

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Realizace přípravku pro měření akustického výkonu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš FLACHS**  
Osobní číslo: **E12B0257P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Realizace přípravku pro měření akustického výkonu**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte metody měření akustického výkonu dostupné v akustických laboratořích FEL.
2. Navrhněte přípravky pro zjednodušení a zefektivnění měřicích metod především z hlediska snadného určení vzdálenosti měřicích mikrofónů od měřeného objektu.
3. Přípravky realizujte a ověřte jejich funkčnost při praktickém měření akustického výkonu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah kvalifikační práce: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je návrh a následná realizace měřícího přípravku, který zjednoduší a zefektivní měření akustického výkonu v bezodrazové komoře. Teoretická část se zabývá rozбором základních akustických veličin a problematikou měření akustického výkonu. Praktická část se zabývá návrhem a realizací přípravků. Pro rozšíření možnosti připevnění v bezodrazové komoře byl navrhnout pomocný rám. Dále byla navrhována polokulová konstrukce a měřící přípravek používající dálkové otočné zařízení. Realizace není dokončená a na konstrukci se dále pracuje.

## **Klíčová slova**

Akustický výkon, akustický tlak, volné pole, bezodrazová komora, měření akustického výkonu

**Abstract**

This bachelor thesis describes the design and subsequent realization of measurement equipment, which simplify and streamline the measurement of sound power in an anechoic chamber. The theoretical part deals with the analysis of basic acoustic quantities and problematics of sound power measurement. The practical part deals with design and realization of equipment. For expanding the possibility of mounting in an anechoic chamber was designed sub frame. Additionally was designed hemispherical structure and measurement device using remote rotating equipment. Realization is not completed and the measuring devices are still under construction.

**Key words**

Sound power, sound pressure, free field, anechoic chamber, measurement of sound power

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 16.6.2016

Tomáš Flachs

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ VELIČINY</b> .....	<b>12</b>
1.1 AKUSTICKÁ RYCHLOST .....	12
1.1.1 Rychlost šíření zvuku .....	12
1.2 AKUSTICKÝ TLAK .....	13
1.3 AKUSTICKÁ INTENZITA .....	14
1.4 AKUSTICKÝ VÝKON .....	15
<b>2 METODY MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU</b> .....	<b>16</b>
<b>3 MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU V BEZODRAZOVÉ KOMOŘE</b> .....	<b>17</b>
3.1 REFERENČNÍ METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY .....	17
3.2 MĚŘÍCÍ PLOCHA A ROZMÍSTĚNÍ MĚŘÍCÍCH BODŮ .....	17
3.3 DOBA MĚŘENÍ HLADIN AKUSTICKÉHO TLAKU .....	18
3.4 VÝPOČET HLADIN ČASOVĚ PRŮMĚROVANÉHO AKUSTICKÉHO TLAKU NA PLOŠE .....	19
3.4.1 Měřicí plocha, která má dílčí oblasti se shodným plošným obsahem.....	19
3.4.2 Měřicí plocha, která nemá dílčí oblasti se shodným plošným obsahem.....	19
3.4.3 Kruhové dráhy mikrofonu.....	19
3.4.4 Poledníkové nebo spirálové dráhy mikrofonu .....	20
3.5 VÝPOČET HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU V BEZODRAZOVÉ KOMOŘE .....	20
3.5.1 Výpočet korekcí $C_1$ , $C_2$ , $C_3$ .....	20
<b>4 AKUSTICKÉ LABORATOŘE NA FEL</b> .....	<b>22</b>
4.1 BEZODRAZOVÁ KOMORA .....	23
4.1.1 Bezodrazová komora na FEL .....	24
<b>5 PŘÍPRAVKY PRO MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU V BEZODRAZOVÉ KOMOŘE VYUŽÍVANÉ V SOUČASNOSTI</b> .....	<b>25</b>
5.1 AKUSTICKÉ LABORATOŘE VE OE SCIENTECH CO., LTD. - ČÍNA .....	25
5.2 AKUSTICKÉ LABORATOŘE VE FENG CHIA UNIVERSITY –TAIWAN .....	26
5.3 AKUSTICKÉ LABORATOŘE PATŘÍCÍ HUDEBNÍ A TANEČNÍ FAKULTĚ AMU .....	26
5.4 AKUSTICKÉ LABORATOŘE VE RWTH AACHEN UNIVERSITY – NĚMECKO .....	27
5.5 AKUSTICKÉ LABORATOŘE V BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY – USA .....	28
5.6 AKUSTICKÉ LABORATOŘE V UNIVERSITY OF SALFORD, MANCHESTER – VELKÁ BRITÁNIE.....	28
5.7 AKUSTICKÁ LABORATOŘ V SCHOOL OF ELECTRONIC, INFORMATION, AND ELECTRICAL ENGINEERING, SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY – ČÍNA .....	29
5.8 KOMERČNÍ ŘEŠENÍ OD SPOLEČNOSTI G.R.A.S. SOUND & VIBRATION A/S .....	29



