různé koncentrace etanolu .....	41
Tab. 4.16 Příprava roztoků chloridu sodného .....	43
Tab. 4.17 Naměřené hodnot indexu lomu a salinity .....	44
Tab. 4.18 Naměřené a vypočtené hodnoty indexu lomu olejů: .....	46
Tab. 4.19 Katalogové hodnoty vzorků a změřený index lomu.....	47
Tab. 4.20 Hodnoty atomových refrakcí jednotlivých příspěvků: .....	48

# Úvod

Když se v dnešní době řekne slovo kapalina, okamžitě se všem vybaví řada různých látek v kapalném stavu, se kterými se setkáváme každý den. Velké množství kapalin jsou rozděleny podle využití, barvy, pachu, koncentraci, ale třeba i kvůli nebezpečnosti. Jejich využití je tak velké, že se s nimi setkáme téměř úplně všude.

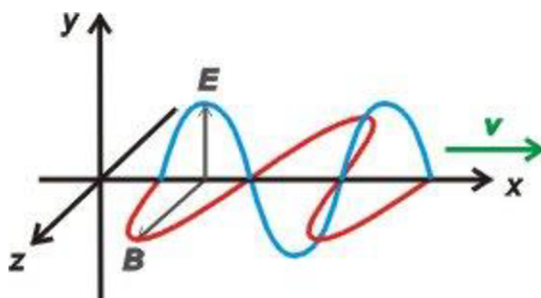
Jednou z metod diagnostiky kapalin je obor refraktometrie. Tento obor je v současnosti čím dále víc oblíbený v potravinářském, automobilovém, chemickém, lékařském, ale i v elektrotechnickém průmyslu. Popularnost refraktometrie je taky z důvodu ceny přístrojů a jednoduchosti této metody. V mnoha případech nastává situace, kdy je možnost změřit kapalinu i jiným způsobem a jinou metodou, ale cenově je téměř nedostupná. V současnosti taky rychlost je velice důležitým faktorem, protože čas, jak se říká, jsou peníze. Díky těmto vlastnostem, se refraktometr jeví jako přístroj vhodný nejen v průmyslu, ale i ve školství. Refraktometrem se měří nejen veškeré kapaliny, ale i pevné látky. Pro plynné skupenství je vhodnější spíše obor interferometrie. Základním změřeným údajem je index lomu světla. Na základě této veličiny existuje velké množství tabulek a výpočtů na jiné veličiny charakterizující kapaliny. Refraktometry, pokud se jedná o stejný typ, vypadají poměrně všechny stejně. Hlavní lišící se částí je stupnice. Každý typ refraktometru obsahuje stupnici a ne všechny jsou refrakčního indexu. Většina má zabudovanou i druhou speciální stupnici (Brix stupnice, hustota, atd.), ze které lze opět přímo odečíst požadovanou hodnotu nebo ji převést z univerzálních tabulek na zjišťovanou vlastnost.

Z hlediska rozvoje se dnes na kapaliny klade velký důraz nejen na jejich kvalitu a vlastnosti, ale i na cenu. S využitím refraktometrie lze tyto vlastnosti zkoumat, měřit a zjišťovat, zda předepsaný výrobek odpovídá vlastnostem daným výrobcem.

# 1 Šíření elektromagnetického záření

Šíření elektromagnetického vlnění spočívá v neustálé změně elektrického a magnetického pole, které se šíří v prostoru. Prostorem můžeme rozumět například vakuum, dielektrikum atd. Obecně řečeno elektromagnetická vlna je charakterizována směrem a velikostí svých vektorových složek, což jsou intenzita elektrického pole a magnetická indukce, které bývají označeny  $\vec{E}$  (intenzita elektrického pole) a  $\vec{B}$  (magnetická indukce). Intenzitu elektrického pole měříme ve voltech na metr a jednotkou magnetické indukce je Tesla. Tyto dva vektory jsou ve vakuu navzájem na sebe kolmé a ještě jsou navíc obě kolmé na směr šíření vlnění. Z toho plyne, že každé elektromagnetické vlnění je příčné vlnění [1] [2].

Na **Obr. 1.1**, můžeme vidět názornou ukázkou toho, že elektromagnetická vlna se šíří v kladném směru ose  $x$ . Vektor intenzity elektrického pole  $\vec{E}$  (modrá křivka) je promítán do osy  $y$  a kolmo na tento vektor do osy  $z$  je promítána magnetická indukce  $\vec{B}$ . Dále je nutno říct, že oba vektory jsou ve fázi, (kmitají „spolu“) tedy nabírají svých maximálních hodnot ve stejném okamžiku [3].



Obr. 1.1 Šíření elektromagnetického záření [3]

Elektromagnetické záření zahrnuje veškeré rozmezí vlnových délek, které nazýváme elektromagnetické spektrum. Do spektra řadíme rádiové vlny (dlouhé, střední, krátké, velmi krátké), mikrovlny, infračervené záření, viditelné světlo, ultrafialové světlo, rentgenové záření a gama záření. Každá z těchto oblastí má předem definovanou vlnovou délku [3].

Vlnová délka je označována lambdou  $\lambda$  a má základní jednotku metr. Je definována jako vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body periodických vln, které musí být ve fázi [4].

Vyjádření vlnové délky lze popsat vztahem

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}, \quad (1.0)$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu,  $T$  perioda a  $f$  frekvence vlnění [4].



## 1.1 Světlo jako elektromagnetické záření

Jedním z velkých objevů týkající se fyziky, je poznatek z 19. Století, že světlo je elektromagnetické vlnění. Toto tvrzení je výsledkem teorie o elektromagnetickém poli, které objevil známý anglický fyzik James Clerk Maxwell. Vlnová délka světla je ve vakuu v rozsahu elektromagnetického spektra pro lidské oko viditelná od 380 do 760 nm. Naše zrakové vjemy dokážou vyvolávat světla o různých frekvencích a podle těchto frekvencí rozeznáváme barvy světla. Lidské oko vnímá elektromagnetické vlnění ve frekvenčním rozmezí  $7,75 \cdot 10^{14}$  Hz až  $3,90 \cdot 10^{14}$  Hz, kde tento interval má hranice fialové barvy (380 nm) a červené barvy (760 nm). Složením těchto určitých poměrů barevných složek vzniká pro lidské oko světlo bílé barvy. Podle průzkumů, které se touto problematikou zabývají, bylo zjištěno, že lidské oko je nejcitlivější na žlutozelenou barvu, která se pohybuje okolo 550 nm. [5]

Jednou ze základních vlastností charakterizující světlo je rychlost světla. Rychlost světla ve vakuu je v dnešní době největší možná rychlost, kterou jsou schopné přenášet určitou energii. Rychlost světla je univerzální fyzikální veličinou – což znamená, že nezávisí na žádné jiné fyzikální veličině a popisuje ji vztah pro souvislost mezi vlnovou délkou, fázovou rychlostí a frekvencí vlnění. Vlnová délka byla popsána ve vztahu (1.0).

$$c = \lambda f, \quad (1.1)$$

kde  $f$  je frekvence vlnění a  $\lambda$  vlnová délka.

Rychlost světla můžeme jinak nazvat jako fázovou rychlost elektromagnetických vln  $v_f$ . Jedná se o jiný přepis rychlosti světla, který můžeme vypočítat z následujícího vztahu [6]

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}, \quad (1.2)$$

kde  $\varepsilon$  elektrická permitivita ( $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ ) a  $\mu$  magnetická permeabilita ( $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ ).

Jestliže dosadíme číselné hodnoty elektrické permitivity a magnetické permeability pro prostředí vakuum. Získáme  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [6].

## 1.2 Index lomu

Index lomu je bezrozměrná fyzikální veličina, která popisuje šíření elektromagnetického záření v různých látkách. S indexem lomu se můžeme setkat při analýze plynů, kapalin a tuhých látek. Měření indexu lomu se pro tyto látky vhodně využívá zejména v případech, kdy nevyhovují jiné analyzátory, což můžou být např. kolorimetry, hustoměry nebo konduktometry. Mezi nejvyužívanější přístroje, pomocí

kterých můžeme měřit index lomu, se nazývá refraktometr a interferometr. Tyto přístroje se především využívají pro měření nevodivých roztoků, kdy je obtížné najít jednoduchou a zároveň kvalitní analytickou metodu [7].

Index lomu lze popsat jako poměr dvou prostředí, kdy světelný paprsek prochází z jednoho prostředí do druhého prostředí (viz Obr. 1.2). Na rozhraní mezi dvěma prostředími se mění jejich rychlost a jeho směr. Výsledkem poměru těchto rychlostí světelných paprsků je právě zmiňovaný index lomu označovaný  $n$

$$n = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.3)$$

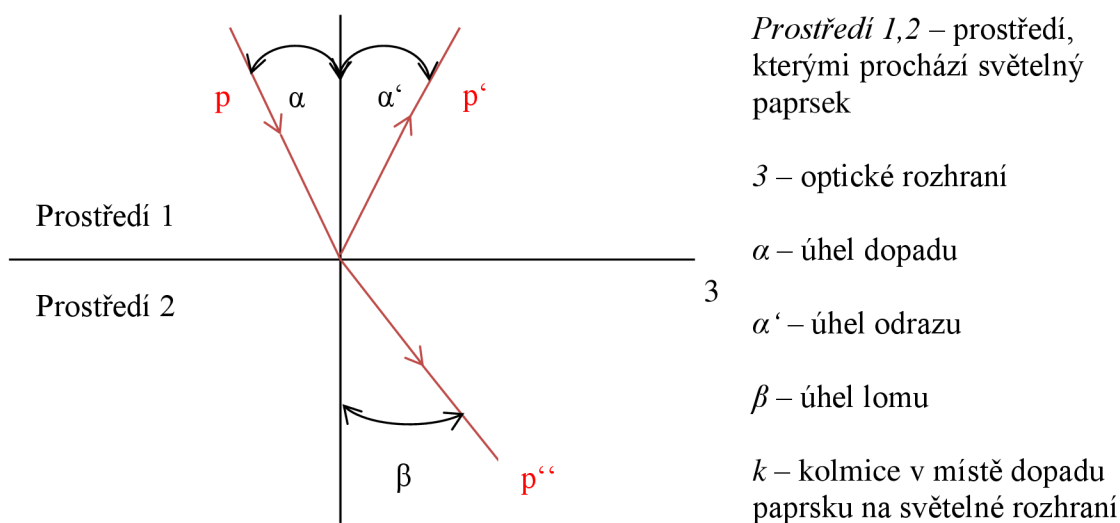
kde  $v_1$  rychlost světla v prvním prostředí a  $v_2$  rychlost světla v druhém prostředí [7].

Pokud se zamyslíme, tak můžeme zjistit, že při měření rychlosti světla v různých prostředích nemusí být úplně nejpřesnější a dobře měřitelné. Proto se zjistilo, že je daleko jednodušší a přesnější měřit úhel směru světelných paprsků. Toto tvrzení bylo taky ze zákona holandským fyzikem Willerbrordem Snellem, který dokázal v 17. století roku 1621, že index lomu je definován, jako poměr sinu úhlu dopadu  $\alpha$  v prvním prostředí k sinu úhlu lomu  $\beta$  v prostředí druhém. Z toho je tedy zřejmé, že index lomu je poměrná veličina a jsou dva typy měření a to absolutní a relativní [7].

Snellův zákon je dán vztahem

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (1.4)$$

kde  $\sin \alpha$  je úhel dopadu a  $\sin \beta$  je úhel lomu. [7]



Obr. 1.2 Průchod světla rozhraním

Máme dva druhy měření indexu lomu, protože je to veličina poměrná. Absolutní index  $n$  lomu je měřen a odvozen ze standardního prostředí. Jedná se tedy o světelný paprsek procházející prvním prostředím rychlostí světla  $c$  a to ve vakuu, kdy paprsek dále proniká do jiného druhého prostředí o rychlosti  $v$ . Z toho plyne následující vztah: [7]

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.5).$$

Pokud bychom označili absolutní indexy lomu  $n_1, n_2$  procházející prostředími 1, 2 získáme vztah [7]

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.6).$$

Poměr rychlostí  $v_1, v_2$  mezi dvěma prostředími jsou v obráceném poměru absolutních indexů lomu. Jak už se napovídá, relativní index lomu  $n_{21}$  je závislost libovolných kombinací prostředí, vyjadřuje poměr indexu lomu prostředí 2 k indexu lomu prostředí 1 [7].

$$n_{21} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.7).$$

### 1.2.1 Index lomu v kapalinách a tuhých látkách

Index lomu, jak je známo, jde měřit v různém prostředí neboli skupenství. Některé refraktometry tyto skupenství podporují, nebo jsou přímo vhodné pro dané měření. Závisí taky především na stupnici refraktometru, na jeho rozsahu, protože index lomu tuhých látek se pohybuje řádově od 1,3 až po cca 2,5. U kapalin je index lomu v podobném rozsahu jako tuhé látky 1,3 – 1,7. Velkým klíčovým parametrem určování o jaké skupenství se jedná je hustota tohoto materiálu, vlnová délka a tlak. Například některé tuhé látky, jako jsou skla, mohou mít hustotu menší, protože mohou obsahovat oxidy, které hustotu odlehčují. Toto tvrzení platí taky u kapalin, které mohou mít větší index lomu, ale hustotu menší než voda. Změna indexu lomu v závislosti s vlnovou délkou se nazývá disperze. V tuhých látkách může být index lomu závislý na směru světla, který prochází materiálem (viz **Tab. 1.1** a **Tab. 1.2**) [8] [9] [10] [11].

Tab. 1.1 Index lomu vybraných kapalin [11]

Kapalina	Index lomu
Voda	1,333
Etanol	1,360
Propylalkohol	1,380
Metanol	1,330
Glycerol	1,475
Chlorobenzen	1,525
Olivový olej	1,460
Toluen	1,497
Parafin	1,480
Aceton	1,360

Tab. 1.2 Index lomu vybraných tuhých látek [11]

Tuhá látka	index lomu
Diamant	2,417
Sůl	1,520
Polystyren	1,590
Křemené sklo	1,57 - 1,75
Led	1,310
Plexisklo	1,490
Korunní sklo	1,5 - 1,62

### 1.3 Zákon odrazu světla

Pro popis odrazu světla můžeme vycházet z **Obr. 1.2**. Na obrázku můžeme vidět dopadající záření  $p$  do bodu kolmice  $k$ . Kolmice  $k$  je kolmá na základní rovinu, kde základní rovina od sebe odděluje optické prostředí 3. Tato kolmice zároveň od sebe odděluje rovinu dopadu. Dopadající záření svírá s touto kolmicí  $k$  úhel dopadu  $\alpha$ . Odražený paprsek  $p'$  svírá s touto kolmicí  $k$  úhel  $\alpha'$ . Je nutné si zapamatovat, že veškeré úhly dopadu se odečítají ve směru od kolmice dopadu  $k$ . Velikost úhlu odrazu  $\alpha'$  je přesně definován a platí pro něj zákon odrazu záření [12] [13]

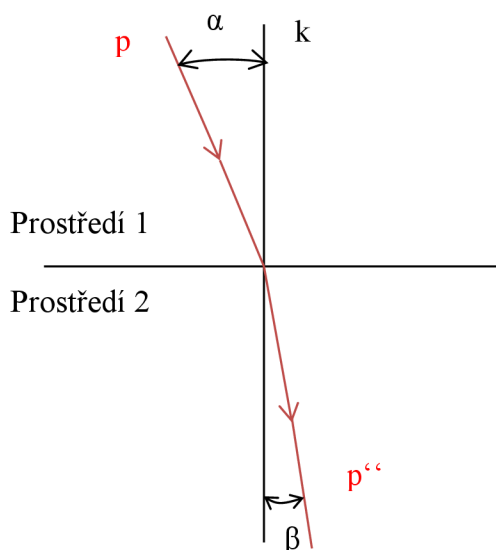
$$\alpha' = \alpha \quad (1.8).$$

Velikost úhlu odrazu  $\alpha'$  je rovna velikosti úhlu dopadu  $\alpha$  a odražený paprsek leží v rovině dopadu. Tento zákon nezávisí na vlnové délce dopadajícího záření, protože úhel odrazu  $\alpha'$  není závislý na frekvenci. Z toho plyne, že zákon platí pro světla jakýchkoliv vlnových délek [13].

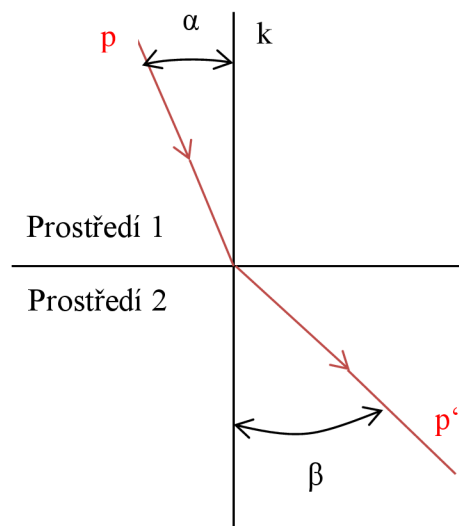
## 1.4 Zákon lomu světla

U lomu světla dochází k přechodu světelného paprsku z jednoho prostředí do druhého, což nám taky popisuje **Obr. 1.2**. Světelný paprsek dopadající na kolmici  $k$ , který svírá úhel  $\alpha$  dále proniká do druhého prostředí, světelný paprsek  $p''$  a ten svírá s kolmicí úhel  $\beta$ . Aby k tomuto jevu došlo, musí být obě prostředí průhledné, nemělo by smysl uvažovat lom světla např. ze vzduchu do dřeva. Pokud tato podmínka je splněna, dochází ke změně směru paprsku. U lomu světla mohou nastat dvě situace a to: [13]

- Světlo se začne šířit z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího prostředí, např. ze vzduchu do vody, z vody do skla atd. To znamená, že index lomu prvního prostředí je menší než index lomu druhého prostředí. Z toho plyne, že úhel lomu  $\beta$  je menší než úhel dopadu  $\alpha$ . Tento jev nazýváme lom ke kolmici  $k$ , jak znázorňuje **Obr. 1.3** [13].
- Pokud se světlo šíří z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí, nastává jev opačný (např. z vody do vzduchu, ze skla do vody). Takže index lomu prvního prostředí je větší než index lomu druhého prostředí. Z toho vyplývá, že úhel lomu  $\beta$  je větší, než úhel dopadu  $\alpha$ . Tento jev nazýváme lom od kolmice  $k$ , jak znázorňuje **Obr. 1.4** [13].



Obr. 1.3 Lom ke kolmici



Obr. 1.4 Lom od kolmice

Zákon lomu světla je vyjádřen tak, že podíl sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu je roven podílu rychlostí, kterým se světlo šíří v prostředí prvním v poměru s prostředím druhým. Lomený paprsek zůstává v rovině lomu. Zapsáno vzorcem [13]

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (1.9).$$

Podíl rychlostí, jak můžeme vidět ve vzorci (1.9) je konstantní pro dané rozhraní a nazýváme jej indexem lomu  $n$ , který je popsán ve vzorci (1.3) [13].

## 1.5 Mezní úhel a totální odraz světla

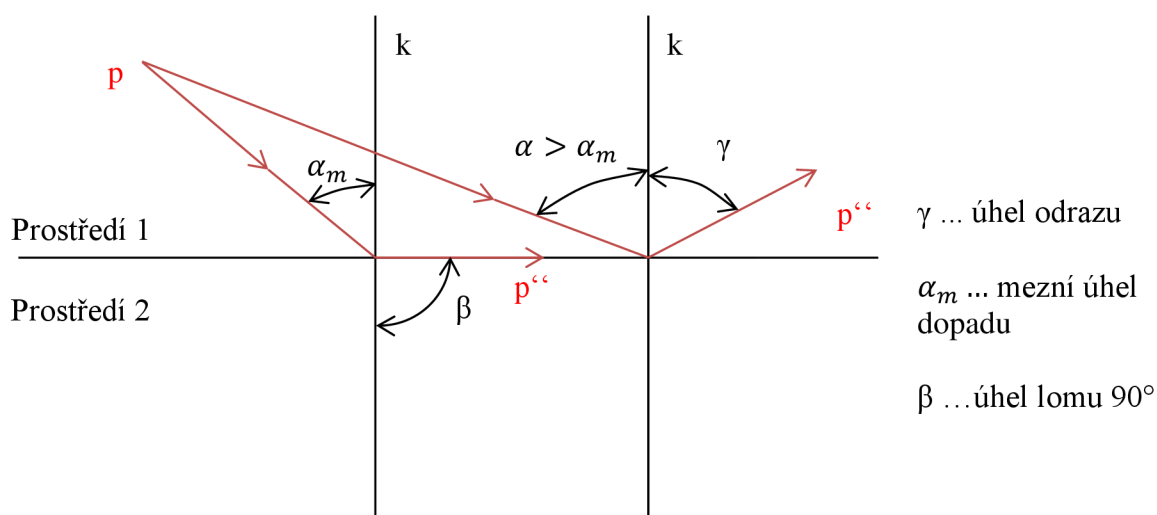
Při určitém úhlu dopadu  $\alpha_m$ , který nazýváme mezní úhel, nastane jev, kdy úhel lomu  $\beta$  bude roven  $90^\circ$ . To znamená, že dopadající světelný paprsek se nedostane z prostředí 1 do druhého prostředí 2, ale bude procházet rovnoběžně s rozhraním. Zvětšíme-li úhel dopadu  $\alpha_m$ , nastane jev, kdy se opět paprsek nedostane do druhého prostředí 2, ale úplně se odrazí (viz **Obr. 1.5**). Tento jev nazýváme totální odraz neboli totální reflexe. Oba tyto jevy nastanou pouze tehdy, pokud je splněná následující podmínka: [14] [15] [17]

- Přechod světla se musí dít z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí, tzn.  $n_2 < n_1$  (např. z vody do vzduchu atd.) [15].
- Pro úplný odraz musí platit, že úhel dopadu je větší než mezní úhel  $\alpha_m$  [15]

Pro mezní úhel platí vztah

$$\alpha_m = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad n_{21} < 1, \quad (1.10)$$

kde  $n_2$  je index lomu druhého prostředí,  $n_1$  index lomu prvního prostředí a  $\alpha_m$  mezní úhel.



Obr. 1.5 Znárodnění mezního úhlu a úplného odrazu

I tyto vlastnosti mají své využití v praxi. Na úplném odrazu jsou založeny vláknové vlnovody, které se využívají ve sdělovací technice nebo v optoelektronice. Základem tohoto vlnovodu je skleněné vlákno, kde jeho střed má větší index lomu než obvodová vrstva. Dopadající záření na obvodovou vrstvu dopadá a odráží se „zpět“ a šíří se tak po celém vlákně [16].