<b>6</b>	<b>POŽADAVKY NA MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVKY .....</b>	<b>31</b>
6.1	CÍLE NÁVRHU .....	31
6.2	POŽADAVKY NA MĚŘÍCÍ PLOCHU .....	31
6.2.1	Referenční obalová plocha .....	31
6.2.2	Požadavky dané ČSN EN ISO 3744.....	32
6.2.3	Požadavky dané ČSN EN ISO 3745.....	32
6.2.4	Požadavky dané ČSN EN ISO 3746.....	32
6.3	POŽADAVKY NA UMÍSTĚNÍ MĚŘÍCÍCH MIKROFONŮ .....	32
6.3.1	Požadavky dané ČSN EN ISO 3744.....	32
6.3.2	Požadavky dané ČSN EN ISO 3745.....	33
	Požadavky dané ČSN EN ISO 3746.....	34
6.4	DISPOZICE BEZODRAZOVÉ KOMORY .....	34
6.5	VYBAVENÍ URČENÉ PRO MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVKY .....	35
<b>7</b>	<b>KONSTRUKCE MĚŘÍCÍCH PŘÍPRAVKŮ .....</b>	<b>36</b>
7.1	POMOCNÝ RÁM DO BEZODRAZOVÉ KOMORY .....	36
7.1.1	Návrh .....	36
7.1.2	Realizace.....	37
7.2	POLOKULOVÁ STRUKTURA .....	38
7.2.1	Návrh .....	38
7.2.2	Realizace.....	41
7.3	PŘÍPRAVEK PRO OTOČNÉ ZAŘÍZENÍ .....	42
7.3.1	Návrh .....	42
7.3.2	Realizace.....	43
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>44</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>46</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>47</b>
	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>1</b>
	PŘÍLOHA A: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ROZLOŽENÍ PEVNÝCH MĚŘÍCÍCH BODŮ PODLE ČSN EN ISO 3746 .....	1
	PŘÍLOHA B: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ROZLOŽENÍ PEVNÝCH MĚŘÍCÍCH BODŮ PODLE ČSN EN ISO 3744 .....	2
	PŘÍLOHA C: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ROZLOŽENÍ PEVNÝCH MĚŘÍCÍCH BODŮ PODLE ČSN EN ISO 3745 .....	3
	PŘÍLOHA D: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ KRUHOVÝCH DRAH MIKROFONU NA POLOKULOVÉ MĚŘÍCÍ PLOŠE PODLE ČSN EN ISO 3745.....	4

## Seznam symbolů a zkratk

$A_0$	[dB.m <sup>-1</sup> ]	Číselná hodnota součinitele útlumu
$c$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost šíření zvuku
$C_1$	[dB]	Korekce na referenční veličiny
$C_2$	[dB]	Korekce na akustickou vyzařovací impedanci
$C_3$	[dB]	Korekce na pohltivost vzduchu na specifických frekvencích
$E$	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup> ]	modul pružnosti prostředí
$I$	[W.m <sup>-2</sup> ]	Akustická intenzita
$K_{11}$	[dB]	Korekce na hluk na pozadí
$L_0$	[W.m <sup>-2</sup> ]	Referenční hodnota akustické intenzity
$L_i$	[dB]	Hladina akustické intenzity
$L_p$	[dB]	Hladina akustického tlaku
$\overline{L_p}$	[dB]	Hladina časově průměrovaného akustického tlaku na ploše
$L_{pi(B)}$	[dB]	Hladina časově průměrovaného akustického tlaku na pozadí
$L'_{pi(ST)}$	[dB]	Hladina časově průměrovaného akustického tlaku se zapnutým zdrojem hluku
$L_{pi}$	[dB]	Průměrná hladina akustického tlaku na i-té dráze
$L_u$	[dB]	Hladina akustické rychlosti
$L_W$	[dB]	Hladina akustického výkonu
$N$	[-]	Počet dílčích ploch
$N_M$	[-]	Počet poloh mikrofónů
$p$	[Pa]	Tlak
$p_0$	[Pa]	Referenční hodnota akustického tlaku
$p_s$	[kPa]	Statický tlak v době a místě měření
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Sledovaná plocha
$S_i$	[m <sup>2</sup> ]	Dílčí plošný obsah měřicí plochy přiřazený i-té poloze mikrofón
$\vec{u}$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Akustická rychlost
$u_0$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Referenční hodnota akustické rychlosti
$W$	[W]	Akustický výkon
$W_0$	[W]	Referenční hodnota akustického výkonu
$\alpha$	[-]	Součinitel útlumu
$\theta$	[°C]	Teplota vzduchu v době a místě měření
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	Hustota prostředí
$\rho_c$	[N.s.m <sup>-3</sup> ]	Charakteristická akustická impedance vzduchu v místě a době měření