## 2 Měření indexu lomu

Měření indexu lomu se zabývají obory analytické chemie, které nazýváme refraktometrie a interferometrie. Index lomu lze měřit u látek kapalných, pevných a dokonce i plyných látek, podle toho jaký přístroj používáme [8].

### 2.1 Refraktometrie

Je to obor, který se zabývá měřením různých látek pro zjištění indexu lomu. K samotnému měření se používá přístroj nazývaný se refraktometr. Ten může měřit jak pro skupenství kapalné, pevné tak i pro plyné. Refraktometrie má velký počet využití a to v různých oborech. Kvalita látek je důležitá pro dodržení technologického postupu, ať se jedná o automobilový průmysl, chemický průmysl, zdravotnický, strojírenský, zemědělskou výrobu a podobně [18].

Refraktometr se skládá ze základních součástí. Okulár, do kterého se díváme, zdroj světla (postačí i sluneční svit), stupnice pro odečtení indexu lomu nebo jiné hodnoty, zaostřovací šroub a hlavní částí jsou skleněné optické hranoly o předem známém indexu lomu [19].

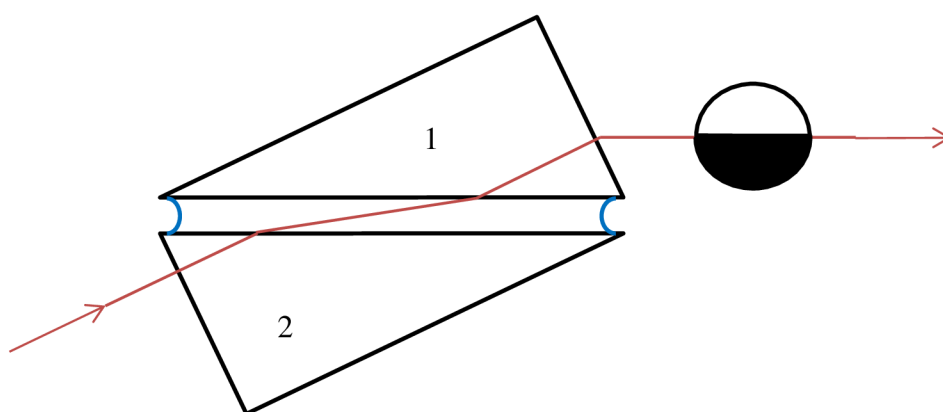
Refraktometry můžeme podle různých způsobů měření indexu lomu rozdělit na měření zařízení měřící úhel lomu, zařízení založené na měření mezního úhlu a speciální zařízení. Do první kategorie se berou refraktometry, kde světelné paprsky prochází rozhraním dvou prostředí mírou indexu lomu je vystupující paprsek z měřeného prostředí o daném úhlu. Do druhé kategorie spadají přístroje založené na principu šíření paprsku, které prochází hustším prostředím a dále dopadá na rozhraní s řidším prostředím. V tomto případě dochází k určitému poměru indexu lomu obou prostředí a určitému meznímu úhlu dopadu paprsku a nabývá k úplnému odrazu světelného paprsku. Hodnotou indexu lomu je pak velikost tohoto mezního úhlu. Tato metoda je velice v oboru refraktometrie využívána. Do poslední skupiny spadají přístroje, využívající jiné fyzikální principy, kde zeslabení původního toku světelného záření měřeným prostředím je mírou indexu lomu [8] [7].

Existují různé refraktometry, na základě různých metod. Mezi nejznámější refraktometry patří Abbého refraktometr, Pulfrichův refraktometr, ponorný refraktometr, ruční refraktometr [20]. Některé z těchto refraktometrů si podrobně popíšeme dále.

Na základě indexu lomu změřené právě těmito refraktometry, můžeme vypočítat například koncentraci látek za postupného ohřívání kapaliny. Mnoho refraktometrů používá stupnici Brix, která se hojně využívá pro chemický a potravinářský průmysl – cukernatost ovocné šťávy, koření, med a podobně [8].

## 2.2 Abbého refraktometr

Abbého refraktometr (viz Obr. 2.3 a Obr. 2.4) slouží pro určení indexu lomu pro kapalné a tuhé látky. Měřicí částí jsou zde dva hranoly, kdy jeden je ze skla s vysokým indexem lomu a druhý je tzv. osvětlovací. Ve skleněném hranolu je úhel lomu cca  $60^\circ$ . Měření kapalin se provádí následujícím postupem. Zkoumaný roztok se nanese např. pomocí pipety mezi tyto dva hranoly, stačí však malé množství, tak aby mezi těmito hranoly se vytvořil tenký film kapaliny o tloušťce cca 0,1 mm. Poté je nutné hranoly pootočit pomocí šroubu do polohy, která je znázorněna na **Obr. 2.1**. Takže osvětlovací hranol se dostane do polohy pod hranol ze skla. Světlo vstupuje ze spodní strany do osvětlovacího hranolu (2), kde jeho horní stěna je z matného materiálu. Matný materiál způsobí rozptýlení světla do měřené kapaliny. Po projití světla kapalinou putuje světlo do měřicího hranolu (1), ale pouze ve směru, ve kterém je úhel lomu menší nebo maximálně rovný meznímu úhlu. Oba tyto hranoly mají výstupy na připojení termostatu pro ohřívání zkoumající kapaliny [20] [21].



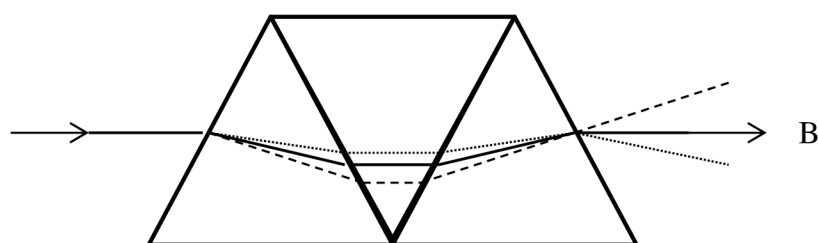
Obr. 2.1 Princip Abbého refraktometru

Stupnice Abbého refraktometru zobrazuje přímo index lomu s přesností na několik jednotek čtvrtého desetinného čísla. Rozhraní se nastavuje šroubem na refraktometru tak, aby byl splněn obrazec černého půlkruhu, jak je na **Obr. 2.1**. S tímto pootáčením se mění i stupnice indexu lomu a je nutné zobrazit půlkruh přesně. Novější refraktometry mají zobrazené i osy, kde se má protínat půlkruh [20] [21].

Index lomu tuhých látek se měří o něco rozlišnou metodou. Měřený tuhý vzorek musí být vyleštěný a vybroušený, pro lepší spojení mezi měřeným vzorkem a hranoly se dosáhne pomocí kapaliny, která má velký index lomu (nejlépe podobný jako vzorek, pokud víme, přibližně v jakém intervalu budeme měřit) [20].



Abbého refraktometr obsahuje kompenzátor složený ze dvou Amiciho hranolů. Amiciho hranol se skládá ze tří skleněných hranolů, kde dva krajní jsou z korunového skla, a střední hranol je z flintového skla. Z Amiciho hranolu vychází světelné záření s vlnovou délkou sodíkové čáry B – 589,3  $\mu\text{m}$ , v tom stejném směru, jako do něho vstupovalo, ale záření s kratšími vlnovými délkami se odklání níž (viz **Obr. 2.2**). Z toho vyplývá, že Amiciho hranol se chová jako tzv. přímočaré disperzní zařízení. Použitím dvou těchto zařízení, můžeme dostat dobrý kompenzátor disperze. Jeden z těchto Amiciho hranolů (kompenzační) se otáčí kolem své podélné osy, protože když refraktometrem prochází polychromatické světlo a nebylo by kompenzováno, tak bychom místo ostrého rozhraní světlo – tma, viděli obraz rozmazaný se spektrálními barvami. Pro kalibraci kompenzačního hranolu se používá právě sodíková výbojka, a jakmile budeme hranolem otáčet tak se nesmí měnit rozhraní světla a tmy [20] [21] [8].

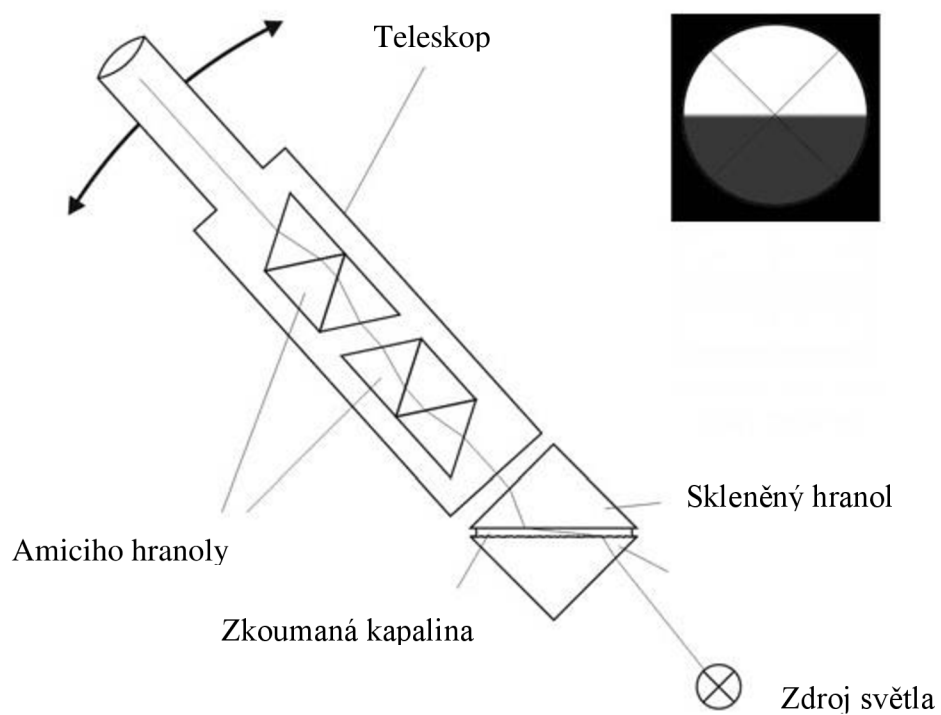


Obr. 2.2 Princip Amiciho hranolu

Abbého refraktometr je v dnešní době jeden z neznámějších pro měření indexu lomu od 1,3 do 1,7. Jeho cejkování se provádí za použití čistých kapalin s předem známým indexem lomu. Pokud vznikne odchylka na stupnici, je možnost posunout nitkovým křížem pomocí šroubu na mikroskopu na přesnou požadovanou hodnotu. Při velkých odchylkách se musí pohnout s hranoly tak, že povolíme šrouby a pohneme podle směru odchylky, poté šrouby opět dotáhneme. V dnešní době se můžeme setkat s refraktometry, které vyrobily n. p. Meopta a německá firma C. Zeiss VEB Jena [20].



Obr. 2.3 Abbého refraktometr [21]



Obr. 2.4 Vnitřní blokové schéma refraktometru [21]

## 2.3 Pulfrichův refraktometr

Pulfrichův refraktometr (viz Obr. 2.5) používá jako měřící jednotku hranol vyrobený ze skla s vysokým indexem lomu, podobně jako u Abbého refraktometru. Hranol má úhel lomu  $90^\circ$ . Světelným zdrojem tohoto přístroje je monochromatické světlo, které vznikne vyfiltrováním některých paprsků ze záření spektrálních lamp. Hojně využívána je Geisslerova trubice, je to plynová výbojka, která je uvnitř naplněná vodíkem, rtutí nebo héliem [20] [8].

Index lomu se u tohoto přístroje měří na vzorcích s rovinou vybroušenou ploškou, která se musí přiložit na horní část (plochu) hranolu. Pro lepší spojení těchto dvou látek se musí kápnout kapalina o velkém indexu lomu, ale nesmí se dotýkat povrchu měřené látky. Slouží pouze pro vyplnění malých odchylek a nerovností. Jakmile provedeme tuto operaci, musíme vhodně upravit refraktometr tak, že přitmelíme skleněnou trubičku na povrch hranolu. Tímto vznikne malá nádobka, do které se poté aplikuje měřená tekutina a její dno tvoří měřený hranol (dno trubičky musí být kvalitně obroušené, aby přiléhal na hranol). Přitmelovací materiál se používá kanadský balzám ( $n = 1,54$ ), arabská guma ( $n = 1,44$ ) nebo Solerové cementy atp. [8] [20] [22].

Důležitým faktorem je zde teplota, která značně ovlivňuje index lomu. Proto je třeba udržovat teplotu celého zařízení v konstantní teplotě (především hranol). Pro temperování se používají termostaty, které se připojí přímo na měřený vzorek a temperovat musíme 5 – 15 minut, než začneme měřit hodnotu úhlu. U tohoto přístroje nedochází k přímému odečtení indexu lomu, ale odečítá se úhel, pomocí přesného úhlooměru s přesností až  $1 \cdot 10^{-5}$  u špičkových přístrojů. Z tohoto úhlu spočítáme index lomu ze vztahu [20] [8]

$$n = \sqrt{N^2 - \sin^2 i}, \quad (2.1)$$

kde  $i$  je změřený úhel,  $N$  index lomu hranolu a  $n$  index lomu zkoumané kapaliny.

Tento refraktometr se používá v aplikacích, kdy potřebujeme extrémně přesný index lomu. Je nutná vysoká kvalifikace obsluhy, protože práce s tímto refraktometrem je velice náročná. Proto je i těžké v praxi s tímto refraktometrem setkat. Tuhé látky se měří podobně jako u Abbého refraktometru [20].



Obr. 2.5 Pulfrichův refraktometr[22]

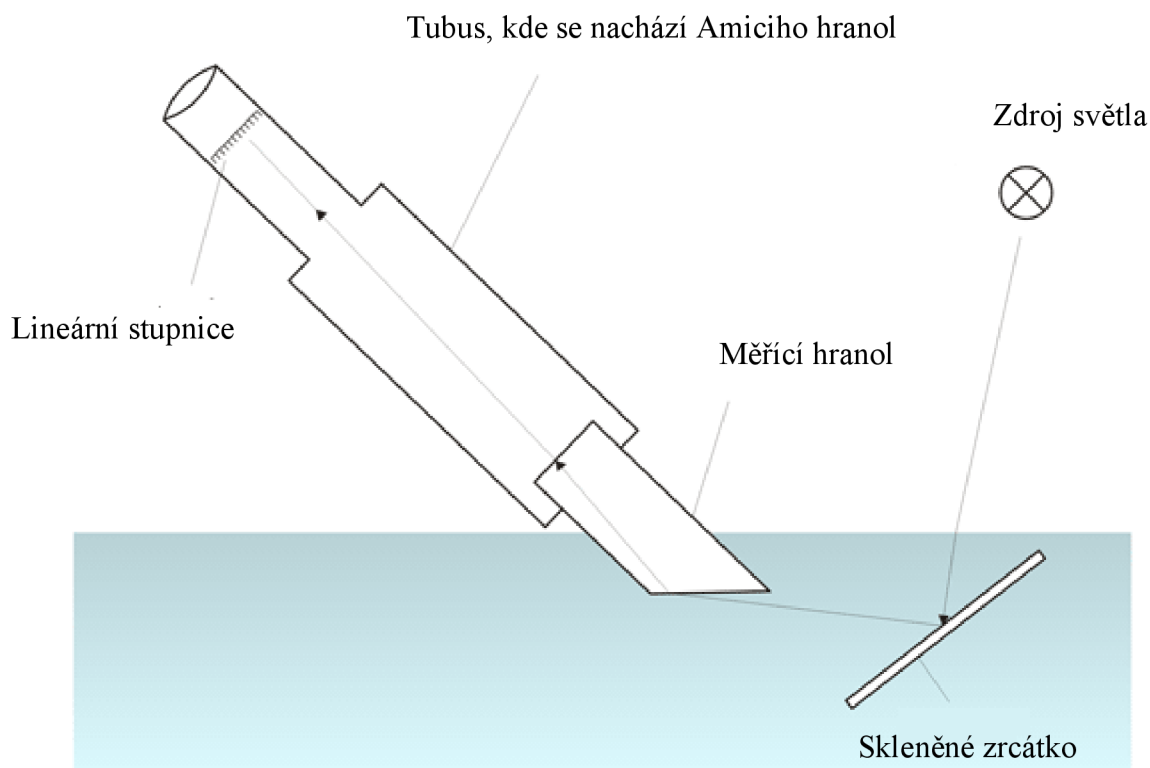
## 2.4 Ponorný refraktometr

Tento typ refraktometru slouží k měření kapalin. Má na konci svého zařízení hranol s úhlem lomu  $60^\circ$ , který je nasazený přímo na dalekohled. Tento hranol je základním měřicím zařízením ponorného refraktometru [8] [20] [23].

Ponorný refraktometr (viz Obr. 2.6) se používá následovně: Hranol se přímo ponoří do zkoumané kapaliny, která je v nádobce. To umožňuje o mnoho lepší vlastnosti měření, než u Abbého refraktometru, protože směr paprsků vychází přímo z kapaliny a u Abbého refraktometru vycházelo z osvětlovacího hranolu a pak až do kapaliny. V ponorné refraktometrii se dosáhne lepším a přesnějším měření, protože má ostřejší rozhraní světla a tmy. Důležité je, aby nádobka s kapalinou byla temperovaná a měření se provádělo po ustálení teplot. Tato nádobka je pro ustálení teplot temperována v temperační nádobce kde se nachází i osvětlovací skleněné okýnko [20] [23] [8] [24].

Paprsky dopadající ze zdroje světla do zkoumající kapaliny, jsou směřovány skleněným okénkem do měřicího hranolu, kde jejich úhel je o něco málo menší než mezní úhel, aby vytvářeli rozhraní světla a tmy. Dále paprsky prochází do Amiciho hranolu, který se otáčí kolem své vodorovné osy a navíc se vněm kompenzuje disperze bílého světla. Poté záření vstupuje do dalekohledu, kde je umístěna destička s lineární stupnicí. Poté pomocí cejchované tabulky převedeme dílky na index lomu [20] [23] [24].

Ponorné refraktometry se v chemických analýzách využívají na určení koncentrace pomocí indexu lomu [20].



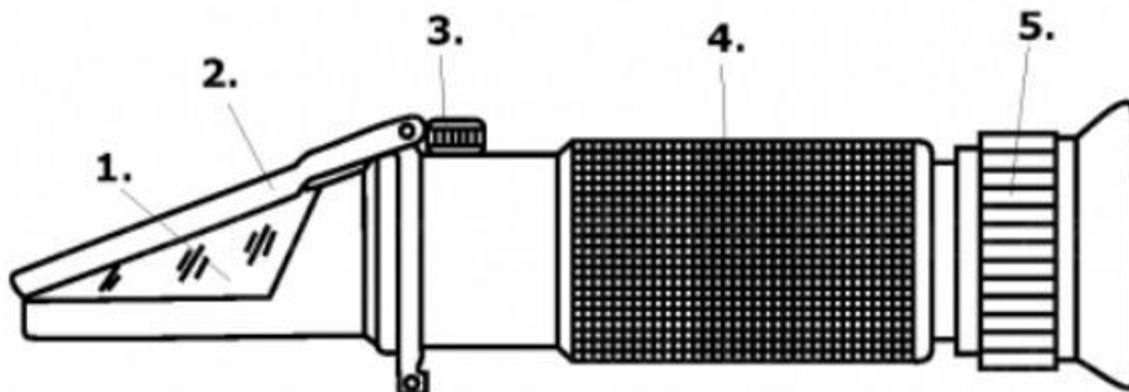
Obr. 2.6 Ponorný refraktometr [23]

## 2.5 Ruční refraktometr

Tento refraktometr je podobný v principu s ponorným refraktometrem, avšak nemá tak variabilní použití jako u zmíněných refraktometrů. Jeho základem je jeden měřicí skleněný hranol, kdy jeho vlastnosti se volí podle uživatelských požadavků na měřící rozsah indexu lomu a dalších využívaných stupnic. Ruční refraktometr (viz Obr. 2.7) je cejchován pro různé stupnice, jako jsou Brix, Oeschle, Baumé a jiné pro měření hmotnostního procenta alkoholu. V dnešní době se tento přístroj hojně využívá v potravinářském průmyslu (měření hladiny cukru v ovoci atd.), zdravotnictví (analýza tělních a tkáňových tekutin) a dokonce i v automobilovém průmyslu (měření brzdové kapaliny, chladič kapaliny, elektrolytu atd.). Jeho výhodou je, že je lehce přenositelný a je jednoduchý na obsluhu. Dalo by se říct, že je i relativně levný oproti ostatním typům [8].

Postup měření s tímto typem refraktometru je následující. Odklopíme krytku z hranolu a na hranol kápneme malé množství vody pro „zkalibrování“ rozhraní k nule. Musíme dát pozor (pokud používáme analogový refraktometr), aby mezi hranolem a

krytkou nevznikly bublinky, které by ovlivňovaly přesnost přístroje. Poté krytku odsuneme, očistíme hranol a vložíme námi testovanou kapalinu. Opět přiložíme krytku, okem proti světlu se podíváme do tubusu dalekohledu a měříme požadovanou hodnotu. U tohoto přístroje není nutná regulace teploty, pokud se nacházíme v rozsahu 14 – 38 °C. Ideální je v každém případě teplota 20 °C. Podle odchylky teploty existují srovnávací tabulky, díky kterým se výsledek lze odčíst přesně. Po změření vzorku kapaliny je vhodné opět refraktometr očistit destilovanou vodou a zkalibrovat [8].



- 1 – měřící hranol se stupnicí
- 2 – krytka refraktometru
- 3 – aretační šroub pro nastavení nulové hodnoty
- 4 – tubus s měřící zrcadlovou komorou
- 5 – okulár se zaostřovacím systémem

Obr. 2.7 Ruční refraktometr

## 2.6 Interferometrie

Tyto zařízení jsou založeny na měření indexu lomu plynů, kdy se volí metoda měření difrakce nebo interference světla na úzké štěrbině. Refraktometry, pro měření interference nejsou příliš vhodné z důvodu malé citlivosti. U této vědy se neměří přímo index lomu procházejících světelných paprsků, ale jejich rozdíl ze dvou prostředí. Hodnotu indexu lomu prvního prostředí bereme jako známou a druhé prostředí musíme změřit. Pro lepší chápání můžeme říct, že měříme koncentraci jednoho prostředí vůči druhému, kde jejich rozdíl je výsledkem [20] [7] [8].

V laboratořích se můžeme setkat s různými typy interferometrů, kde mezi nejznámější jsou Rožděstvenského – Machův, Jaminův a Rayleighův. U silně zředěných roztoků nebo plynů je nutná vysoká citlivost zařízení, proto jsou používány tyto typy interferometrů, které dokážou měřit index lomu až na osm desetinných míst. Interferometry se používají především ve zdravotnictví, pro kalibraci přístrojů dávající anestézii, ale i v průmyslu a výzkumu [20] [7] [8].

## 3 Aplikační použití refraktometrů

Refraktometry mají velké využití a dají se různě a jednoduše aplikovat pro jednotlivé diagnostiky a metody zjišťování vlastností kapalin a tuhých látek. Na trhu se používají refraktometry s různými stupnicemi pro okamžité použití a zjištění nejen indexu lomu, ale přímo hodnoty, kterou požadujeme. Pokud nezjistíme hodnoty přímo, existují fyzikální tabulky, ze kterých se požadovaná hodnota dá jednoduše odečíst. My se v této kapitole zaměříme především na práci s indexem lomu (refrakčním indexem), ze kterého se dají vyvodit vlastnosti kapalin.

### 3.1 Koncentrace látek pomocí indexu lomu

Jak už je známo hodnota indexu lomu je vysoce závislá na příměších, které se nacházejí ve zkoumané kapalině. Na základě indexu lomu tedy můžeme měřit koncentraci příměsí v kapalinách, tedy čistotu látky. Určení procentuální koncentrace v daném roztoku, lze určit ze změřené hodnoty indexu lomu a známé hodnoty látky v čistém stavu. Pro tuto metodiku určování koncentrace platí vztah [7] [20] [26]

$$C = K \cdot (n_n - n), \quad (3.1)$$

kde  $C$  je obsah příměsí ve zkoumané látce,  $K$  je empirický koeficient neboli inkrement indexu lomu,  $n_n$  hodnota indexu lomu smíchané látky a  $n$  je hodnota indexu lomu stejné látky v čistém stavu.

Tento vztah je vhodné použít pro malé intervaly koncentrací a tento vztah jak si můžeme všimnout má lineární závislost. V praxi se lze využít i jiných vztahů na základě znalostí indexu lomu nečistoty, která se ve smíchané látce nachází. Platí proto vztah

$$C = 100 \cdot \frac{n_n - n}{n_p - n}, \quad (3.2)$$

kde  $n_p$  je index lomu nečistot v látce.

Z této rovnice můžeme brát vypočtenou hodnotu jen jako přibližnou a zdaleka ne přesnou. Pro lepší analýzu je vhodné směsi roztoků namíchat s různými koncentracemi (např. 10 %, 20 %, ..., 100 %) a poté odměřit jednotlivé indexy lomu směsí. Z těchto změřených hodnot sestavíme křivku a z rovnice regrese můžeme taky spočítat koncentraci látky.

### 3.2 Molární refrakce

Molární hodnota refrakce se zjišťuje v případech, kdy např. odchylka indexu lomu směsi se téměř neliší od přidané látky. Jestliže je tato odchylka malá ( $\Delta_n < 0,005$ ), nemůžeme brát v potaz tuto odchylku pro měření koncentrace. Tato odchylka může být způsobena chemickou reakcí mezi látkami, ale i třeba malou změnou teploty vzorku.

Molární refrakce především lze použít k ověření struktury sloučenin a má dvě metody určování:

- a) Hodnota nám bližší je početní, kdy známe hodnoty indexu lomu, které změříme refraktometrem, hodnoty hustoty a molární hmotnosti látky. Poté platí vztah pro molární refrakci [25] [20] [27]

$$R_M = \frac{M}{\rho} \cdot \frac{n^2-1}{n^2+2}, \quad (3.3)$$

kde  $M$  je molární hmotnost látky,  $\rho$  hustota látky a  $n$  index lomu látky.

- b) Druhá metoda je počítání s tabulkou, kdy bereme hodnoty atomových refrakcí  $R_A$ . Z těchto atomových refrakcí získáme molární refrakci  $R_M$  a z její celkové velikosti a znalostí hustoty můžeme určit, o jaký prvek se jedná a taky hovořit o tom jaké složení daná látka má. Může se stát, že známe dva vzorce prvků sloučenin a nebyli si jistí, který z daných byl správný. Sečtením jednotlivých atomových refrakcí prvků, můžeme zjistit, který prvek má stejnou molární refrakci jako námi spočítaný [25] [27].

### 3.3 Hustota a index lomu

Hustota s indexem lomu plně souvisí. Při zamyšlení, se index lomu mění v závislosti na teplotě, tlaku a skupenství. Tyto jevy mají samozřejmě vliv i na hustotu  $\rho$ . Hustota v závislosti na indexu lomu je popisována přímou závislostí vztahem [28] [29]

$$f(n) = R_s \cdot \rho, \quad (3.4)$$

kde  $R_s$  je specifická refrakce a  $\rho$  hustota látky.

Specifická refrakce nezávisí na teplotě a tlaku. Hodnotu specifické refrakce můžeme taky spočítat ze známého indexu lomu a hustoty látky. Vztahy jsou různě modifikovány podle vědců, kteří se touto problematikou zabývali. Jedním z nejznámějších zákonů v tomto oboru je Lorentzův – Lorentzův vztah, který popisuje tato rovnice [29]

$$R_s = \frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (3.5).$$

S hodnotou specifické refrakce souvisí i molární refrakce a hmotnost dané látky, která je vyjádřena podle vztahu

$$R_M = R_s \cdot M \quad (3.6).$$

Všechny tyto výpočty a vzorečky mají velký význam pro určení indexu lomu a složení pro binární směsi, jako jsou roztoky etanolu a sacharózy. Tvary křivek závisí především na způsobu vyjádření koncentrace a interakci při tvorbě roztoku [29].



### 3.4 Permitivita a index lomu

Závislost permitivity na indexu lomu vyplývá z Maxwellových rovnic, který popisuje vztah šíření elektromagnetických vln ve vakuu. V 19. století Maxwell popsal elektromagnetické vlnění ve vakuu dvěma fyzikálními veličinami a to elektrickou permitivitou  $\varepsilon_0$  a magnetickou permeabilitou  $\mu_0$ . S těmito veličinami Maxwell popsal rychlost šíření světla ve vakuu následujícím vztahem [30] [31] [32]

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}, \quad (3.7)$$

kde  $\varepsilon_0$  je elektrická permitivita ve vakuu,  $\mu_0$  je magnetická permeabilita vakua.

Nyní byl vysvětlen vztah závislosti elektromagnetického šíření vlnění ve vakuu. Jak lze předpokládat, světlo se může šířit z jiného prostředí než z vakua. Proto musíme použít opět složky relativní elektrické permitivity popisující jiné prostředí  $\varepsilon_r$  a relativní magnetickou permeabilitu pro jiné prostředí  $\mu_r$ . Tyto veličiny mají pro každé prostředí hodnotu. Nás především zajímá index lomu popisován těmito veličinami. Z rovnice (1.5), která charakterizuje index lomu z prostředí vakua do jiného prostředí, můžeme dosazením těchto elektrických veličin získat vyjádřením vztah: [30] [31] [32]

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}}{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}{1} = \sqrt{\frac{\varepsilon_r \cdot \mu_r}{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}, \quad (3.8)$$

Všeobecně se lom světla realizuje pro nemagnetické materiály např. sklo a proto je hodnota relativní permeability  $\mu_r = 1$ . Z toho plyne zjednodušení vztahu (3.8)

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \quad (3.9)$$

Zde můžeme zaregistrovat, že existuje velice jednoduchý vztah pro převod optických konstant na elektrické a magnetické konstanty.

### 3.5 Záporný index lomu

Záporný index lomu je v dnešní době velikým tématem budoucnosti. Některé speciální materiály dokážou vytvářet v prostředí negativní index lomu, jedním z těchto materiálů jsou metamateriály, které se v dnešní době objevují. Tyto materiály mají zajímavou vnitřní strukturu složení, rozpoložení a jejich elektrické a magnetické vlastnosti jsou netypické, z toho plyne, že i netypickým se stává i index lomu. Netypičnost elektrických a magnetických materiálů spočívá v tom, že jejich vektory tvoří levotočivou soustavu. To popisuje jev, kdy permitivita a permeabilita jsou záporné [33] [34].

$$n = -\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r} \quad (3.10)$$

Důležitým parametrem hraje roli vlnová délka. Metamateriály se chovají zvláště pouze v určitém intervalu vlnových délek. Pokud se v intervalu nenachází, chovají se jako běžné prostředí. Metamateriály jsou založeny na principu, aby jimi procházelo světlo. Vědecky popsáno tak, že struktura, ze kterého je metamateriál vyroben je menší, než vlnová délka záření se kterým přicházejí do styku. Struktura metamateriálu je složena ze dvou kovových destiček s otvory, oddělené dielektrikem, kdy tyto otvory musí být menší, než vlnová délka záření. Dielektrikum má tloušťku zhruba 15nm a jejich složení je založeno na oxidu india a cínu. Na kovové destičky jsou napařovány vrstvy stříbra o tloušťce cca 30 nm. Mezi těmito vrstvami se nachází další interní oddělovací vrstva hliníku, cca 35 nm. Na povrchu stříbra je ochranná vrstva hliníku, cca 10 nm. Důležitým aspektem je, aby otvory na destičkách ze stříbra (z vrchu i ze spodu) způsobila rezonanční vrchol permeability [33] [34] [35].

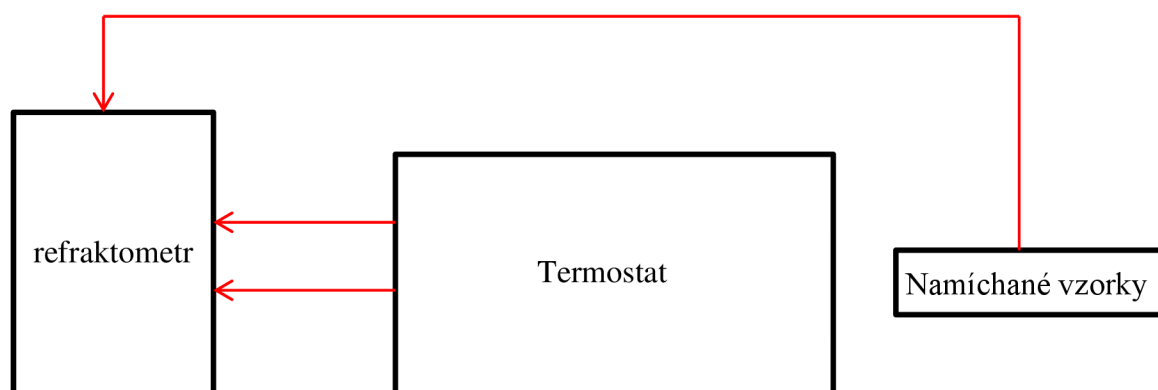
V dnešní době je cílem dosáhnout díky těmto metamateriálům neviditelnostem ve viditelném světelném záření. Hodně se o těchto materiálech diskutuje a jsou v plném proudu výzkumu, pro docílení neviditelnosti objektů. Mluví se i o neviditelném plášti, pro využití v armádě, který by např. mohl skrýt tank, letadlo. Profesor Sir John Brian Pendry tvrdí, že se tento plášť někdy vyrobí a nebude to ale z žádného lehkého materiálu, se kterým by se dalo pohybovat. Metamateriály se zabývá i univerzita v Berkeley v Kalifornii [33] [34] [35].

## 4 Experimentální část

Tato část semestrálního projektu byla zaměřena na praktické měření v laboratoři. V laboratoři byl používán Abbého refraktometr, digitální refraktometr Atago a ruční refraktometry, jako měřicí přístroje pro měření indexu lomu kapalin. Hlavním úkolem bylo se s těmito přístroji seznámit a pochopit jejich princip měření. Používány byly základní kapaliny, jako je etanol, 2 - propanol, ale i mnoho dalších kapalin pro jednotlivé průmysly. Pro kalibraci přístroje byla použita destilovaná voda.

### 4.1 Laboratorní pracoviště

Laboratorní pracoviště se skládá, tedy z Abbého refraktometru, digitálního refraktometru Atago a čtyř různých ručních refraktometrů podle zaměření na měřicí vlastnost kapaliny. Abbého refraktometr, byl použit německý refraktometr KRUSS typu AR-2. Dále byl použit termostat Medingen E5s, pro řízení teploty kapalin a pro vytvoření závislosti indexu lomu na teplotě. Tento termostat byl propojen s Abbého refraktometrem. Dále byla použita pipeta pro přesné dávkování kapalin na měřicí hranol refraktometru, váha pro přesné dávkování množství kapalin a 10 ml laboratorní kádinky na vzorky.



Obr. 4.1 Blokové schéma laboratorního pracoviště

### 4.2 Kalibrace a reprodukovatelnost měření

V první části bylo nutné refraktometr zkalibrovat a změřit reprodukovatelnost, zda opravdu měří přístroj správně. Pro měření reprodukovatelnosti byla použita obyčejná destilovaná voda, kvůli čištění refraktometru, jednoduchosti, ale taky i z ekonomického hlediska.

#### 4.2.1 Kalibrace Abbého refraktometru

V první fázi byl Abbého refraktometr očištěn od prachu a zbytků kapalin (hlavně jeho měřicí části). Destilovaná voda byla nalita do kádinky, z níž se nabíralo pomocí pipety množství cca 1 ml. Pipetou bylo aplikováno dané množství na osvětlovací hranol a byl

přítisknut měřicí a osvětlovací hranoly k sobě. Bylo nutné brát obezřetnost, aby se kapalina nevyhlila mimo měřicí hranoly. Po přitisknutí byly hranoly šroubem spojeny k sobě pro dobrou přilnavost těchto hranolů s kapalinou. Měření probíhalo za obvyklé laboratorní teploty 20 °C. Pro konstantní teplotu v laboratoři bylo využito klimatizace a klimatizační komory, kde se nacházely všechny vzorky a příslušenství pro měření. Po nanesení kapaliny na Abbého refraktometr, bylo nutné pomocí čtyřhranného šroubu v blízkosti pravého okuláru nastavit osu refraktometru tak, aby protínala hodnotu indexu lomu 1,333, která je z tabulkových hodnot známá jako destilovaná voda při 20 °C. Následně byl ze stupnice refraktometru odečten index lomu a zapsán do tabulky (viz **Tab. 4.1**).

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty indexu lomu destilované vody Abbého refraktometrem

Destilovaná voda												
n [-]	1,333	1,333	1,333	1,333	1,333	1,333	1,333	1,333	1,333	1,333	1,333	1,333

Jak je vidět hodnoty indexu lomu destilované vody vycházely, pro 12 měření úplně stejně, z čehož můžeme usoudit, že přístroj je zkalibrován a nastaven. Dále bylo zjištěno, že měření je reprodukovatelné, opět na základě shodných naměřených indexů lomů.

#### **4.2.2 Kalibrace digitálního refraktometru Atago**

Práce s digitálním refraktometrem je velice jednoduchá, efektivní a přesná. Tento typ refraktometru měří hodnotu s přesností na čtyři desetinné místa. Oproti Abbého refraktometru, který měří pouze s přesností na tři desetinná místa, se jeví tedy jako přesnější s vyšším rozlišením.

Kalibrace tohoto refraktometru nelze nijak mechanicky ovlivnit a samotný refraktometr je primárně nastaven na hodnotu destilované vody, tedy 1,3330. Jedinou kalibrací, která lze provést, je po nalití destilované vody zmáčknutím tlačítka „Zero“. Toto tlačítko zajišťuje v podstatě restartování zařízení. Měření opět probíhalo za laboratorních podmínek při 20 °C, tato podmínka je nezbytně nutná, jak pro měřicí kapalinu, tak pro refraktometr, kvůli přesnosti měření. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce (viz **Tab. 4.2**).

Tab. 4.2 Naměřené hodnoty indexu lomu destilované vody refraktometrem Atago

Destilovaná voda												
n [-]	1,3329	1,3330	1,3330	1,3330	1,3329	1,3330	1,3330	1,3329	1,3330	1,3329	1,3330	1,3330

### 4.2.3 Kalibrace ručních refraktometrů

Ruční refraktometry jsou vhodné pro orientační a rychlé měření, dále je vše popsáno v kapitole 2.5. Kalibrace probíhala obdobně jako u ostatních typů refraktometrů. Po nanesení destilované vody na měřicí hranol, bylo nutné pootočením pomocí malého šroubku na okuláru dosáhnout nulového bodu, který je na refraktometru označen jako „waterline“. Pokud protíná čára a zároveň modro – bílé rozhraní tuto hodnotu „waterline“, znamená to, že přístroj je zkalibrován (foto). Opět bylo nutné dodržet laboratorní teplotu a měřit rychle, aby nedošlo k zahřátí kapaliny vnějšími vlivy. Takto se nastavovaly všechny typy ručních refraktometrů.

### 4.3 Měření vzorků etanolu a destilované vody

Tato část práce je zaměřena na namíchání směsí dvou kapalin a to etanolu a destilované vody. Pro měření byly nachystány tyto roztoky o koncentraci 0 % až 96 %, po deseti procentech. Byl používán absolutní etylalkohol o čistotě 96,4 %, hustotě  $\rho = 0,8056 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  od firmy Penta. Pro přesnost namíchání roztoků byla využita laboratorní váha. Z toho plyne, že pro namíchání směsi etanolu s destilovanou vodou bylo využito hmotnostního poměru mezi kapalinami  $m_{H_2O}$  a  $m_E$ . Výhodou této metody je její rychlost a přesnost míchání směsí roztoků. Nutno ale říci, že metod je mnoho, ale podle přístrojů v laboratoři, se tato metoda jevila jako nejpříjemnější a nejefektivnější.

Směsi roztoků byly namíchány následujícím způsobem. Do 10 ml kádinky byla nalita destilovaná voda o daném množství tak, aby poměr etanolu a destilované vody nepřekročil množství 10 ml kádinky. Hodnoty hmotnostního množství můžeme vidět v **Tab. 4.3**. Byla vypočtena i hodnota objemového množství  $V_E$  a  $V_{H_2O}$ , ať je jasný objem dané kapaliny v kádince, kvůli používání ručních refraktometrů, které např.: při práci s měřením etanolu využívají stupnice založené na objemovém množství alkoholu. Jelikož s využitím pipety nebylo možné aplikovat do kádinky úplně přesně vypočtené hodnoty etanolu, koncentrace  $C$  [%] byla vypočítána na přesnou hodnotu.

Tab. 4.3 Naměřené a vypočtené hodnoty směsi etanolu a destilované vody:

C [-]	C [%]	$m_{H_2O}$ [g]	$m_{E\_vypoč}$ [g]	$m_{E\_změř}$ [g]	$V_E$ [cm <sup>-3</sup> ]	$V_{H_2O}$ [cm <sup>-3</sup> ]
0,0	0,000	10,186	0,0000	0,0000	0,000	10,206
0,1	9,995	6,934	0,7704	0,7700	0,956	6,948
0,2	20,007	6,433	1,6083	1,6090	1,997	6,446
0,3	30,002	6,724	2,8817	2,8820	3,577	6,737
0,4	40,017	5,729	3,8193	3,8220	4,744	5,740
0,5	50,022	4,594	4,5940	4,5980	5,708	4,603
0,6	60,064	3,883	5,8245	5,8400	7,249	3,891
0,7	70,052	2,666	6,2207	6,2360	7,741	2,671
0,8	80,037	1,948	7,7920	7,8100	9,695	1,952
0,9	90,012	0,742	6,6780	6,6870	8,301	0,743
1,0	96,400	0,000	4,3440	4,3440	5,392	0,000

### Příklad výpočtů:

$$C = 0,3$$

$$m_{H_2O} = 6,724 \text{ g}$$

$$m_{E\_vypoč} = \frac{m_{H_2O}}{\frac{(1-c)}{c}} = \frac{6,724}{\frac{(1-0,3)}{0,3}} = 2,8820 \text{ g} \quad (4.1)$$

$$m_{E\_změř} = 2,8817 \text{ g}$$

$$C = \frac{m_{E\_změř}}{m_{E\_změř} + m_{H_2O}} \cdot 100 = \frac{2,8820}{2,8820 + 6,724} \cdot 100 = 30,002 \% \quad (4.2)$$

$$V_E = \frac{m_{E\_změř}}{\rho} = \frac{2,8820}{0,8056} = 3,577 \text{ cm}^{-3} \quad (4.3)$$

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O\_změř}}{\rho} = \frac{6,724}{0,998} = 6,737 \text{ cm}^{-3} \quad (4.4)$$

Po naměření a vypočtení hodnot byl měřen index lomu Abbého stolním, digitálním refraktometrem a objemová procenta alkoholu ručním refraktometrem. Kádinky byly lehce protřepány a poté bylo zahájeno měření za laboratorní teploty 20 °C (nutno podotknout, že teplotu 20 °C měly, jak měřicí přístroje, tak i vzorky kapalin). Hodnoty indexu lomu při daných koncentracích lze vidět v **Tab. 4.4**. Následně byl vytvořen graf závislosti indexu lomu na koncentraci směsi, viz **Obr. 4.3**. Na tomto obrázku si můžeme všimnout, že index lomu se v daném místě začne zmenšovat a dochází tak k zakřivení a vzniku extrémů. Tvary křivek závisí na dvou důležitých faktorech. Jedním z těchto faktorů je povaha roztoků, kde závisí na povaze jednotlivých složek tvořící danou směs. Dalším faktorem, je způsob vyjádření koncentrace, který ve velké míře ovlivňuje velikost zakřivení (odchylka od

aditivity) a někdy může ovlivnit i tvar vypuklosti (znaménko). Výskyty extrémů na křivkách indexu lomu u binárních směsí nezávisí na tom, jak je složení vyjádřeno, jestli v objemových, hmotnostních nebo molárních zlomcích, ale na procesech probíhající při rozpouštění (změna objemu, vzájemná interakce komponent) a vzájemným číselným vztahem hodnot indexu lomu jednotlivých komponent [39].

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty indexu lomu pro různé koncentrace etanolu a destilované vody:

C <sub>etanol</sub> [%]	C <sub>objem_vypoč</sub> [%]	C <sub>Ruční ref.</sub> [%]	n [-]	
			Abbého ref.	Digitální ref.
0	0,000	0,0	1,3330	1,3329
10	12,093	12,0	1,3390	1,3391
20	23,655	24,0	1,3460	1,3460
30	34,682	35,0	1,3520	1,3524
40	45,249	46,0	1,3570	1,3571
50	55,355	56,0	1,3610	1,3603
60	65,074	66,5	1,3630	1,3625
70	74,344	76,0	1,3640	1,3649
80	83,240	84,3	1,3650	1,3661
90	91,779	-	1,3640	1,3629
96,4	96,400	-	1,3630	1,3618

Pro srovnání hodnot výrobce, který udává index lomu etanolu  $n = 1,36$  při pokojové teplotě 20 °C [38], byla spočítána relativní chyba. Abbého refraktometrem byl index lomu etanolu změřen  $n = 1,363$ . Digitální refraktometr naměřil hodnotu  $n = 1,3618$ . Ze vztahu (4.5) vyplývá chyba  $\delta_{E\_Abbé} = 0,220$  %. Relativní chyba digitálního refraktometru Atago je  $\delta_{E\_digitální} = 0,132$  %.