## Úvod

Měření hladin akustického výkonu je jedno z nejdůležitějších měření při charakterizaci zdroje hluku. Vysoké hladiny hluku mohou mít negativní dopad na zdraví lidí v podobě poškození sluchu, či mít negativní dopad na životní prostředí. Proto je cílem výrobce snižovat hlučnost zařízení, které vyžadují lidskou obsluhu nebo jsou provozovány v místech obývaných lidmi.

K určení hladin akustického výkonu je možné dospět měřeními akustického tlaku, či měřeními akustické intenzity. Jednotlivé metody, jak dospět k hladinám akustického výkonu jsou normalizovány mezinárodními normami ISO. Pro dosažení správných a vzájemně srovnatelných výsledků měření je potřeba podle těchto norem postupovat.

Cílem této práce je seznámit se s metodami měření akustického výkonu, které jsou používány v akustických laboratořích fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni, a pro tyto metody navrhnout přípravky, které usnadní tato měření.

V současnosti se pro definování měřicí plochy používá sestava stojanů s umístěnými měřicími mikrofony, které se nastaví do pozic definovaných příslušnou normou. Tento postup je zdoluhavý a náročný na přesnost. Z toho vyplývá i základní požadavek na měřicí přípravek, a to snadná montáž a určení vzdálenosti měřicího mikrofону od měřeného zdroje hluku. Mezi další požadavky kladené na měřicí přípravek během návrhu jsou:

- Možnost měření podle mezinárodních norem ČSN EN ISO 3744, ČSN EN ISO 3745, ČSN EN ISO 3746
- Jednoduchá montáž měřicích mikrofonů na požadované pozice
- Konstrukce z lehkých materiálů, která je zároveň snadno rozebíratelná a přemístitelná
- Zanedbatelný vliv konstrukce přípravku na měření

# 1 Základní akustické veličiny

## 1.1 Akustická rychlost

Zdroj mechanického kmitání předává část své energie okolnímu prostředí. Pokud je okolní prostředí hmotné, dojde ke vzniku mechanického vlnění, které nazýváme zvuk. Rychlost oscilací částic kolem své rovnovážné polohy nazýváme akustická rychlost. Jedná se o vektorovou veličinu měnící svoji velikost a směr v čase:

$$\vec{u} = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} \cdot dt \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.1)$$

Pokud se částice prostoru vychylují ve směru šíření vlny, uvažuje se jako veličina s kladným smyslem, pokud půjde o výchylky proti směru šíření, bude tato veličina uvažována se záporným smyslem [1].

Kde:

$\rho$  hustota prostředí [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$p$  tlak [Pa]

$r$  směr pohybu částice, který je shodný se směrem šíření zvukové vlnoplochy [2]

Hladinu akustické rychlosti zjistíme ze vztahu:

$$L_u = 20 \log \frac{u}{u_0} \text{ [dB]} \quad (1.2)$$

Kde:

$u$  změřená akustická rychlost

$u_0$  referenční hodnota akustické rychlosti  $u_0 = 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

### 1.1.1 Rychlost šíření zvuku

Mechanické vlnění se šíří v hmotném prostoru rychlostí, kterou nazýváme rychlost šíření zvuku. Je nejčastěji udávána pro teplotu 20 °C. Vypočítá se podle vztahu:

$$c = k \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.3)$$

Kde:

$k$  konstanta

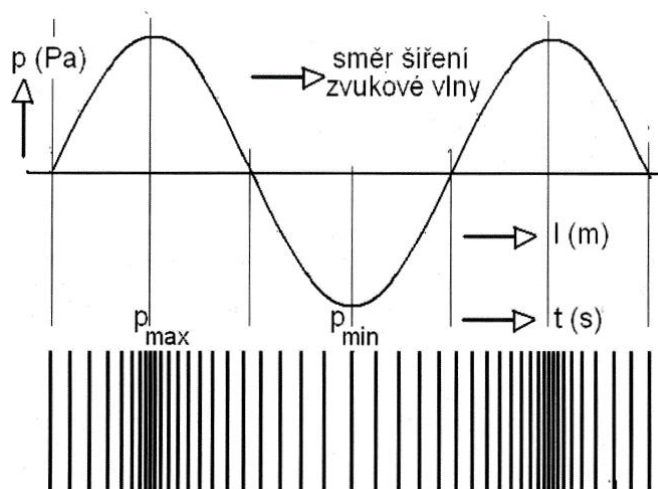
$E$  modul pružnosti prostředí [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