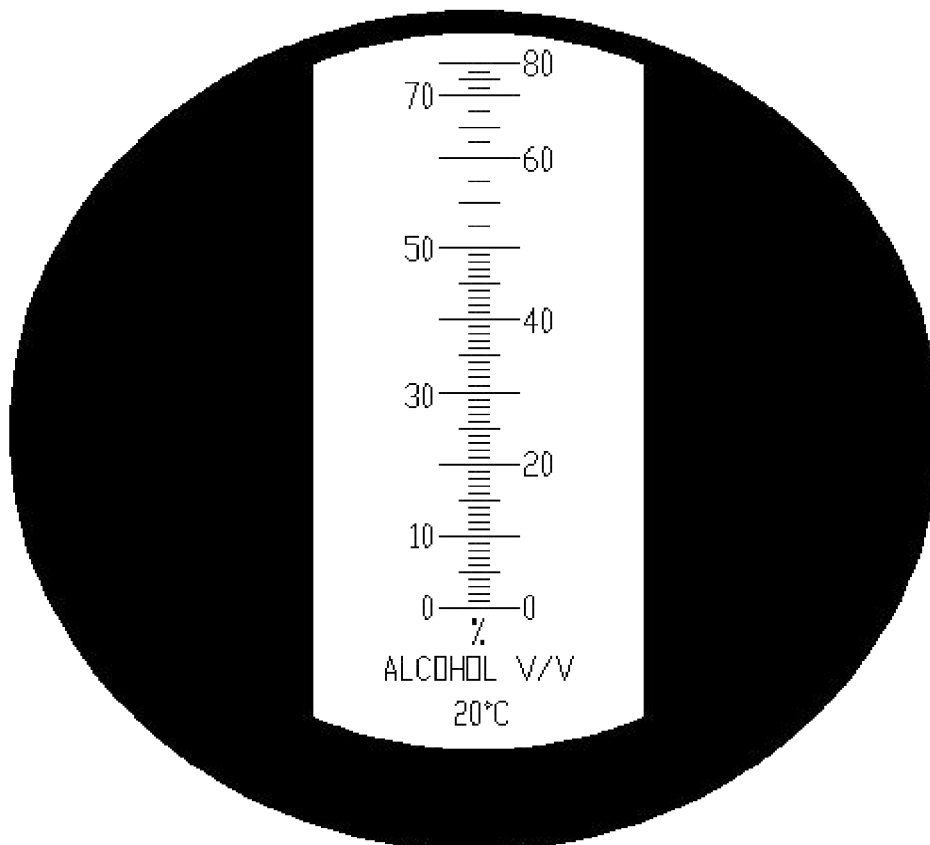
$$\delta_{E\_Abbé} = \left| \frac{n_{měř} - n_{katalog}}{n_{měř}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{1,363 - 1,360}{1,363} \right| \cdot 100 = 0,220 \% \quad (4.5)$$

$$\delta_{E\_digitální} = \left| \frac{n_{měř} - n_{katalog}}{n_{měř}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{1,3618 - 1,360}{1,3618} \right| \cdot 100 = 0,132 \% \quad (4.6)$$

Jak lze vidět, relativní chyba pro čistý etanol byla menší u digitálního refraktometru Atago a lze jej brát jako přesnější zařízení pro měření indexu lomu. Hodnoty změřené ručním refraktometrem, který měří objemová procenta alkoholu (viz Obr. 4.2), se mírně liší od vypočtených hodnot. Nutno podotknout, že ruční refraktometr měří pouze v rozsahu od 0 % až 80 % alkoholu s přesností  $\pm 1$  %. Výsledkem bylo zjištěno, že ruční refraktometr je vhodný pro orientační měření neznámých binárních směsí založených na etanolových koncentracích. Bylo vyzkoušeno měření i na zakoupených láhvích s alkoholem. Testovali jsme tzv. Ruský standard, a neznámý vzorek (slivovice). Naměřené hodnoty můžete vidět v **Tab. 4.5**.

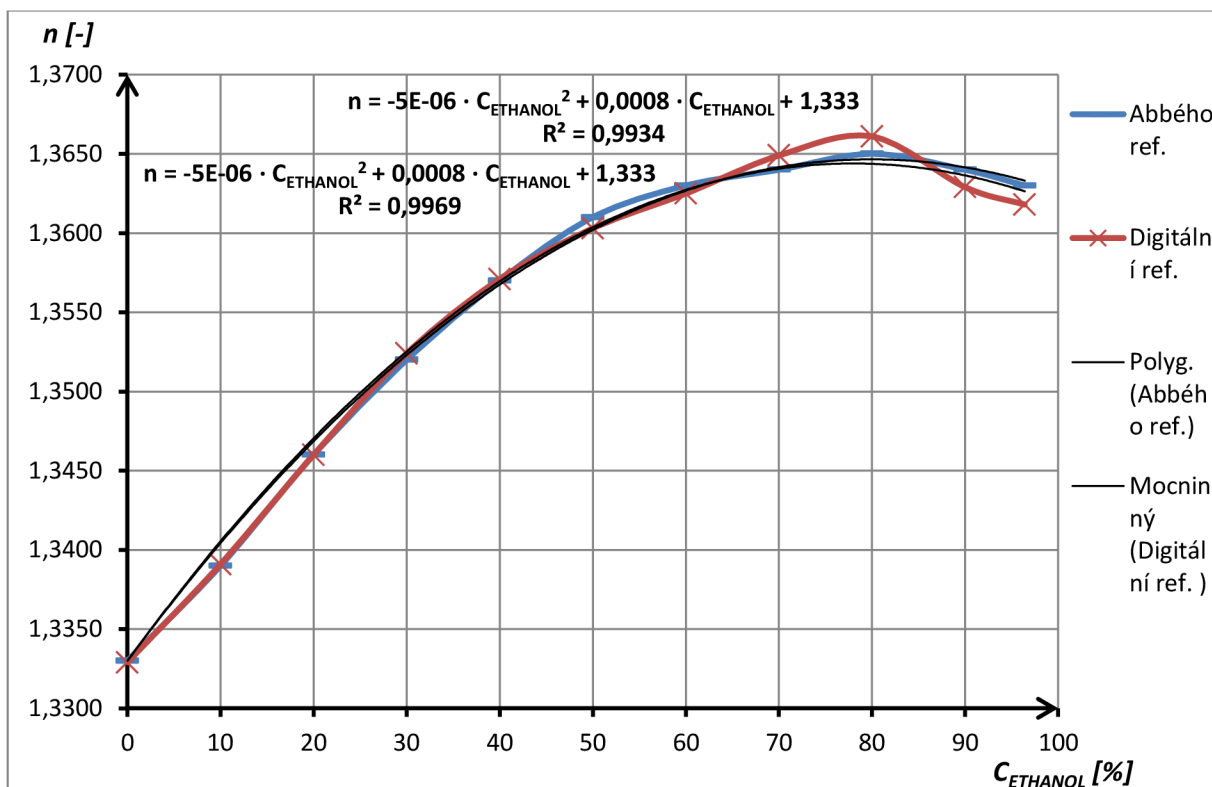
Tab. 4.5 Naměřené hodnoty zakoupených vzorků alkoholu:

Vzorek	n [-]		
	Digitální refraktometr	Stolní refraktometr	Ruční refraktometr
Ruský standard - 40 % alk.	1,3546	1,355	40,2
Neznámý vzorek	1,3612	1,361	63,0



Obr. 4.2 Měřicí stupnice ručního refraktometru pro měření alkoholu





Obr. 4.3 Závislost indexu lomu směsi etanol / voda na koncentraci měřený Abbého a digitálním refraktometrem

Úkolem bylo zjistit přepočítání a vztah mezi indexem lomu a jednotlivými stupnicemi. V této závislosti můžeme hodnotu indexu lomu přepočítat na hmotnostní procenta alkoholu. Přepočítání bylo provedeno empiricky z naměřených hodnot pomocí polynomické rovnice druhého řádu, pro oba typy refraktometru. Následně byl vybrán digitální refraktometr jako přesnější, protože měří na 4 desetinné místa. Z toho plyne přepočítání rovnice:

Příklad výpočtu indexu lomu pro 40 % (hmotnostní) etanol:

$$n = -5 \cdot 10^{-6} \cdot C_{ETANOL}^2 + 0,0008 \cdot C_{ETANOL} + 1,333 = \quad (4.7)$$

$$n = -5 \cdot 10^{-6} \cdot 40^2 + 0,0008 \cdot 40 + 1,333 =$$

$$n = 1,357$$

Z těchto výpočtů lze sestavit tabulku s přepočty indexu lomu na stupně alkoholu, až na několik desetinných míst se spolehlivostí  $R^2 = 0,9934$ .

#### 4.4 Měření vzorků propanolu a destilované vody

V této experimentální části byla používána kapalina propanolu smíchanou s destilovanou vodou, o koncentracích od 0 % až 99,5 %, po deseti procentech. Používaný 2 - propanol má čistotu  $\geq 99,5$  % a hustotu  $\rho = 0,785 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Míchání směsí probíhalo obdobně jako v kapitole 4.3. Příklady výpočtu pro Tab. 4.6 nebyly uvedeny, protože jsou stejné jako v minulé kapitole 4.3.

Tab. 4.6 Naměřené a vypočtené hodnoty směsi 2 - propanolu a destilované vody:

C [-]	C [%]	m <sub>H<sub>2</sub>O</sub> [g]	m <sub>p_vypoč</sub> [g]	m <sub>p_změř</sub> [g]	V <sub>p</sub> [cm <sup>-3</sup> ]	V <sub>H<sub>2</sub>O</sub> [cm <sup>-3</sup> ]
0,0	0,000	9,266	0,000	0,000	0,000	9,285
0,1	10,304	8,731	0,970	1,003	1,278	8,748
0,2	20,013	7,290	1,823	1,824	2,324	7,305
0,3	30,041	6,735	2,886	2,892	3,684	6,748
0,4	40,078	5,191	3,461	3,472	4,423	5,201
0,5	50,047	4,763	4,763	4,772	6,079	4,773
0,6	60,045	3,741	5,612	5,622	7,162	3,748
0,7	70,021	2,759	6,438	6,444	8,209	2,765
0,8	80,000	1,561	6,244	6,244	7,954	1,564
0,9	90,020	0,830	7,470	7,487	9,538	0,832
1,0	99,500	0,000	4,344	4,344	5,534	0,000

Refraktometry byly před měřením zkalibrovány a ověřeny na destilované vodě, zda měří správně. Po naměření a vypočtení hodnot směsí, byl měřen index lomu. Kádinky byly opět lehce protřepány a poté bylo zahájeno měření za laboratorních podmínek, jako v předchozí kapitole 4.3. Hodnoty indexu lomu, byly opět změřeny stolním a digitálním refraktometrem. Změřené hodnoty daných koncentrací lze vidět v **Tab. 4.7**. Následně byl vytvořen graf závislosti indexu lomu na koncentraci směsi, viz **Obr. 4.4**.

Tab. 4.7 Naměřené hodnoty indexu lomu pro různé koncentrace 2 - propanolu a destilované vody:

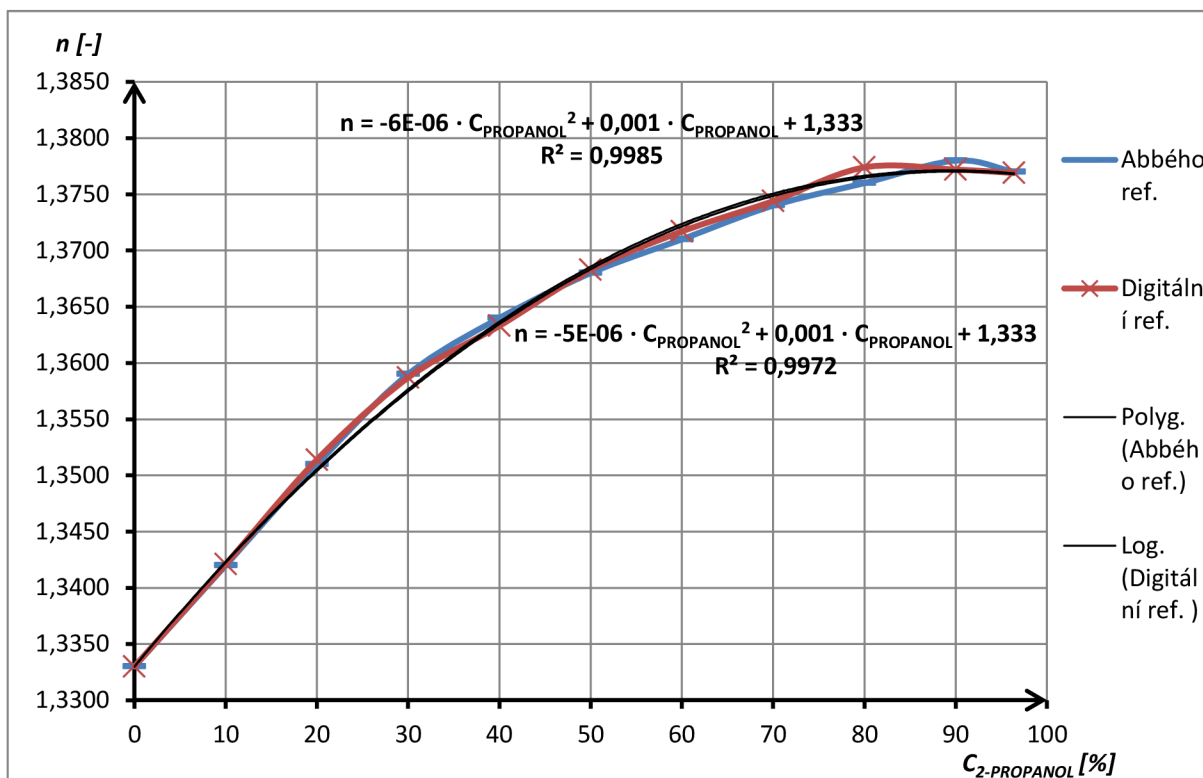
C [%]	n [-]	
	Abbého refraktometr	Digitální refraktometr
0	1,3330	1,3330
10	1,3420	1,3421
20	1,3510	1,3514
30	1,3590	1,3587
40	1,3640	1,3633
50	1,3680	1,3683
60	1,3710	1,3717
70	1,3740	1,3744
80	1,3760	1,3774
90	1,3780	1,3772
96,4	1,3770	1,3769

Opět pro srovnání hodnot s výrobcem, který udává na etiketě čistého 2 – propanolu (99,5 %) index lomu  $n = 1,377$ , při teplotě 20 °C, byla spočítána relativní chyba. Abbého refraktometrem byl index lomu propanolu změřen  $n = 1,377$ . Ze vztahu (4.5) vyplývá

chyba  $\delta_p = 0 \%$ . Digitální refraktometr naměřil hodnotu indexu lomu  $n = 1,3769$ , z čehož plyne relativní chyba  $\delta_p = 0,007 \%$ .

$$\delta_{P\_abbé} = \left| \frac{n_{měř} - n_{katalog}}{n_{měř}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{1,377 - 1,377}{1,377} \right| \cdot 100 = 0 \%$$
 (4.5)

$$\delta_{P\_digi} = \left| \frac{n_{měř} - n_{katalog}}{n_{měř}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{1,3769 - 1,377}{1,3769} \right| \cdot 100 = 0,007 \%$$



Obr. 4.4 Závislost indexu lomu směsi 2 - propanol / voda na koncentraci měřený Abbého a digitálním refraktometrem

Jak lze vidět na tomto grafu, hodnoty změřené Abbého refraktometrem a digitálním refraktometrem byly velice podobné, z čehož vyplývá, že měřený vzorek odpovídá teoretickým předpokladům, zjištěných z ověřených zdrojů. I zde můžeme provést přepočet pomocí vygenerované polynomicke rovnice se spolehlivostí dat  $R^2 = 0,9985$ :

Příklad výpočtu indexu lomu pro 30 % (hmotnostní) 2 - propanol:

$$\begin{aligned} n &= -5 \cdot 10^{-6} \cdot C_{PROPANOL}^2 + 0,001 \cdot C_{PROPANOL} + 1,333 = \\ n &= -5 \cdot 10^{-6} \cdot 30^2 + 0,001 \cdot 30 + 1,333 = \\ n &= 1,3585 \end{aligned}$$
 (4.8)

#### 4.5 Měření teplotní závislosti etanolu pro různé koncentrace

V další experimentální části bylo zaměřeno na kapalinu etanol o různých koncentracích. Byly použity vzorky z minulé části experimentu a změřen index lomu

v závislosti na teplotě, s využitím stolního Abbého refraktometru, protože jako jediný má možnost měřit danou závislost.

U tohoto měření byl použit termostat Medingen E5s, z toho vyplývá, že byl měřen index lomu v závislosti na teplotě. Na Abbého refraktometr byl připojen pomocí hadic termostat. V hadicích (termostatu) proudila destilovaná voda, která cirkulovala v měřících hranolech a ohřívala tak kapalinu. Při měření byla kapalina pomocí pipety nanesena na měřící hranol a změřen její index lomu. Poté byl zapnut termostat, aktivovalo se tak automaticky čerpadlo pro cirkulaci vody. Nastavovány byly hodnoty od cca 23 °C do 70 °C po deseti stupních. Jakmile byla na termostatu teplota nastavena, počkalo se, než se kolující kapalina (destilovaná voda) v termostatu a průtokových hadicích ohřála na požadovanou teplotu. Po dosažení teploty destilované vody, která byla zpozorována na displeji termostatu, bylo nutné vyčkat 10 minut, než se nám teplota proudící kapaliny ustálila, proběhla celým systémem a ohřála měřící kapalinu. Poté byl změřen index lomu a následovalo zvýšení teploty na termostatu opět o 10 °C. Jakmile byla kapalina změřena v celém teplotním rozsahu, byl vypnut termostat a následovalo vylití proudící kapaliny z termostatu. Teplota kapaliny se pohybovala okolo 70 °C, proto bylo nutné brát obezřetnost na bezpečnost. Po odebrání vody z termostatu se zpět do něj přelila čerstvá destilovaná voda o teplotě přibližně 20 °C. Celý tento proces, sloužil pro urychlení měření a zamezilo se čekání na ochlazení proudící kapaliny. Po tomto procesu následovalo zapnutí termostatu, zapsání počáteční teploty kapaliny a zahájilo se měření. Změřené hodnoty můžeme vidět ve sledu, viz **Tab. 4.8**.

Tab. 4.8 Tabulky naměřených teplotních závislostí etanolu pro různé koncentrace:

**Destilovaná voda**

$\vartheta$ [°C]	25,9	30,0	40,1	50,1	60,0	69,9
n [-]	1,3330	1,3325	1,3310	1,3295	1,3280	1,3260

**Etanol 10%**

$\vartheta$ [°C]	27,4	30,0	40,1	50,1	60,1	70,1
n [-]	1,3380	1,3380	1,3365	1,3350	1,3330	1,3310

**Etanol 20%**

$\vartheta$ [°C]	28,2	30,1	40,1	50,1	60,2	69,9
n [-]	1,3450	1,3445	1,3420	1,3400	1,3380	1,3350

**Etanol 30%**

$\vartheta$ [°C]	26,2	30,2	40,1	50,1	59,9	70,0
n [-]	1,3510	1,3500	1,3480	1,3450	1,3425	1,3390

**Etanol 40%**

$\vartheta$ [°C]	23,7	30,1	40,0	50,0	60,0	70,0
n [-]	1,3560	1,3550	1,3520	1,3485	1,3450	1,3410

**Etanol 50%**

$\vartheta$ [°C]	23,9	30,0	40,1	50,1	60,1	69,9
n [-]	1,3590	1,3570	1,3540	1,3500	1,3470	1,3420

**Etanol 60%**

$\vartheta$ [°C]	26,2	30,2	40,1	49,9	59,9	70,0
n [-]	1,3610	1,3595	1,3560	1,3520	1,3480	1,3440

**Etanol 70%**

$\vartheta$ [°C]	25,2	30,1	40,1	50,1	60,0	70,2
n [-]	1,3625	1,3610	1,3570	1,3530	1,3490	1,3450

**Etanol 80%**

$\vartheta$ [°C]	25,6	30,0	40,1	50,1	60,0	70,1
n [-]	1,3615	1,3610	1,3570	1,3535	1,3490	1,3450

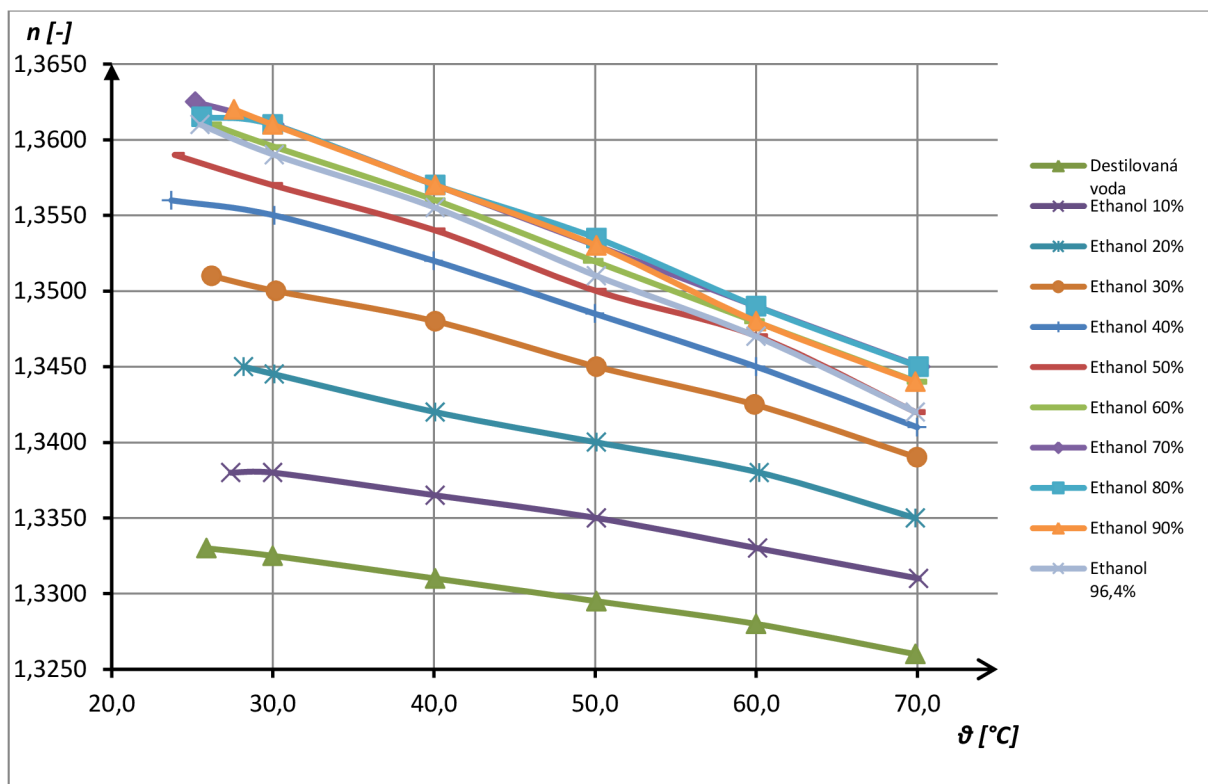
**Etanol 90%**

$\vartheta$ [°C]	27,6	30,0	40,1	50,1	60,0	69,9
n [-]	1,3620	1,3610	1,3570	1,3530	1,3480	1,3440

**Etanol 96,4%**

$\vartheta$ [°C]	25,5	30,1	40,1	50,1	60,0	69,9
n [-]	1,3610	1,3590	1,3555	1,3510	1,3470	1,3420

Jak je známo a lze vidět ve sledu tabulek výše, index lomu s rostoucí teplotou klesal. Jako důvod lze říci, že při zahřívání kapaliny dochází k jejímu zvětšení objemu, tím i zvětšení mezer mezi molekulami směsi a světlo prochází měřenou kapalinou rychleji. Z toho plyne, že teplotní koeficient indexu lomu je úměrný teplotnímu koeficientu hustoty [39]. Pro lepší zorientování v charakteristikách byl vytvořen graf, který lze vidět na **Obr. 4.5**.



Obr. 4.5 Teplotní závislost indexu lomu etanolu pro různé koncentrace

#### 4.6 Měření teplotní závislosti 2 - propanolu pro různé koncentrace

Měření teplotní závislosti 2 – propanolu neboli taky isopropanolu probíhalo obdobně jako při měření etanolu. Používal se opět Abbého refraktometr a termostat s příslušenstvím, s tím že nastavení termostatu a postup měření proběhl stejně jako v kapitole 4.5. Pouze naměřené výsledky se lišily v hodnotách indexu lomu kapaliny. Laboratorní podmínky byly opět udržovány po celou dobu měření a teplotní rozsah zůstal nezměněn. Výsledky lze vidět v **Tab. 4.9**.

Tab. 4.9 Tabulky naměřených teplotních závislostí 2 - propanolu pro různé koncentrace:

<b>2 - Propanol 10%</b>						
θ [°C]	24,1	30,0	40,1	50,1	60,1	70,1
n [-]	1,3420	1,3410	1,3390	1,3370	1,3340	1,3300

<b>2 - Propanol 20%</b>						
θ [°C]	28,2	30,2	40,0	50,1	60,1	69,9
n [-]	1,3510	1,3490	1,3470	1,3440	1,3390	1,3330

<b>2 - Propanol 30%</b>						
θ [°C]	25,1	30,1	40,1	49,9	59,9	70,0
n [-]	1,3570	1,3560	1,3520	1,3470	1,3420	1,3360

**2 - Propanol 40%**

$\vartheta$ [°C]	25,2	30,1	40,0	50,0	60,1	70,0
n [-]	1,3620	1,3610	1,3580	1,3540	1,3510	1,3470

**2 - Propanol 50%**

$\vartheta$ [°C]	26,6	30,0	40,1	50,1	60,1	69,9
n [-]	1,3660	1,3650	1,3615	1,3580	1,3540	1,3500

**2 - Propanol 60%**

$\vartheta$ [°C]	25,8	30,1	40,1	50,1	59,9	70,0
n [-]	1,3690	1,3680	1,3640	1,3600	1,3560	1,3520

**2 - Propanol 70%**

$\vartheta$ [°C]	25,1	30,1	40,1	50,1	60,0	70,2
n [-]	1,3720	1,3700	1,3660	1,3620	1,3580	1,3540

**2 - Propanol 80%**

$\vartheta$ [°C]	23,1	30,0	39,9	50,1	60,0	70,1
n [-]	1,3750	1,3720	1,3680	1,3630	1,3590	1,3540

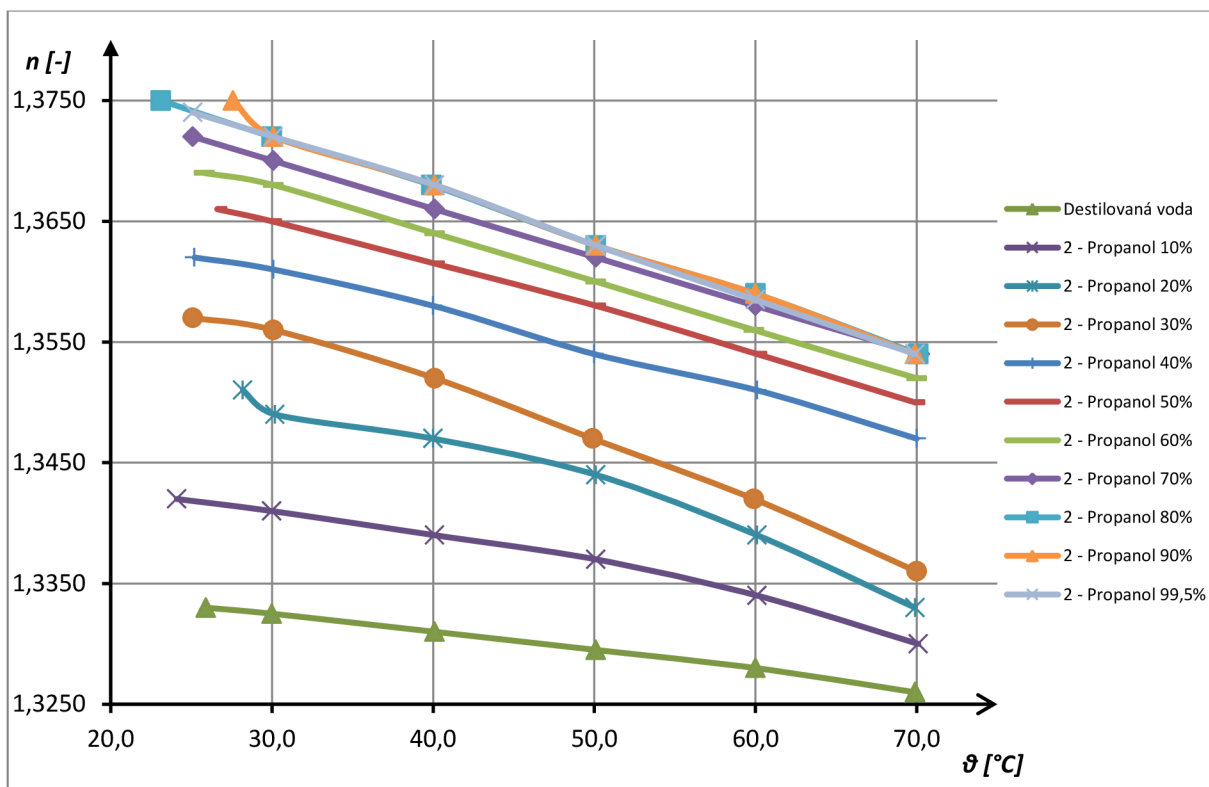
**2 - Propanol 90%**

$\vartheta$ [°C]	27,6	30,1	40,1	50,1	60,0	69,9
n [-]	1,3750	1,3720	1,3680	1,3630	1,3590	1,3540

**2 - Propanol 99,5%**

$\vartheta$ [°C]	25,1	30,1	40,1	50,1	60,0	69,9
n [-]	1,3740	1,3720	1,3680	1,3630	1,3585	1,3540

I v tomto případě lze vidět, že index lomu opět klesá s rostoucí teplotou, kdy důvod je stejný jako v kapitole 4.5. Z těchto měření plyne, že index lomu kapalin s rostoucí teplotou vždy klesá, z důvodu změny hustoty a vazeb mezi složkami. Pro lepší přehlednost charakteristik byl vytvořen graf, který je na **Obr. 4.6**.



Obr. 4.6 Teplotní závislost indexu lomu 2 - propanolu pro různé koncentrace

#### 4.7 Měření teplotní závislosti teplotnosných kapalin

První měřená kapalina s názvem Solarten super je teplotnosná kapalina do solárních kolektorů od firmy Zevar s.r.o. Jednou ze základních složek této kapaliny je PROPAN – 1,2 – DIOL s koncentrací 49 %. Ostatní použité látky při výrobě jsou stabilizátory a inhibitory koroze. Tyto látky se starají o nestárnutí kapaliny. Její bod tuhnutí je  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , má žlutou barvu a je lehce viskózní kapalinou. Výrobce udává hodnotu indexu lomu při teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  od 1,380 do 1,384 [36] [37].

U tohoto měření byl použit termostat Medingen E5s, z toho vyplývá, že byl měřen index lomu v závislosti na teplotě. Měření probíhalo stejně, jako u směsí s etanolem a 2 – propanolem viz Kapitola 4.5. Naměřené hodnoty indexu lomu v závislosti na teplotě byly zaznamenány v **Tab. 4.10**.

Tab. 4.10 Naměřené hodnoty indexu lomu kapaliny Solarten Super v teplotní závislosti:

θ [°C]	20,1	25,9	30,4	40,1	50,1	60,0	70,0
n [-]	1,382	1,381	1,379	1,377	1,374	1,372	1,369

Z těchto naměřených hodnot indexu lomu si můžeme všimnout, že při zvyšování teploty, index lomu kapaliny Solarten super klesá.

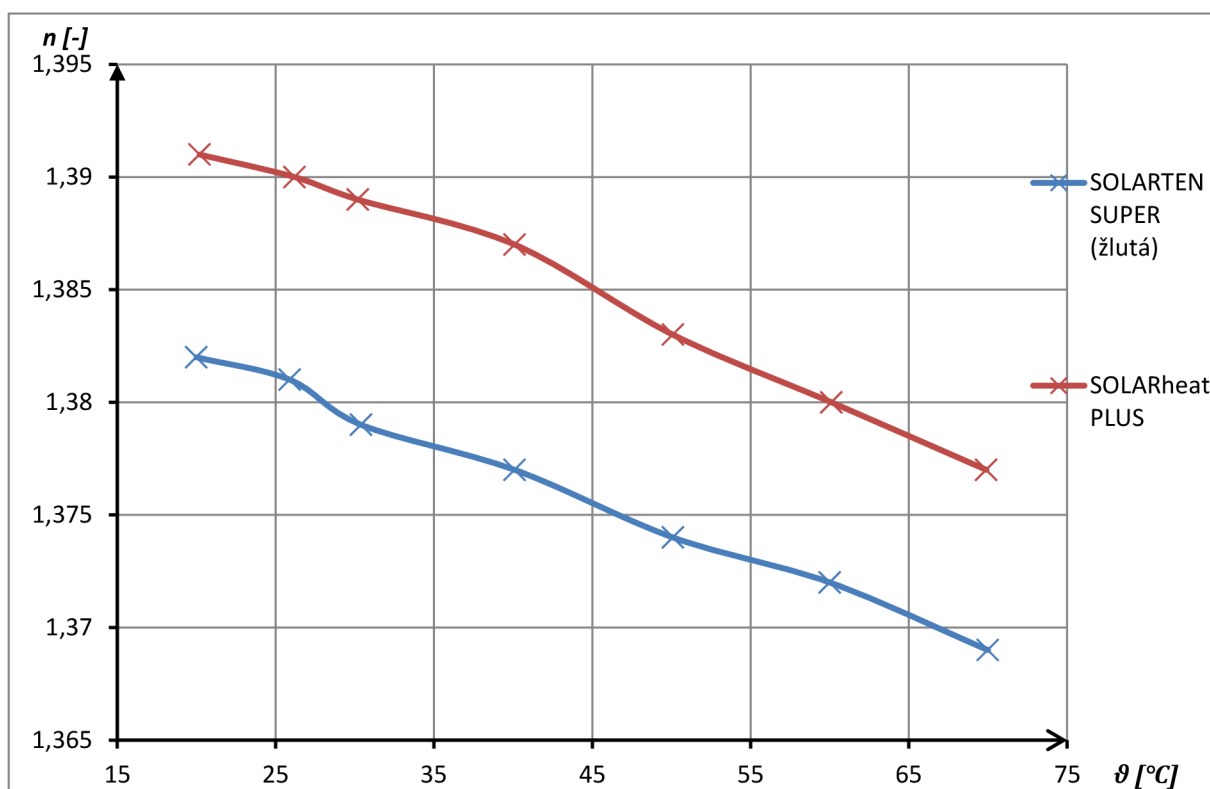


Další měřenou teplonosnou kapalinou je SolarHeat plus od firmy Zevar s.r.o. Jedná se o teplonosnou antikorozi kapalinu na bázi monopropylenglykolu (1,2 propandiolu) s nízkým bodem tuhnutí. Používá se v solárních kolektorech včetně vakuových trubicových, s teplotou tuhnutí  $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$  a s pracovní teplotou do  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$  (krátkodobě je možnost přehřátí až na  $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Index lomu z katalogových hodnot byl při  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  stanoven od 1,387 až 1,490. Kapalina je lehce viskózní a má fialovou barvu [40]. Měření probíhalo za stejných podmínek jako u kapaliny Solarten Super. Hodnoty byly zaznamenány do **Tab. 4.11**.

Tab. 4.11 Naměřené hodnoty indexu lomu kapaliny SolarHeat Plus v teplotní závislosti:

$\vartheta\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	20,0	26,2	30,2	40,1	50,1	60,1	69,9
$n\text{ [-]}$	1,391	1,390	1,389	1,387	1,383	1,380	1,377

Z **Tab. 4.10** a **Tab. 4.11**, byl následně vytvořen graf **Obr. 4.7** (pro obě změřené teplonosné kapaliny), ze kterého můžeme vidět pokles hodnoty indexu lomu. Pokles jak lze vidět je téměř lineární.



Obr. 4.7 Graf závislosti indexu lomu na teplotě pro teplonosné kapaliny

Pro určení přesnosti měření, byla pro jednotlivé kapaliny vypočítána relativní chyba. Hodnota indexu lomu teplonosné kapaliny Solarten Super při  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  výrobce udává od 1,380 do 1,384. Pro druhou kapalinu SolarHeat Plus při  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  index lomu z katalogu

odpovídá 1,387 až 1,490. Tyto hodnoty pokud porovnáme, tak ze vztahu (4.5) vychází relativní chyba Solarthen Super,  $\delta_{S\_super} = 0,145 \%$ . U SolarHeat Plus relativní chybu nemá smysl měřit kvůli velké toleranci hodnoty indexu lomu a můžeme jen říct, že naše změřená hodnota  $n = 1,3905$  je v intervalu hodnot 1,387 až 1,490 při 20 °C.

$$\delta_{S\_super} = \left| \frac{n_{m\acute{e}r} - n_{katalog}}{n_{m\acute{e}r}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{1,382 - 1,380}{1,382} \right| \cdot 100 = 0,145 \% \quad (4.5)$$

#### 4.8 Měření roztoků AdBlue

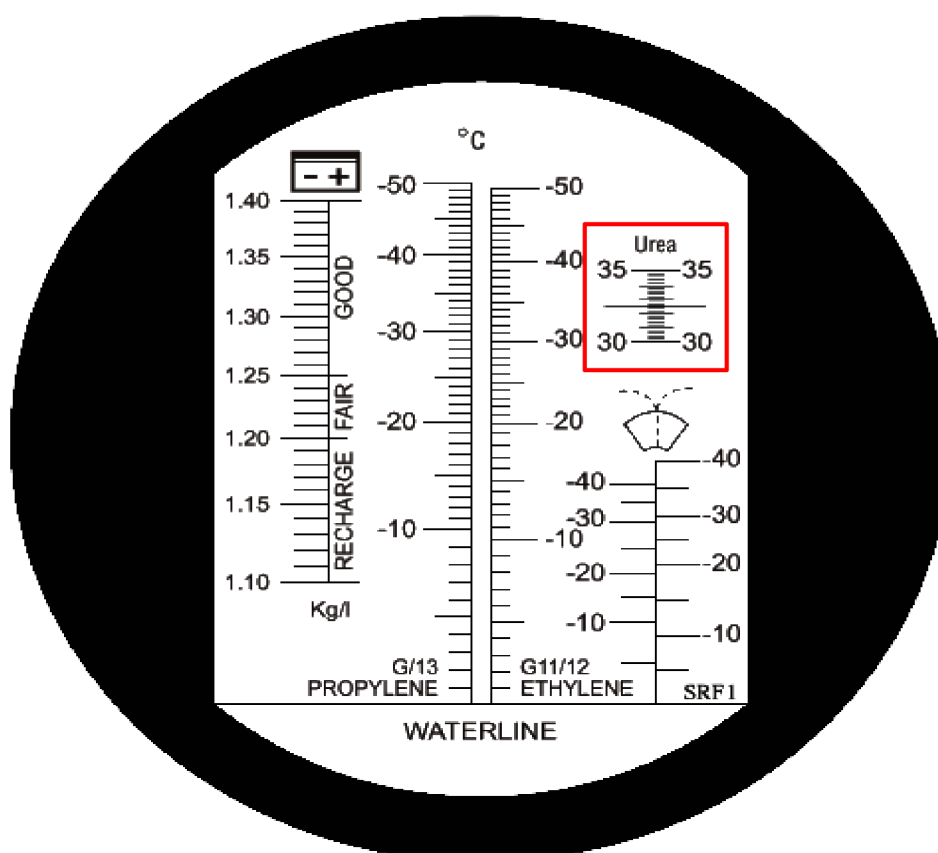
AdBlue je kapalina, která slouží jako přídavné aditivum pro naftové motory, ale ne přímo se míchá s naftou. Je to extrémně čistá kapalina, která skládá především z demineralizované vody a močoviny. Slouží především pro snížení emisních výfukových plynů NO<sub>x</sub> a tím vyhovět emisním standardům Euro 4, Euro 5, Euro 6. Přesněji a odborněji řečeno složí jako selektivní katalytická redukce vznětových motorů. Její přesné složení je 32,5 % močoviny a 67,5 vody = AUS 32 - Aqueous Urea Solution. AdBlue funguje jako chemická reakce. Reakce dochází, když se AdBlue dostane do výfukových plynů v katalyzátoru naftového motoru, kde se začne produkovat amoniak, který transformuje veškeré škodlivé látky NO<sub>x</sub> na neškodný dusík a vodní páru. Podmínkou pro vznik reakce je dostatečná teplota výfukových plynů a katalyzátoru. Využití tohoto aditiva je v dnešní době velice žádoucí a dostává se i do moderních nových automobilů. Taky velkou výhodou je snížení spotřeby paliva o 2 %, ale nutnou podmínkou je vybavení motorizace s technologií SCR (Selektivní Catalysis Reduction). AdBlue není škodlivá látka, je netoxický a bez škodlivých účinků na životní prostředí. Zajímavostí je u vznětových motorů diagnostický systém OBD, který při nepoužití této kapaliny značně omezí výkon motoru, do doby naplnění nádrže AdBlue. Dostupnost této kapaliny je v dnešní době široká a lze ji zakoupit na téměř každé čerpací stanici a to ve formě čerpací pumpy nebo v barelech o různých velikostech [41].

Při měření byly použity dva vzorky kapalin. Jeden vzorek je firmy Duslo a.s. z města Šaľa ze slovenské republiky. Druhý vzorek je neznámý, který byl načerpán na čerpací stanici OMV. Doporučená skladovatelnost této kapaliny je od -10 °C do 30 °C po maximální dobu 18 měsíců. Měření probíhalo za teploty 20 °C s využitím ručního, digitálního a stolního Abbého refraktometru. Výsledky měření jsou zaznamenány v **Tab. 4.12.**

Tab. 4.12 Naměřené hodnoty kapaliny AdBlue:

Vzorek	n [-]		
	Digitální refraktometr	Stolní Abbého refraktometr	Ruční refraktometr
Duslo a.s.	1,3817	1,381	31,6
OMV	1,3819	1,381	32,0

Hodnoty v tabulce pro stolní a digitální refraktometr jsou stejné nebo velice podobné, jen s malou odchylkou u digitálního refraktometru Atago. Ruční refraktometr používaný pro automobilový průmysl má svou vlastní stupnici přímo zaměřenou pro kapalinu AdBlue (viz Obr. 4.8). Je zde zvýrazněná ryska pro předepsanou hodnotu 32,5 % obsahu močoviny. Při měření této hodnoty nebylo dosaženo, což může mít za následek, že ruční refraktometr slouží pouze jako orientační přístroj s malou přesností. Hodnotu indexu lomu udává i výrobce při 20 °C v rozmezí 1,3814 -1,3843, což odpovídá normě ISO 22241-2 Annex C [42]. V tomto rozmezí se se změřené hodnoty nachází (byl brán v potaz digitální refraktometr Atago, který měří s přesností na čtyři desetinné místa). Přepočty na hodnotu AdBlue nemají v našem případě význam, protože předepsaná hodnota je pouze jeden interval, ve kterém se nacházíme.



Obr. 4.8 Stupnice refraktometru pro automobilový průmysl - zvýrazněné AdBlue

#### 4.9 Měření cukernatých vzorků s využitím stupnice Brix

Stupnice Brix (symbolicky značeno °Bx) slouží jako měření hmotnostního procenta cukru ve vodě. Brix má velké využití v potravinářském průmyslu pro měření množství cukru v ovoci, zelenině, džusech, vínu, nealkoholických nápojů atp. Zajímavostí je využití ve Velké Británii, kde se využívá stupnice Brix pro měření v pivovarnickém průmyslu. V Evropě se využívají jiné stupnice. Jeden dílek stupnice Brix odpovídá cca 1 – 2 % cukru z celkové hmotnosti, z čehož obecně vyplývá vnímaná sladkost produktu. Nutno říci, že

stupnice Brix (viz Obr. 4.9) není jediná, která měří hmotnostní procenta cukru ve vodě. Dále jsou hojně využívány stupnice např. Baling, Plato, Babo, Oeschle, Baumé atp [43].

V našem měření byly používány zorky pro měření cukernatosti ovocné produkty jako: jablko, citron a pomeranč od různých dodavatelů v ČR. Při měření byl používán ruční refraktometr, digitální Atago a stolní Abbého refraktometr. Změřené hodnoty byly uvedeny do **Tab. 4.13**.

Tab. 4.13 Naměřené hodnoty ovocných šťáv:

Vzorek	n [-]		
	Digitální refraktometr	Stolní refraktometr	Ruční refraktometr [°Bx]
<b>Jablko – domácí skladované</b>	1,3543	1,355	14,0
<b>Jablko – Jonagold Kaufland</b>	1,3514	1,352	12,0
<b>Jablko – domácí zimní</b>	1,3548	1,355	14,5
<b>Jablko – Red Jonaprince Kaufland</b>	1,3485	1,349	10,0
<b>Citron1</b>	1,3469	1,348	9,0
<b>Pomeranč - Kaufland</b>	1,3502	1,351	12,5
<b>Pomeranč - Lidl</b>	1,352	1,352	13,0

V této tabulce se nachází změřené hodnoty jednotlivých vzorků ovocných šťáv od různých dodavatelů v ČR. Z tohoto měření můžeme vyhodnotit kvalitu ovoce a vytvořit si osobní obrázek na české obchodní firmy. Taky musíme brát v potaz cena / kvalita, zda opravdu stojí velkovýrobci například v lihovarnickém průmyslu nakupovat ovoce nebo si z co největšího množství vyprodukovat pokrytí z vlastních zdrojů. Přepočet na hodnotu stupnice Brix [°Bx] byl převzat. Empirický vztah nebylo možné převzít z našich změřených hodnot, kvůli malému množství změřených dat v malém intervalu.

Zde můžete vidět následující vztah pro přepočet indexu lomu na stupnici Brix [°Bx] [45]:

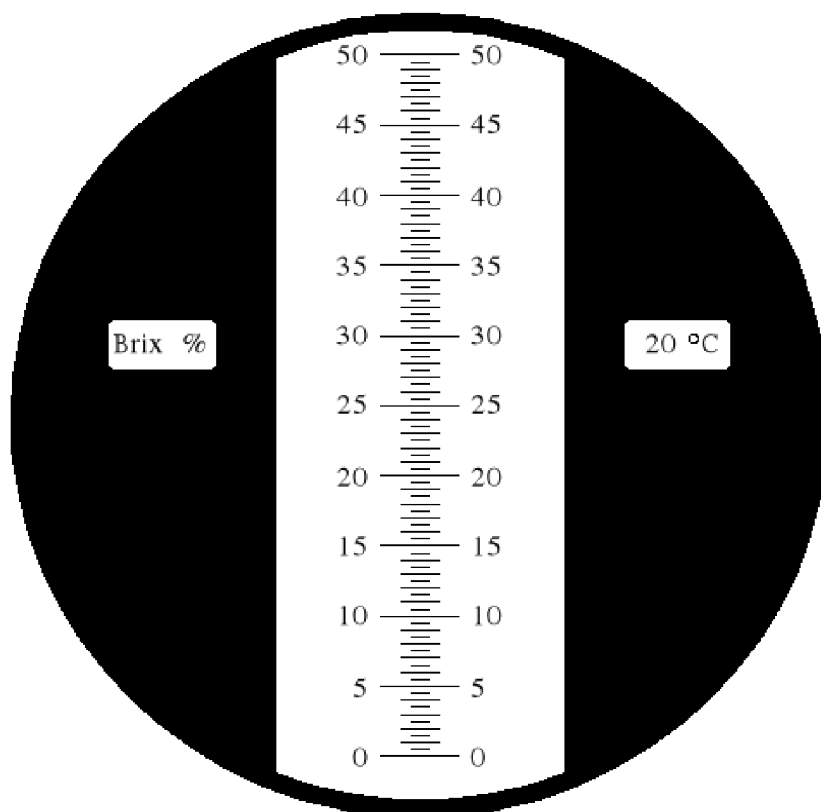
Příklad výpočtu hodnoty cukernatosti Brix z indexu lomu pro Jablko - domácí zimní [45]:

$$Bx = \left( \left( \left( \left( \left( \left( 11758,74 \cdot nD - 88885,21 \right) \cdot nD + 270177,93 \right) \cdot nD - 413145,80 \right) \cdot nD + 318417,95 \right) \cdot nD - 99127,4536 \right) =$$

$$Bx = \left( \left( \left( \left( \left( \left( 11758,74 \cdot 1,3548 - 88885,21 \right) \cdot 1,3548 + 270177,93 \right) \cdot 1,3548 - 413145,80 \right) \cdot 1,3548 + 318417,95 \right) \cdot 1,3548 - 99127,4536 \right) =$$

$$Bx = 14,431^{\circ}Bx$$

Jak lze vidět z výpočtu, hodnota indexu lomu pro vzorek Jablko – domácí zimní, mělo změřený index lomu pomocí digitálního refraktometru  $n = 1,3548$ . Po dosazení hodnoty do empirického převzatého vztahu nám vyšla cukernatost  $14,431^{\circ}Bx$ , ruční refraktometr ukazoval hodnotu  $14,5^{\circ}Bx$ , tedy můžeme říct, že ruční refraktometr měří s velkou přesností a pro měření orientační cukernatosti je velice vhodný.



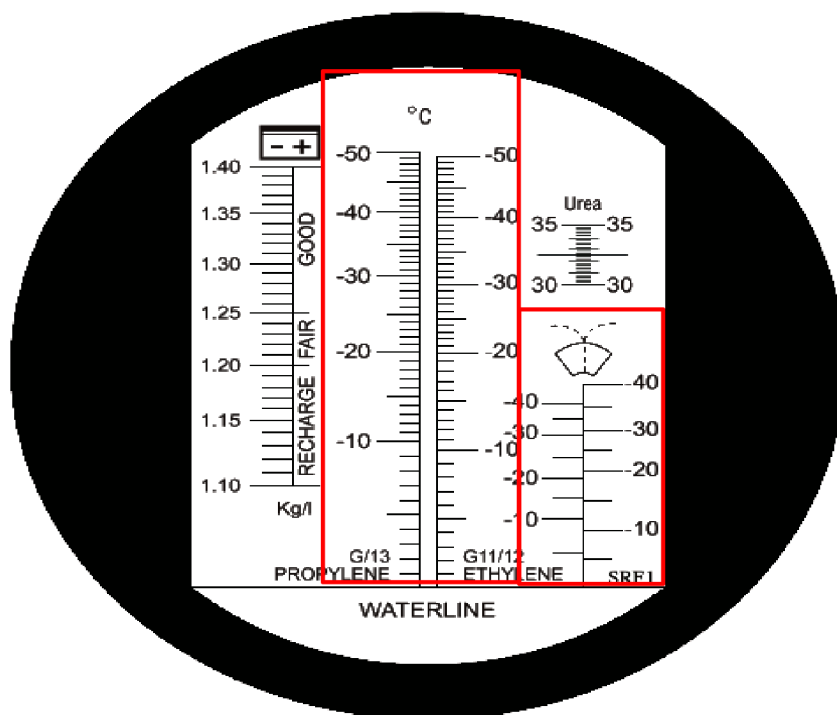
Obr. 4.9 Stupnice Brix ručního refraktometru

#### 4.10 Měření s nemrznoucí směsí do ostřikovačů

Tato experimentální část byla zaměřena na kapaliny využívající se ve velké míře v automobilovém průmyslu, jako směs do ostřikovačů. Nemrznoucí směsi mají různé body tuhnutí, které závisí především na koncentraci daného aditiva. Jedny z nejběžnějších aditiv, které se používají, jsou metanol, etanol, isopropanol, etylenglykol, propylenglykol atp. Na těchto základních látkách velice závisí, protože je třeba správně vybrat měřicí přístroj, nebo její stupnici, podle které se musíme orientovat. Občas může u některých směsí nastat problém, protože složení této kapaliny může obsahovat směs všech těchto aditiv a potom je náročné optimalizovat převod mezi indexem lomu na stupně Celsia. Ve většině případů výrobci používají jednu složku přidávaného aditiva. Nemrznoucí směsi do ostřikovačů se dělí na letní směsi a zimní směsi. Liší se samozřejmě teplotou tuhnutí kapaliny. Letní směs

se pohybuje v rozmezí od 0 °C do -5 °C. U zimní směsi je teplota rozsáhlejší a to od -10 °C až do -50 °C pro extrémní podmínky. Všechny tyto směsi lze smíchat s destilovanou vodou pro snížení bodu tuhnutí kapaliny.

Při měření bylo využito ručního, stolního a digitálního refraktometru. Ruční refraktometr, používající se přímo pro automobilový průmysl, přímo obsahuje stupnici pro měření bodu tuhnutí nemrznoucích směsí na bázi etanolu, isopropanolu, etylenglykolu a propylenglykolu. Stupnice lze vidět na Obr. 4.10, zvýrazněné červenou barvou.



Obr. 4.10 Stupnice refraktometru pro automobilový průmysl.

Tab. 4.14 Naměřené hodnoty nemrznoucích směsí pomocí refraktometrů při 20 °C

Vzorek	n [-]		Ruční refraktometr
	Digitální refraktometr	Stolní refraktometr	
Letní směs	1,3296	1,333	0
Báze - etanol	1,3525	1,351	-19
Báze - etanol	1,3552	1,355	-20
Neznámá směs	1,3567	1,356	-

Z tabulky lze vidět, že hodnoty indexu lomu se liší u kapalin na bázi etanolu zcela značně. To může být způsobeno dalšími různými přídavnými aditivy do kapalin s nemrznoucí směsí, jako v případě „Neznámé směsi“ v tabulce, kdy složení této kapaliny bylo zcela nejednoznačné a podle složení obsahuje velké množství těchto aditiv. S těmito

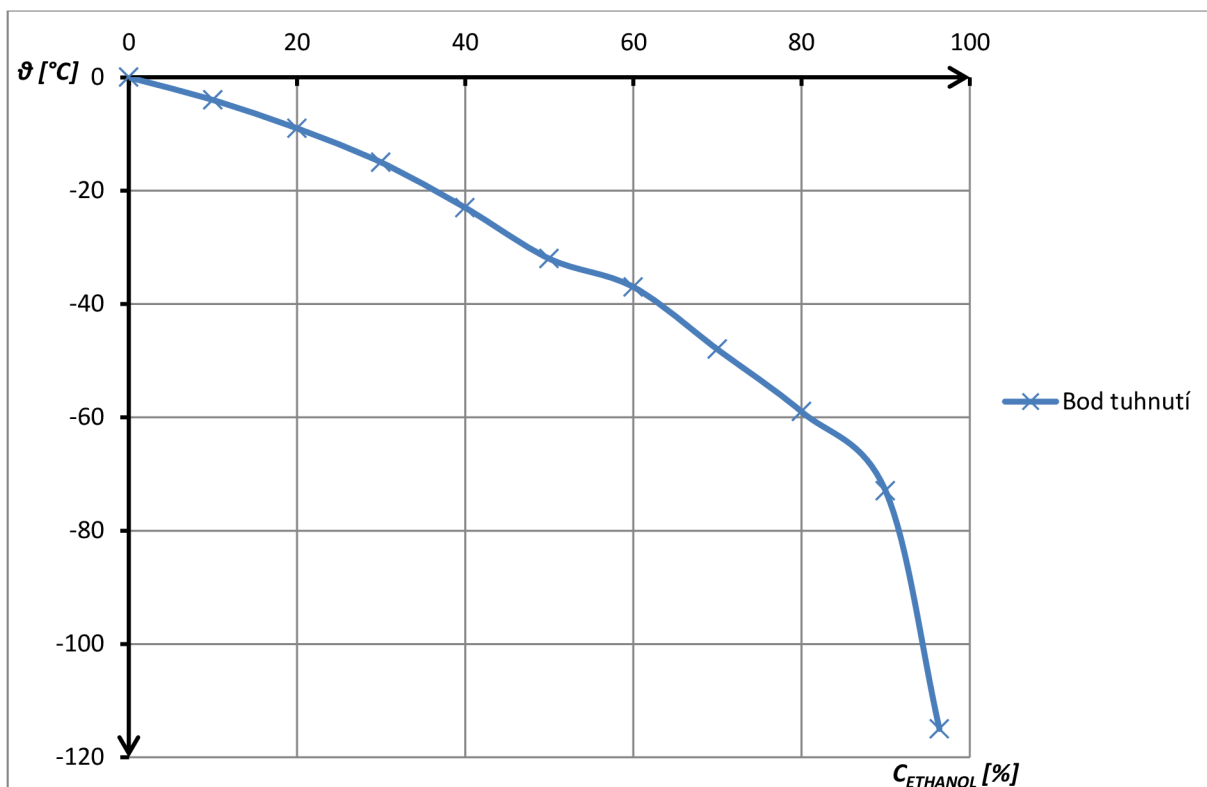
kapalinami měření lze považovat jako velice náročné. Proto by bylo vhodnější využívat jiné metody pro stanovení bodu tuhnutí kapalin a refraktometrickou metodu brát jako orientační.

#### 4.10.1 Určení bodu tuhnutí kapalin

Tato podkapitola se zajímá o bod tuhnutí směsi etanolu pro různé koncentrace. K určení tohoto bodu je nutné znát závislost indexu lomu na koncentraci, což už bylo změřeno, viz Obr. 4.3 a Tab. 4.4. Dále bylo zapotřebí znát závislost bodu tuhnutí na koncentraci etanolu. Tato charakteristika byla převzata a zaznamenána do Tab. 4.15 [44]. Na základě této charakteristiky byl vytvořen graf v závislosti bodu tuhnutí na koncentraci etanolu v destilované vodě, viz Obr. 4.11.

Tab. 4.15 Charakteristika bodu tuhnutí [44] a indexu lomu pro různé koncentrace etanolu

$C_{\text{ETHANOL}} [\%]$	n [-]	
	Digitální refraktometr	$\vartheta [^{\circ}\text{C}]$
0	1,3329	0
10	1,3391	-4
20	1,3460	-9
30	1,3524	-15
40	1,3571	-23
50	1,3603	-32
60	1,3625	-37
70	1,3649	-48
80	1,3661	-59
90	1,3629	-73
96,4	1,3618	-115



Obr. 4.11 Závislost bodu tuhnutí na koncentraci etanolu v destilované vodě

Z tohoto grafu byly sestaveny rovnice pro přepočítání koncentrace etanolu na bod tuhnutí. Křivka byla rozdělena do tří částí tak, aby přepočítání bylo co nejpřesnější. Tyto rovnice byly zobrazeny následovně:

Rovnice pro interval 0 – 80 % etanolu:

$$\vartheta = -0,005 \cdot C_{ETHANOL}^2 - 0,3486 \cdot C_{ETHANOL} - 0,1727$$

Rovnice pro interval 82 - 90 % etanolu:

$$\vartheta = -1,4 \cdot C_{ETHANOL} + 53$$

Rovnice pro interval 92 – 96,4 % etanolu:

$$\vartheta = -6,5625 \cdot C_{ETHANOL} + 517,63$$

Příklad výpočtu pro 56 % - ní etanol:

$$\vartheta = -0,005 \cdot C_{ETHANOL}^2 - 0,3486 \cdot C_{ETHANOL} - 0,1727 =$$

$$\vartheta = -0,005 \cdot 56^2 - 0,3486 \cdot 56 =$$

$$\vartheta = -35,4 \text{ °C}$$

Pomocí těchto přepočtů a následovně přepočtu ze vztahu (4.7), byla sestrojena podrobná charakteristika pro určení bodu tuhnutí směsi etanolu. Tato charakteristika byla vložena do příloh, viz **Příloha 1** a **Příloha 2**.



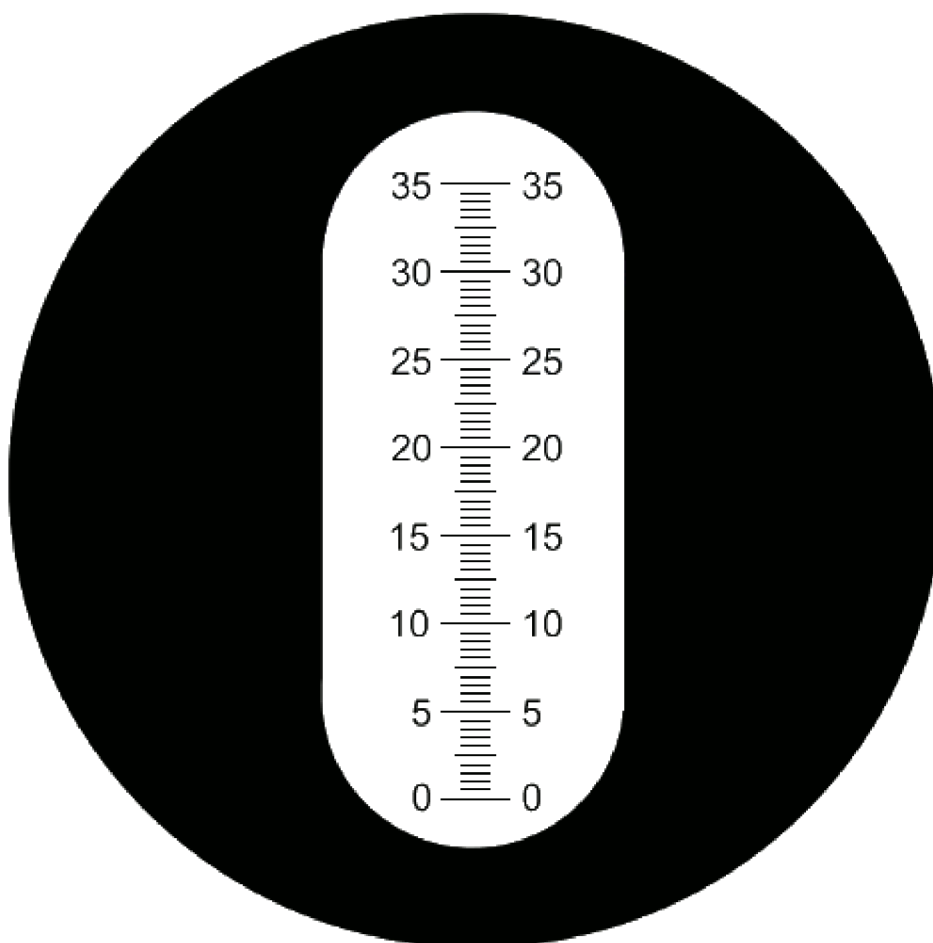
## 4.11 Měření roztoků chloridu sodného

V tomto měření bylo využito 93 % chloridu sodného (NaCl) pro vytvoření směsí o různých koncentracích. Bylo využito opět hmotnostního poměru mezi destilovanou vodou a NaCl. Z teoretických předpokladů bylo zjištěno, že existuje tzv. bod nasycení (saturation point), kdy dochází k jevu, že další přidaná sůl ve vodě se už nerozpustí. Tato hodnota má hranici 265 ‰, z toho plyne, že 26,5 g soli v 1 litru vody vytváří nasycený roztok. Toto tvrzení platí při teplotě 20 °C, pokud bychom roztok zahřívali tak se sůl rozpustí při jiné koncentraci (39,02 g při teplotě 100 °C).

V našem měření byl využíván ruční refraktometr se stupnicí pro měření salinity do 35 ‰ (350 ‰) viz Obr. 4.12. Stupnice byla otestována našimi zředěnými roztoky, které lze vidět v tabulce Tab. 4.16. Namíchané vzorky byly míchány do 15 ml kádinek.

Tab. 4.16 Příprava roztoků chloridu sodného

Teoretické hodnoty				Experimentální hodnoty			
NaCl [g]	H <sub>2</sub> O [g]	SUMA [g]	roztok [%]	NaCl [g]	H <sub>2</sub> O [g]	SUMA [g]	roztok [%]
0,5	10	10,5	4,7619	0,4957	10,0262	10,5219	4,711
1	10	11	9,0909	1,0195	9,9896	11,0091	9,261
2	10	12	16,6667	1,9936	9,9459	11,9395	16,698
3	10	13	23,0769	3,0059	10,0102	13,0161	23,094
3,6	10	13,6	26,4706	3,5996	10,0029	13,6025	26,463
4	10	14	28,5714	4,5162	10,0107	14,5269	31,089



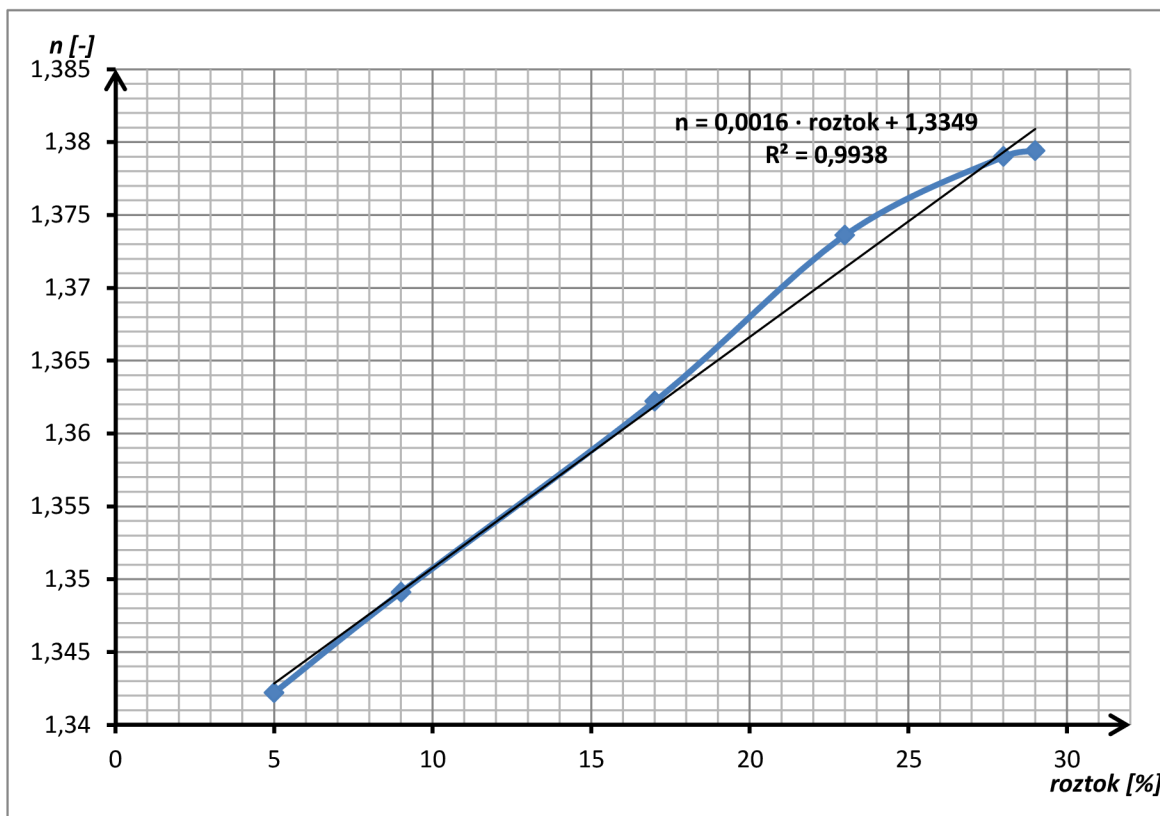
Obr. 4.12 Stupnice ručního refraktometru pro měření salinity

Experimentálně byl změřen index lomu těchto roztoků a taky hodnota salinity z ručního refraktometru. Hodnoty lze vidět v **Tab. 4.17**.

Tab. 4.17 Naměřené hodnot indexu lomu a salinity

roztok [%]	n [-]		Ruční refraktometr [%]
	Digitální refraktometr	Stolní refraktometr	
4,711	1,3422	1,343	5
9,261	1,3491	1,349	9
16,698	1,3622	1,362	17
23,094	1,3736	1,373	23
26,463	1,3790	1,379	28
31,089	1,3794	1,379	29

V tomto případě můžeme provést empirický přepočít mezi indexem lomu na hodnotu salinity s využitím rovnice z grafu **Obr. 4.13**.



Obr. 4.13 Závislost indexu lomu na hmotnostním roztoku směsi NaCl

Z grafu lze vidět, že index lomu s rostoucí koncentrací NaCl roste, až do hodnoty 26,463 %, poté se index lomu nemění. Na ose x byla vynesena salinita změřená ručním refraktometrem a na ose y byla vynesena hodnota digitálního indexu lomu. Křivka byla proložena lineární regresí a byla vytvořena následující rovnice se spolehlivostí dat  $R^2 = 0,9938$ :

Příklad výpočtu pro index lomu  $n = 1,3675$ :

$$n = 0,0016 \cdot \text{roztok} + 1,3349 \quad (4.10.)$$

$$1,3675 = 0,0016 \cdot \text{roztok} + 1,3349$$

$$1,3675 - 1,3349 = 0,0016x$$

$$\text{roztok} = \frac{1,3675 - 1,3349}{0,0016}$$

$$\text{roztok} = 20,375 \%$$

Salinita pro index lomu  $n = 1,3675$  je 20,375 %.

## 4.12 Měření indexu lomu olejů

V této části bylo zaměřeno na měření indexu lomu minerálních a rostlinných olejů. Měření probíhalo stolním Abbého refraktometrem a digitálním refraktometrem Atago.

Velkým problémem u tohoto měření bylo čištění měřicí soustavy refraktometru u obou typů. Musela být zajištěna velká čistota měřících hranolů, aby měření probíhalo správně. Z naměřených hodnot byl index lomu přepočten na relativní permitivitu podle vztahu (3.9). Uvedeným způsobem byly získány hodnoty relativních permitivit jednotlivých olejů pro optické frekvence, které lze vidět v **Tab. 4.18**. Tyto hodnoty byly srovnány s hodnotami získanými pomocí elektrických metod měření pro frekvenci 2 MHz (převzato od studenta p. Bannerta). V případě nepolárních kapalin (minerální oleje) bylo dosaženo, za využití různých diagnostických metod, shody výsledků. V některých případech se hodnoty relativní permitivity výrazně liší. Tento rozdíl je dán polární povahou kapaliny, tj. při frekvenci 2 MHz neodeznely všechny polarizační mechanismy, které svým příspěvkem navyšují hodnotu relativní permitivity.

Tab. 4.18 Naměřené a vypočtené hodnoty indexu lomu olejů:

Vzorek	n [-]		$\epsilon_{r\_digi}$ [-]	$\epsilon_{r\_stolni}$ [-]	$\epsilon_{r\_převzato}$ [-]
	Digitální refraktometr	Stolní refraktometr			
Super olej	1,4664	1,466	2,15	2,15	3,14
Rýžový olej	1,4711	1,470	2,16	2,16	3,12
Kyselina olejová	1,4591	1,459	2,13	2,13	2,35
Transformátorový olej N-A	1,4703	1,471	2,16	2,16	2,17
Metyl - laurate	1,4308	1,432	2,05	2,05	3,46
Transformátorový olej CZ-A	1,4620	1,462	2,14	2,14	2,12
Hm 46 Synt	1,4699	1,470	2,16	2,16	3,23
Silikon oil M350	1,4031	1,404	1,97	1,97	2,75

Výpočet pro transformátorový olej N-A:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \Rightarrow \epsilon_r = n^2 \quad (3.9)$$

$$\epsilon_r = 1,4703^2$$

$$\epsilon_r = 2,16$$

### 4.13 Potvrzení struktury měřené kapaliny pomocí molární refrakce

V této kapitole bylo zaměřeno na potvrzení struktury dané měřící kapaliny s využitím spíše chemické metody, a to za pomoci molární refrakce. Závislosti mezi indexem lomu a molární refrakcí je popsán v kapitole 3.2. a zde bylo zaměřeno na samotné vybrání a měření vzorků, které mají podobné složení. Použity byly vzorky, které lze s parametry vidět v **Tab. 4.19**.

Tab. 4.19 Katalogové hodnoty vzorků a změřený index lomu

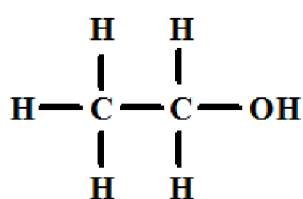
Vzorek	Vzorec	Obsah (V/V) [%]	M [g·mol <sup>-1</sup> ]	ρ [g·cm <sup>-3</sup> ]	n [-] při 20 °C
ETYLALKOHOL	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	96,4	46,07	0,8056	1,363
ACETON	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	99,94	58,08	0,7910	1,356
ETYLENGLYKOL	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	99,0	62,07	1,1130	1,430

Měření indexu lomu vzorků probíhalo stolním Abbého refraktometrem, protože vzorek jako je aceton, má velmi nežádoucí účinky pro měření s digitálním refraktometrem, kde se nachází plastové měřicí ústrojí. Tím bylo zamezeno poškození digitálního refraktometru. Abbého refraktometr má měřicí hranol ze skla chráněný hliníkovým pláštěm, tudíž zde nemohlo dojít k poškození. Ovšem má to i své nevýhody a to v přesnosti měření na tři desetinné místa.

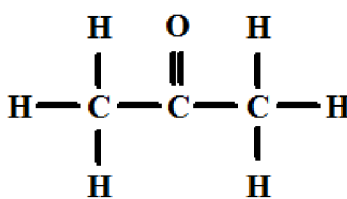
Molární refrakce se používá pro určení struktury dané látky a má dvě metody. První metoda je, že ze známých hodnot hustoty, a molární hmotnosti spočítáme molární refrakci pomocí vzorce (3.5), (3.6). Druhá metoda je postavena na základě tabulkových hodnot atomových refrakcí zjištěné z chemických tabulek. Jednotlivé atomové refrakce všech příspěvků se sečtou a zjistí se celková molární refrakce. V tomto případě musíme znát strukturu dané látky a taky se umět orientovat ve vazbách mezi látkami pro správný výpočet molární refrakce (kyslík ze skupiny OH, kyslík s dvojnou vazbou atp.).

### **Příklad č. 1:**

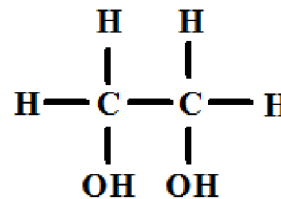
Určete, zda se jedná o molekulový vzorec C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>, kdy molární hmotnost je M = 46,07 g·mol<sup>-1</sup> a hustota (při 20 °C) je ρ = 0,8056 g·cm<sup>-3</sup>. Změřený index lomu pomocí Abbého refraktometru je (při 20 °C) n = 1,363. Strukturální vzorce jsou následující, viz Obr. 4.14):



Obr. 4.14 1. C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O,



2. C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O,



3. C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>

1. Spočítáme ze vztahu (3.5), (3.6) molární refrakci  $R_M$ :

$$R_M = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{1,363^2 - 1}{1,363^2 + 2} \cdot \frac{46,07}{0,8056} = 12,715 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

2. Ze zjištěných látkových struktur spočítáme molární refrakci z atomových refrakcí:

Tab. 4.20 Hodnoty atomových refrakcí jednotlivých příspěvků:

Příspěvek	Atomová refrakce $R_A$ [ $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ]
C	2,418
H	1,100
O (ze sk. OH)	1,525
Kyslík s dvojnou vazbou	2,210
Dvojně vazby	1,733

$$R_{C_2H_6O} = 2 \cdot C + 6 \cdot H + 1 \cdot (OH) = 2 \cdot 2,418 + 6 \cdot 1,100 + 1,525 = 12,96 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$R_{C_3H_6O} = 3 \cdot C + 6 \cdot H + O = 3 \cdot 2,418 + 6 \cdot 1,100 + 2,210 = 16,064 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$R_{C_2H_6O_2} = 2 \cdot C + 6 \cdot H + 2 \cdot (OH) = 2 \cdot 2,418 + 6 \cdot 1,100 + 2 \cdot 1,525 = \\ = 14,486 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

Po těchto výpočtech molárních refrakcí můžeme říct, že nejvíce podobající se hodnotě vypočtené molární refrakce z indexu lomu je vzorek  $C_2H_6O$ , který má teoreticky spočítanou hodnotu  $R_{C_2H_6O} = 12,961 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ . A experimentální hodnotu z indexu lomu  $R_{C_2H_6O} = 12,715 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ .

### Příklad č. 2:

Zkoumaná látka s molekulovým vzorcem  $C_3H_6O$ , má při  $20\text{ }^\circ\text{C}$  hustotu  $= 0,7910\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a index lomu  $1,356$ . Určete, zda se jedná o vzorec s látkovou strukturou  $CH_2=CH-CH_2-OH$  nebo  $CH_3-CO-CH_3$ . Molární hmotnost obou těchto látek činí  $M = 58\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

1. Spočítáme ze vztahu (3.5), (3.6) molární refrakci  $R_M$ :

$$R_M = \frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{1,356^2-1}{1,356^2+2} \cdot \frac{58}{0,7910} = 16,021\text{ cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$$

2. Ze zjištěných látkových struktur spočítáme molární refrakci z atomových refrakcí:

$$R_{1)C_3H_6O} = 3 \cdot C + 6 \cdot H + O + \text{dvojná vazba} = 3 \cdot 2,418 + 6 \cdot 1,100 + 1,525 + 1,733 \\ = 17,112\text{ cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$R_{2)C_3H_6O} = 3 \cdot C + 6 \cdot H + O = 3 \cdot 2,418 + 6 \cdot 1,100 + 2,210 = 16,064\text{ cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$$

Zkoumaný látkový vzorec odpovídá  $CH_3-CO-CH_3$  - aceton, kde  $R_M = 16,064\text{ cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$

### Příklad č.3:

Pokuste se, odhadnou index lomu acetonu z molární refrakce. Hodnota hustoty při teplotě  $20\text{ }^\circ\text{C}$  je  $\rho = 0,791\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Molární hmotnost acetonu je  $M = 58,08\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

1. Ze vztahu (3.5), (3.6) vyjádříme index lomu  $n$ :

$$R_M = \frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{M}{\rho}$$

Z minulého příkladu použijeme vypočtenou hodnotu molární refrakce pro aceton  $R_{C_3H_6O} = 16,064\text{ cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ .

$$n = \sqrt{\frac{1 + 2 \cdot \frac{R_M \cdot \rho}{M}}{1 - \frac{R_M \cdot \rho}{M}}} = \sqrt{\frac{1 + 2 \cdot \frac{16,064 \cdot 0,791}{58,08}}{1 - \frac{16,064 \cdot 0,791}{58,08}}} = 1,357$$

Index lomu nám vyšel početní metodou  $n = 1,357$ , změřená hodnota byla  $n = 1,356$ . Hodnoty si byly velice podobné a můžeme říct, že měření proběhlo velice přesně, i pomocí přepočtu.

## **5 Návrh laboratorních úloh do předmětu Diagnostika a zkušebnictví**

V této kapitole bylo zahrnuto několik laboratorních úloh. Hlavní podmínkou pro splnění jednotlivých úloh bylo, aby student přišel připraven na každou z těchto úloh, tj. zpracoval teoretický rozbor, pochopil problematiku daného měření a zadání úlohy. Každá úloha obsahuje zadání a návod k měření (návod na teoretický rozbor je brána tato bakalářská práce popřípadě jiné zdroje a literatura – je třeba uvést jako zdroje). Vyučující před zahájením měření ověří znalosti studenta, zkontroluje teoretickou přípravu a dle vlastního uvážení posoudí, zda student je připraven a může začít měřit danou úlohu. Po dokončení měření student předá naměřené výsledky vyučujícímu, který je následně zkontroluje a podepíše. Student je povinen tyto výsledky zahrnout a přiložit k odevzdávané práci. Student musí splnit všechny body zadání, pokud tak neučiní, bude mu práce vrácena pro opravu nebo mu bude sníženo bodové ohodnocení za laboratorní úlohu (dle uvážení vyučujícího). Práce musí obsahovat název a číslo laboratorní úlohy, podmínky měření (teplota, tlak, vlhkost), zadání, teoretický rozbor, poznámky k postupu měření, vypracované úkoly, závěr, zdroje, z kterých čerpal a přílohy s naměřenými výsledky v hodině.



## 5.1 Úloha č. 1: Měření teplotní závislosti kapalin s využitím Abbého refraktometru

### Zadání úlohy:

- a) Teoretický rozbor k problematice měření teplotní závislosti kapalin s využitím Abbého refraktometru
  - definujte pojem refraktometrie
  - podrobně popište fyzikální zákonitosti šíření světla v kapalinách (odraz, lom) a index lomu
  - popište jednoduše Abbého refraktometr a jeho funkci
  - prostudujte, jak se mění index lomu v závislosti na teplotě
- b) Podle návodu k laboratorní úloze a pokynům vyučujícího proměřte teplotní závislost vybraných vzorků
  - destilovaná voda
  - binární směs etanol – voda pro 0 % až 96,4 % roztok, po 10 %
  - binární směs 2 - propanol – voda pro 0 % až 99 % roztok, po 10 %
  - teplotnosné kapaliny SolartenSuper a SolarHeat Plus
- c) Výsledky experimentu vyhodnoťte
  - vytvořte charakteristiku (tabulku) v závislosti indexu lomu na teplotě
  - graficky vyhodnoťte jednotlivé charakteristiky z bodu b) – závislost indexu lomu na teplotě pro různé koncentrace (pouze u binárních směsí)
  - z grafu zjistěte gradient (kladný / záporný – podle zjištění z měření)
- d) Popište, případně určete, možné chyby měření, popište a odůvodněte tvar křivek z naměřených výsledků a vyhodnoťte dosažené výsledky z experimentu

### Návod k měření:

Zkontrolujte hadice pro cirkulaci vody, zda jsou dostatečně připevněny k refraktometru a k termostatu. Následně vlijte čerstvou destilovanou vodu do termostatu po rysku (asi 3,5 l). Mezi hranoly pomocí pipety aplikujte destilovanou vodu. Při pohledu do prvního okuláru musí ryska protínat hodnotu 1,333, což je index lomu destilované vody. Pokud tomu tak není, tak pomocí aretačního šroubu (čtyřhran) u okuláru pootočíme, aby protínala osa danou hodnotu. V druhém okuláru musí rozhraní světla a tmy protínat střed kříže, aniž by bylo rozhraní rozmazáno. Poté je refraktometr nastaven. Zapneme termostat a odečteme počáteční teplotu z displeje a zapíšeme první hodnotu indexu lomu. Následovně zvýšíme hodnotu teploty o 10 °C, po dosažení teploty počkáme 5 minut pro vyrovnání teplot cirkulující kapaliny a měřené kapaliny. Měříme do teploty 70 °C po kroku 10 °C. Po dosažení maximální teploty, tj. 70 °C vypneme termostat a horkou vodu vypustíme a nalijeme novou čerstvou destilovanou vodu z důvodu rychlejšího chlazení a

urychlení měření. Tyto popsané kroky opakujeme pro každou kapalinu. Po dokončení měření (a během měření) prodiskutujte s vyučujícím požadavky na laboratorní úlohu.

## 5.2 Úloha č. 2: Měření indexu lomu pomocí stolního Abbého refraktometru, digitálního refraktometru Atago a ručního refraktometru

### Zadání úlohy:

- a) Teoretický rozbor k problematice měření indexu lomu kapalin s využitím Abbého, digitálního refraktometru Atago a ručního refraktometru
  - podrobně popište fyzikální zákonitosti šíření světla v kapalinách (odraz, lom) a index lomu
  - popište jednoduše Abbého refraktometr, digitální refraktometr a ruční refraktometr, jeho princip
  - prostudujte míchání binárních směsí (koncentrace), jejich metody
- b) Podle návodu k laboratorní úloze a pokynům vyučujícího proměřte index lomu vybraných vzorků
  - binární směs etanol – voda pro 0 % až 96,4 % roztok, po 10 %
  - binární směs 2 - propanol – voda pro 0 % až 99 % roztok, po 10 %
  - změřte hodnotu alkoholu na ručním refraktometru pro binární směs etanol – voda pro namíchané vzorky
- c) Výsledky experimentu vyhodnoťte
  - vytvořte charakteristiku (tabulku) v závislosti indexu lomu na koncentraci směsí
  - graficky vyhodnoťte jednotlivé charakteristiky (index lomu na koncentraci) z bodu b), kromě posledního bodu
  - z grafu zjistěte pomocí rovnice trendu přepočítání indexu lomu na koncentraci a uveďte příklad výpočtu
  - hodnoty alkoholu z ručního refraktometru porovnejte s hodnotami namíchaných vzorků v kádinkách (nutno brát v potaz, že přístroj měří objemová procenta)
- d) Vyhodnoťte dosažené výsledky z měření, popište grafy, jejich tvar a odůvodněte vzniky extrémů na křivce. Dále porovnejte naměřené hodnoty indexu lomu Abbého refraktometrem a digitálním refraktometrem. Vypočítejte relativní chybu.

### Návod k měření:

V první fázi se seznámíme s měřicími přístroji. V druhé fázi je třeba zkalibrovat Abbého refraktometr. Kalibrace se provádí tak, že mezi hranoly pomocí pipety aplikujete destilovanou vodu. Při pohledu do prvního okuláru musí ryska protínat hodnotu 1,333, což je index lomu destilované vody. Pokud tomu tak není, tak pomocí aretačního šroubu (čtyřhran) u okuláru pootočíme, aby protínala osa danou hodnotu. V druhém okuláru musí

rozhraní světla a tmy protínat střed kříže, aniž by bylo rozhraní rozmazáno. Poté je refraktometr nastaven. Dále provedeme kalibraci ručního refraktometru, který měří objemová procenta alkoholu v kapalině. Na měřící hranol přístroje aplikujeme dostatečné množství destilované vody a přitiskneme krytku. Pohlédneme proti světlu do okuláru a modrobílé rozhraní musí protínat bod 0 % alkoholu neboli také bod „waterline“. Pokud neprotíná, tak pomocí malého šroubováčku, který je součástí balení pootočíme šroubkem na příslušnou stranu tak, aby rozhraní protínalo osu „waterline“ neboli 0 % alkoholu. Digitální refraktometr nekalibrujeme. Po všech těchto postupech můžeme začít s měřením. Aplikujeme pomocí pipety dané množství měřící kapaliny do měřících ústrojí refraktometrů (pozor na tvoření bublin) a odečteme index lomu z okuláru (displeje). U digitálního refraktometru zmáčkneme tlačítko "start" po nanesení kapaliny a odečteme index lomu. Po změření jednoho vzorku refraktometry očistíme a měříme znovu stejným postupem s jinou kapalinou (dále už nekalibrujeme!). Po dokončení měření (a během měření) prodiskutujte s vyučujícím požadavky na laboratorní úlohu.

### 5.3 Úloha č. 3: Měření kapalin s ručními refraktometry

#### Zadání úlohy:

- a) Teoretický rozbor k problematice měření s ručními refraktometry
  - podrobně popište fyzikální zákonitosti šíření světla v kapalinách (odraz, lom) a index lomu
  - popište podrobnou funkci ručních refraktometrů
  - prostudujte možnosti využití ručních refraktometrů, výhody / nevýhody
- b) Podle návodu k laboratorní úloze a pokynům vyučujícího proměřte s digitálním refraktometrem, ručními refraktometry vybrané vzorky a proveďte
  - kalibraci ručních refraktometrů
  - měření salinity namíchaných vzorků
  - měření se stupnicí Brix – cukernatostí vybraných vzorků
  - měření s kapalinami pro automobilový průmysl – AdBlue, nemrznoucí směs do ostřikovačů
  - měření objemového množství alkoholu
- c) Výsledky experimentu vyhodnoťte
  - výsledky vyhodnoťte do tabulky – index lomu z digitálního refraktometru a hodnoty z ručních refraktometrů
  - graficky vyhodnoťte měření salinity (index lomu na koncentraci) a vytvořte rovnici pro přepočítání z indexu lomu na koncentraci. Porovnejte spočítanou hodnotu s ručním refraktometrem
  - změřené hodnoty na stupnici Brix porovnejte s vypočtenou hodnotou z experimentálního vzorce z internetu. Do experimentálního vzorce dosazujeme hodnotu indexu lomu z digitálního refraktometru (je to empirický vztah)
  - hodnotu AdBlue změřenou digitálním refraktometrem a ručním refraktometrem porovnejte s katalogovými hodnotami z libovolných zdrojů
  - naměřené hodnoty ručním refraktometrem pro měření nemrznoucích směsí do ostřikovačů porovnejte s hodnotami dané výrobcem (index lomu nemusíte brát v potaz, pouze porovnejte mezi změřenými kapalinami)
  - hodnoty alkoholu směsí etanol – voda proměřte a porovnejte s hodnotami uvedené na kádinkách (pozor na objemová procenta alkoholu a na hmotnostní procenta alkoholu). Z naměřených hodnot digitálním refraktometrem sestavte graf v závislosti indexu lomu na koncentraci a proveďte přepočítání pomocí rovnice z grafu (empiricky). Porovnejte hodnoty s ručním refraktometrem

- d) Popište, případně určete, možné chyby měření, popište a odůvodněte tvar křivek z naměřených výsledků a vyhodnoťte dosažené výsledky z experimentu. Vypočítejte relativní chybu u změřených hodnot ručním a digitálním refraktometrem (pouze, kde to lze).

### **Návod k měření:**

Tato laboratorní úloha se měří pomocí ručních refraktometrů a taky s využitím digitálního refraktometru. Nejprve se seznámíme s refraktometry a jejich parametry z katalogu. Dále je nutno nastavit ruční refraktometry – provést kalibraci. Provedeme kalibraci ručního refraktometru, který měří podle využití danou hodnotu měřené kapaliny. Na měřicí hranol přístroje aplikujeme dostatečné množství destilované vody a přitiskneme krytku. Pohlédneme proti světlu do okuláru a modrobílé rozhraní musí protínat bod 0 neboli také bod „waterline“. Pokud neprotíná, tak pomocí malého šroubováčku, který je součástí balení pootočíme šroubkem na příslušnou stranu tak, aby rozhraní protínalo osu „waterline“ neboli 0. Digitální refraktometr nekalibrujeme. Po všech těchto postupech můžeme začít s měřením. Samotné měření je jednoduché, aplikujeme pomocí pipety dané množství měřicí kapaliny do měřících ústrojí refraktometrů (pozor na tvoření bublin) a odečteme index lomu z okuláru (displeje). U digitálního refraktometru zmáčkneme tlačítko "start" po nanesení kapaliny a odečteme index lomu. Po změření jednoho vzorku refraktometry očistíme a měříme znovu stejným postupem s jinou kapalinou (dále už nekalibrujeme!). Na konci měření refraktometry pečlivě očistíme a uschováme do pouzder a prodiskutujte s vyučujícím požadavky na laboratorní úlohu.

# Závěr

Bakalářská práce se zabývá problematikou kapalin, přesněji řečeno aplikačními možnostmi refraktometru k diagnostice kapalin.

Teoretická část byla věnována základní problematice šíření elektromagnetického vlnění, indexem lomu, geometrickou optikou, což je odraz světla, lom světla, mezní úhel a úplný odraz světla. Byly popsány metody měření indexu lomu, jednotlivé typy refraktometrů a možné přepočty indexu lomu na koncentraci, molární refrakci, hustotu a permitivitu. Taky byla zmíněna problematika záporného indexu lomu, která v dnešní době je pořád ve výzkumu pro praktické využití.

Experimentální část byla věnována různým typům refraktometrů s různým zaměřením, podle využití v oboru. Používán byl Abbého stolní refraktometr, digitální refraktometr Atago a ruční refraktometry pro měření cukernatosti, objemových procent alkoholu, salinity roztoků a hodnot provozních kapalin nejen pro automobilový průmysl. Byla provedena kalibrace refraktometru pomocí destilované vody. Byly připraveny směsné roztoky na bázi etanolu a 2 – propanolu s destilovanou vodou o různých koncentracích po 10 %. Pro měření slanosti roztoku byla namíchána směs destilované vody a NaCl o různém hmotnostním poměru, až po dosažení zcela nasyceného roztoku. Další zkoumané kapaliny představovaly nemrznoucí směsi, AdBlue, minerální oleje, teplonosné kapaliny a šťávy z ovoce.

Při měření indexu lomu pro různé koncentrace etanolu a 2 – propanolu bylo zjištěno, že index lomu s rostoucí koncentrací etanolu a 2 – propanolu se zvyšuje, což je dáno změnou rychlosti šíření světla v kapalině a prostředí je tedy opticky hustší. Při pohledu na charakteristiky si lze všimnout poklesu indexu lomu při vysokých koncentracích etanolu a 2 – propanolu. Tato změna právě závisí na povaze roztoků a jejich jednotlivých složek tvořící směs. Dle mého názoru se jedná o eutektickou kapalinu. Byla spočítána i relativní chyba měření s porovnáním katalogové hodnoty s naměřenou hodnotou pro Abbého refraktometr a digitální refraktometr, s tím že digitální se jevil jako přesnější.

Dále byla měřena závislost indexu lomu na teplotě pro směsi etanolu, 2 – propanolu a taky teplonosných kapalin pro sluneční kolektory SolartenSuper a SolarHeat Plus. Měření probíhalo na Abbého refraktometru, na kterém lze teplotní závislost změřit. Teplotní rozsah byl od přibližně 23 °C po 70 °C s krokem 10 °C. Změřením závislostí se dospělo k závěru, že index lomu se zvyšující se teplotou klesá. Vliv na pokles i indexu lomu je způsoben změnou hustoty a objemu kapaliny, což má za následek rychlejšího šíření světla v prostředí. Pro teplonosné kapaliny byla i spočítána chyba s porovnáním katalogové hodnoty a změřené hodnoty.

Další experimentální část byla zaměřena na využití ručních refraktometrů pro jednotlivé aplikační možnosti využití. První měření probíhalo s kapalinou AdBlue, která slouží především pro snížení emisních výfukových. Byly použity dva vzorky, na kterých se aplikovalo měření. Analýzou bylo zjištěno, že hodnoty indexu lomu u obou sledovaných vzorků odpovídají předepsané normě ISO 22241-2 Annex C. Přepočet na měřicí stupnici nemá velký význam, jelikož měříme pouze ve velmi malém intervalu indexu lomu (1,3814 - 1,3843), která odpovídá předepsané hodnotě 32,5 % močoviny. Změřený index lomu sledovaných kapalin pro digitální refraktometr odpovídá hodnotě  $n = 1,3817$  a  $n = 1,3719$ .

Další část měření byla zaměřena na využití stupnice Brix, která udává míru cukernatosti roztoku. Experiment proběhl na vzorcích různých ovocných šťáv. Získaný index lomu byl přepočítán pomocí všeobecně uznávaného empirického vztahu (viz kapitola 4.9) na stupnici Brix. Výsledek byl shodný s hodnotou získanou pomocí ručního refraktometru, který byl kalibrován přímo v měrných jednotkách Brix.

Experiment byl rovněž zaměřen na práci s ručním refraktometrem pro automobilový průmysl. Analyzovaly se různé typy směsí do ostříkovačů a jejich bod tuhnutí. V tomto případě bylo důležité znát hlavní složku směsi. Byly změřeny kapaliny na bázi etanolu a na neznámé bázi, kde směs obsahovala velké množství aditiv, tedy nebylo možné určit, ze které stupnice bude odečítána hodnota. Dále byla stanovena a přepočítána koncentrace etanolu na bod tuhnutí. Pro přepočet je nutné znát závislost indexu lomu na koncentraci etanolu (bylo změřeno) a závislost koncentrace etanolu na bodu tuhnutí (bylo převzato). Z těchto závislostí byly sestaveny rovnice, viz v kapitole 4.10.1. a vytvořena tabulka, která je v přílohách viz **Příloha 1** a **Příloha 2**.

Další část experimentu byla věnována měření a stanovení slanosti roztoků. Bylo využito ručního refraktometru a namíchaných vzorků o různých koncentracích NaCl. Z naměřených hodnot byla sestrojena závislost indexu lomu na hmotnostním procentu roztoku NaCl a následně byl odvozen empirický vztah  $n = 0,0016 \cdot \text{roztok} + 1,3349$  pro přepočet na stupnici salinity. Naměřené hodnoty salinity roztoku byly téměř shodné s teoretickými hodnotami a byly v toleranci přesnosti ručního refraktometru.

Poslední měřicí část byla zaměřena na minerální oleje a stanovení jejich permitivity. Index lomu byl získán využitím Abbého refraktometrem i digitálního refraktometru Atago a následně, pomocí jednoduchého vztahu (3.9), přepočítán na relativní permitivitu. Bylo dosaženo shody pro nepolární kapaliny.

Závěr experimentální části byl věnován molární refrakci využívající se k potvrzení struktury analyzovaného materiálu. Tato část byla zaměřena hlavně na identifikaci tří kapalin s podobným nebo stejným sumárním vzorcem, ale s jiným strukturálním vzorcem. Analýza byla provedena na základě znalosti indexu lomu, hustoty a molární hmotnosti.



Nedílnou součástí bakalářské práce je návrh tří laboratorních úloh vytvořených pro předmět Diagnostiku a zkušebnictví.

# Použitá literatura

- [1] HOROVÁ, Z. *Demonstrace základních vlastností šíření vln na datech umělých družic*. Praha, 2007. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [2] JAHODA, D. *Elektromagnetické záření*. Brno. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=40258](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40258). Diplomová práce. VUT v Brně.
- [3] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: *Fyzika*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000
- [4] ČVUT. *Vlnová délka, frekvence, energie záření a index lomu*: [online]. Praha, 2010 [cit. 10.10.2014]. Dostupné z: [http://pmo.fs.cvut.cz/wiki/images/5/50/APO\\_P%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ka-2.pdf](http://pmo.fs.cvut.cz/wiki/images/5/50/APO_P%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ka-2.pdf)
- [5] DROZD, Z., VÁCHOVÁ, P., *Elektromagnetické záření: vzdělávací modul fyzika: výukový a metodický text: Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze: aktivně, aktuálně a s aplikacemi - projekt OPPA*. Vyd. 1. Praha: P3K, 2012. ISBN 80-871-8682-6.
- [6] KALUS, R. *Trivium z optiky: Světlo jako elektromagnetické vlnění*. Ostrava, 2004 [cit. 12.10.2014].
- [7] VÁŇA, J. *Analyzátory plynů a kapalin*. Praha: SNTL, 1984. 2nd EDITION.
- [8] NEVŘIVÁ, H. *Typy refraktometrů*. Brno, duben 2011. Bakalářská práce. Masarykova univerzita.
- [9] TABATA, M., FUKUSHIMA, IT., KAWAI, H., Development of Silica Aerogel with Any Density. [online]. 2005 [cit. 15.11.2014]. Dostupné z: <http://www.ppl.phys.chiba-u.jp/~makoto/publication/N14-191.pdf>
- [10] UNIVERSITY OF NEBRASKA. Refractive index of a solid. *Department of Chemistry* [online]. 2011 [cit. 17.11.2014]. Dostupné z: <http://chem.unl.edu/chem484/lecture/The%20Refractive%20Index%20of%20a%20Solid.ppt>
- [11] ENGINEERING TOOLBOX. *Refractive Index of some common Liquids, Solids and Gases* [online]. 2011 [cit. 20.11.2014]. Dostupné z: [http://www.engineeringtoolbox.com/refractive-index-d\\_1264.html](http://www.engineeringtoolbox.com/refractive-index-d_1264.html)
- [12] PHYSICS CLASSROOM. *The Law of Reflection*. In: [online]. [cit. 20.11.2014]. Dostupné z: <http://www.physicsclassroom.com/Class/refln/u13l1c.cfm>
- [13] JAVORSKIJ, B. M.; SELEZNĚV, J. A. *Přehled elementární fyziky*. 1. vyd., Praha: SNTL, 1989
- [14] MAZUREK, A. *Základy praktické optiky: Optické výpočty*. 3. vyd. Práce, 1950.

- [15] PHYSICS CLASSROOM. *Total internal reflection*. In: [online]. [cit. 21.11.2014]. Dostupné z: <http://www.physicsclassroom.com/class/refrn/Lesson-3/Total-Internal-Reflection>
- [16] VŠETIČKA, M., REICHL, J. Úplný odraz světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006-2014 [cit. 15.10.2014]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/440-uplny-odraz-svetla>
- [17] HOFMANN, J a URBANOVÁ, M.. *Fyzika I* [online]. Verze 1.0. Praha: VŠCHT Praha, 2006 [cit. 7.11.2014]. Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_ekniha-001/pdf/170.pdf](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pdf/170.pdf)
- [18] REINBERK, F. *Refraktometrie - využití refraktometru* [online]. 2010 [cit. 29.10.2014]. Dostupné z: <http://www.refraktometr.cz/vyuziti-refraktometru>
- [19] MUNI. Pedagogická fakulta. In: *Abbého refraktometr* [online]. [cit. 1.12.2014]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/fchlab/refraktometr.htm>
- [20] PLŠKO, E. *Praktické základy optických metod v chemii*. I. vydanie. Bratislava: SVTL, 1963.
- [21] GRUJICH, D. MISCAPÉ magazine. *Repairing Abbe Refractometer*. 2013 [cit. 1.11.2014].
- [22] ANTIQUE MICROSCOPES. *Pulfrich Refractometer* [online]. 2011 [cit. 2.11.2014]. Dostupné z: [http://www.antiquemicroscopes.com/chemistry/Zeiss\\_Pulfrich\\_Refractometer.htm](http://www.antiquemicroscopes.com/chemistry/Zeiss_Pulfrich_Refractometer.htm)
- [23] CHROBÁK, J. *ANALÝZA VLASTNOSTÍ PROVOZNÍCH KAPALIN*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. MARTIN FRK, Ph.D.
- [24] LAMONT, R., BURGESS, G. *Bureau of Standards Journal of Research* [online]. Washington: Government printing office, 1931 [cit. 1.12.2014]. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=v93PAAAAMAAJ&pg=PA996&dq=immersion+refractometer&hl=cs&sa=X&ei=R\\_qKVLDEDtHU7AbUnoHQAg&ved=0CDkQ6AEwAQ#v=onepage&q=immersion%20refractometer&f=false](https://books.google.cz/books?id=v93PAAAAMAAJ&pg=PA996&dq=immersion+refractometer&hl=cs&sa=X&ei=R_qKVLDEDtHU7AbUnoHQAg&ved=0CDkQ6AEwAQ#v=onepage&q=immersion%20refractometer&f=false)
- [25] ZSHK. *Optické metody: Refraktometrie* [online]. Hradec Králové [cit. 19.11.2014]. Dostupné z: <http://anl.zshk.cz/vyuka/refraktometrie.aspx>
- [26] MAHMOOD, W., RAHMAN, A. *Refractive index of solutions at high concentrations* [online]. Detroit, 1988 [cit. 3.12.2014]. Dostupné z: [http://seniorphysics.com/physics/refractive\\_index\\_conc.pdf](http://seniorphysics.com/physics/refractive_index_conc.pdf)
- [27] STELSON, A, W. Clark Atlanta university. *Urban Aerosol Refractive Index Prediction by Partial Molar Refraction Approach* [online]. 1990 [cit. 7.11.2014]. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es00081a008>

- [28] URBÁNEK, D. *Optické metody se zaměřením na refraktometrii a polarimetrii a jejich využití v chemické analýze*. Brno, 2008 [cit. 14.11.2014]. Bakalářská práce. Masarykova univerzita.
- [29] ŠAVEL, J, KOŠIN, P., BROŽ, A., SIGLER, M. Kvasný průmysl. *POUŽITÍ REFRAKTOMETRIE PRO SLEDOVÁNÍ PRŮBĚHU KVAŠENÍ* [online]. 2009, číslo 4 [cit. 28.11.2014]. Dostupné z:  
<http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CDUQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.kvasnyprumysl.cz%2Fdownload.php%3Fclanek%3D101&ei=PQBVODFH8aR7AaEyoG4Dg&usg=AFQjCNFatYKMSKBEOyNJw7JLOT5rxZiGWw&sig2=KxkB0x843Lu0nnU9b9URoA&bvm=bv.80642063,d.ZGU>
- [30] MURCKO, Filip. *Optika*. Žilina [cit. 21.11.2014]. Semestrální práce. Žilinská univerzita.
- [31] GRANTA. *Material Intelligence: Refractive index* [online]. 2014 [cit. 13.11.2014]. Dostupné z:  
<http://inventor.grantadesign.com/en/notes/science/material/S18%20Refractive%20index.htm>
- [32] SZÁNTÓ, L. *Index lomu a rychlost fotonu* [online]. 2010 [cit. 12.11.2014]. Dostupné z: <http://qed.ben.cz/index-lomu-a-rychlost-fotonu>
- [33] FYZMATIK. *Záporný index lomu* [online]. [cit. 5.12.2014]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/302-metamaterialy-se-zapornym-indexem-lomu.html>
- [34] BASOV, D., SMITH, D., PADILLA, W. Review feature. *Negative refractive index metamaterials* [online]. 2006 [cit. 1.12.2014]. Dostupné z: [http://infrared.ucsd.edu/basov\\_pubs/mt9-28-2006.pdf](http://infrared.ucsd.edu/basov_pubs/mt9-28-2006.pdf)
- [35] RAMAKRISHNA, Anantha. Physics of negative refractive index materials: OIP SCIENCE. [online]. 2005 [cit. 2.12.2014]. Dostupné z: [http://iopscience.iop.org/0034-4885/68/2/R06/pdf/0034-4885\\_68\\_2\\_R06.pdf](http://iopscience.iop.org/0034-4885/68/2/R06/pdf/0034-4885_68_2_R06.pdf)
- [36] HÝLSKÝ, J. *TEPLONOSNÁ MÉDIA PRO SOLÁRN Ě TEPELNÉ SYSTÉMY*. Brno, 2014 [cit. 9.12.2014]. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [37] ZEVAR. *Solarten Super* [online]. 2010 [cit. 5.12.2014]. Dostupné z: <http://www.zavar.cz/cs/produkty/xenon-produkty> a <http://www.regulus.cz/?download=CZ/bez-listy/solarten-super-nemrznouci-teplonosna-antikorozni-kapalina.pdf>
- [38] LACH-NER. *Bezpečnostní list etanolu* [online]. 31. vyd. 9.12.2011 [cit. 26.11.2014]. Dostupné z: [http://www.lach-ner.com/files/64-17-5\\_Etanol\\_v4\\_CZ.pdf](http://www.lach-ner.com/files/64-17-5_Etanol_v4_CZ.pdf)
- [39] IOFFE, B.V. *Refraktometrické metody v chemii*. Praha: SNTL, 1983, 336 s.

- [40] ZEVAR, s.r.o. *Vlastnosti produktu: SolarHeat Plus*. Dostupné také z: [http://www.obchodsolar.cz/fotky13919/fotov/ps\\_106SOLAR-heat-Plus-produktovy-list.pdf](http://www.obchodsolar.cz/fotky13919/fotov/ps_106SOLAR-heat-Plus-produktovy-list.pdf)
- [41] GREENCHEM HOLDING, B.V. *Co je AdBlue?: AGROFERT a.s.* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.greenchem-adblue.cz/?1198/co-je-to-adblue>
- [42] BLUESKY, A. *Specifikace produktu* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: [http://www.adam-bluesky.cz/fileadmin/user\\_upload/Dokumenty/AdBlue\\_specifikace\\_dle\\_ISO\\_22241\\_duben\\_2012.pdf](http://www.adam-bluesky.cz/fileadmin/user_upload/Dokumenty/AdBlue_specifikace_dle_ISO_22241_duben_2012.pdf)
- [43] REFRAKTOMETR,. *Stupnice pro měření cukernatosti Brix* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.refraktometr.cz/stupnice-pro-mereni-cukernatosti>
- [44] ENGINEERING TOOLBOX,. *Etanol freezeprotected water solution* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: [http://www.engineeringtoolbox.com/etanol-water-d\\_989.html](http://www.engineeringtoolbox.com/etanol-water-d_989.html)
- [45] REFRAKTOMETR: *Určení cukernatosti roztoků* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.refraktometr.cz/vypocet-cukernatosti-roztoku>
- [46] MATOUŠEK, J. *MODELOVÁNÍ A CHOVÁNÍ SLOŽENÝCH SOUSTAV VE STRÍDAVÉM ELEKTRICKÉM POLI*. Brno, 2010 [cit. 2015-05-16].

## Seznam použitých symbolů

$\vec{E}$	[V m <sup>-1</sup> ]	intenzita elektrického pole
$\vec{B}$	[T]	magnetická indukce
$\lambda$	[m]	vlnová délka
$c$	[m s <sup>-1</sup> ]	rychlost světla ve vakuu ( $3 \cdot 10^8$ m s <sup>-1</sup> )
$T$	[s]	perioda
$f$	[Hz]	frekvence
$v_x$	[m s <sup>-1</sup> ]	rychlost světla v daném prostředí
$n$	[-]	index lomu, absolutní index lomu
$n_x$	[-]	index lomu prostředí
$\alpha$	[°]	úhel dopadu
$\alpha'$	[°]	úhel odrazu
$\beta$	[°]	úhel lomu
$n_{21}$	[-]	relativní index lomu
$\alpha_m$	[°]	mezní úhel
$C$	[-][%]	koncentrace látky
$K$	[-]	inkrement indexu lomu
$M$	[kg mol <sup>-1</sup> ]	molární hmotnost látky
$\rho$	[kg m <sup>-3</sup> ]	hustota látky
$R_M$	[m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> ]	molární refrakce
$R_S$	[m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	specifická refrakce
$\epsilon_0$	[F m <sup>-1</sup> ]	absolutní permitivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12}$ F m <sup>-1</sup> )
$\epsilon_r$	[-]	relativní permitivita prostředí
$\mu_0$	[H m <sup>-1</sup> ]	magnetická permeabilita prostředí ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ H m <sup>-1</sup> )
$m_x$	[kg]	hmotnost dané látky
$V_x$	[l]	objem dané látky
$Bx$	[°Bx]	hmotnostní podíl cukru v kapalině

# Přílohy

Příloha 1. Přepočtené hodnoty indexu lomu a koncentrací 0 – 50 % etanolu na bod tuhnutí kapaliny: .....	66
Příloha 2. Přepočtené hodnoty indexu lomu a koncentrací 50 – 96,4 % etanolu na bod tuhnutí kapaliny: .....	67

Příloha 1. Přepočtené hodnoty indexu lomu a koncentrací 0 – 50 % etanolu na bod tuhnutí kapaliny

n / C <sub>etalon</sub>	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	
1,3330	0,0																									
1,3340		-0,9																								
1,3355			-1,6																							
1,3370				-2,4																						
1,3385					-3,3																					
1,3399						-4,2																				
1,3413							-5,1																			
1,3426								-6,0																		
1,3439									-7,0																	
1,3452										-8,1																
1,3464											-9,1															
1,3476												-10,3														
1,3487													-11,4													
1,3498														-12,6												
1,3509															-13,9											
1,3519																-15,1										
1,3529																	-16,4									
1,3538																		-17,8								
1,3547																			-19,2							
1,3556																				-20,6						
1,3564																					-22,1					
1,3572																						-23,6				
1,3579																							-25,2			
1,3586																								-26,8		
1,3593																									-28,4	



Příloha 2. Přepočtené hodnoty indexu lomu a koncentrací 50 – 96,4 % etanolu na bod tuhnutí kapaliny

n / C <sub>etalon</sub>	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96,4	
1,3599	-30,1																								
1,3605		-31,8																							
1,3610			-33,6																						
1,3615				-35,4																					
1,3620					-37,2																				
1,3624						-39,1																			
1,3628							-41,0																		
1,3631								-43,0																	
1,3634									-45,0																
1,3637										-47,0															
1,3639											-49,1														
1,3637												-51,2													
1,3639													-53,3												
1,3641														-55,5											
1,3643															-57,8										
1,3645																-60,1									
1,3627																	-61,8								
1,3621																		-64,6							
1,3615																			-67,4						
1,3609																				-70,2					
1,3603																					-73,0				
1,3597																						-86,1			
1,3591																							-99,2		
1,3584																								-115,0	