$\rho$  hustota prostředí [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

## 1.2 Akustický tlak

Je rozdíl mezi okamžitým tlakem a statickým tlakem [4]. Kmitáním částic okolo své rovnovážné polohy dochází v homogenním pružném prostředí ke změně hustoty částic, což je znázorněno na Obr. 1.1. Dochází tím ke změně tlaku vzduchu oproti statickému, barometrickému tlaku. Jedná se o skalární veličinu, protože nelze určit směr. Uvádí se jeho efektivní hodnota v pascálech [Pa].

$$p = \frac{F}{S} \quad [N \cdot m^{-2}, Pa] \quad (1.5)$$



**Obr. 1.1: Vznik akustické tlaku pohybem částic prostředí. Převzato z [2]**

Akustické veličiny popisující akustické pole tak k charakterizování zdrojů zvuku nebo akustických vlastností materiálů pro akustiku nabývají hodnot v rozsahu několika řádů [3]. Akustický tlak se může pohybovat od  $10^{-5}$  až po jednotky pascalů. Akustický výkon zdrojů se může pohybovat v rozpětí od  $10^{-9}$  do  $10^1$  W. V důsledku této široké škály hodnot bylo zavedeno hladinové vyjádření veličin, které vychází z logaritmu poměru dané veličiny s nějakou referenční hodnotou [3].

Hodnotu hladiny akustického tlaku zjistíme ze vztahu:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [dB] \quad (1.6)$$

Kde:

$p$  zjištěný akustický tlak

$p_0$  referenční hodnota akustického tlaku  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa

Referenční hodnota představuje nejmenší velikost změny tlaku, kterou lze lidským uchem zachytit při kmitočtu 1 kHz. Takto jsou podle mezinárodní úmluvy stanoveny i další referenční hodnoty tak, aby přibližně odpovídaly prahu slyšení pro dané veličiny pro 1 kHz. [3].

### 1.3 Akustická intenzita

Akustická intenzita je vektorová veličina. Popisuje tok akustické energie nebo výkonu jednotkovou plochou [2].

Okamžitá akustická intenzita je součinem akustického tlaku a akustické rychlosti:

$$\vec{i}(t) = p(t) \cdot \vec{u} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.7)$$

V praktické akustice se využívá veličina akustická intenzita, která je časovou střední hodnotou okamžité akustické intenzity [3]:

$$\vec{I} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \vec{i}(t) dt \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.8)$$

Při praktické realizaci bude limita nahrazena dostatečně dlouhým intervalem měření. Absolutní hodnotu akustické intenzity lze získat ze vztahu:

$$|I| = p \cdot u = \frac{p^2}{\rho \cdot c} = \frac{p_{ref}^2}{\rho \cdot c} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.9)$$

Kde:

$\rho \cdot c$  impedance prostředí, pro vzduch 20 °C je hodnota 407 Pa.s.m<sup>-1</sup> [2].

Hladinu akustické intenzity zjistíme ze vztahu:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [dB] \quad (1.10)$$

Kde:

$I$  zjištěná akustická intenzita

$I_0$  referenční hodnota akustické intenzity  $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Zjištění velikosti referenční hodnoty akustické intenzity je přibliženo u rovnice (1.6).

Vezmeme-li v úvahu vztah (1.8), jenž platí pro volné pole, snadno zjistíme, že:

$$L_I = L_p + 10 \log \frac{p_0^2}{I_0 \rho_0 c_0} = L_p + 10 \log \frac{400}{\rho_0 c_0} \quad [dB] \quad (1.11)$$

Kde:

$\rho_0 c_0$  je pro běžné klimatické podmínky rovno cca. 415,5 N.s.m<sup>-3</sup>, čemuž odpovídá rozdíl mezi hladinou akustického tlaku a akustické intenzity přibližně o 0,2 dB [3]

## 1.4 Akustický výkon

Je určující veličinou pro srovnání a hodnocení zdroje. Při hodnocení zdroje podle akustického tlaku může dojít ke zkreslení kvůli orientaci a vzdálenosti posluchače od zdroje, pohybem posluchače nebo zdroje, teplotou a rychlostí proudění prostředí, odrazivostí okolního prostředí a dalších. Akustický výkon je na těchto jevech nezávislý, je fyzikální vlastností zdroje [2]. Jednotkou akustického výkonu je watt [W].

Akustický výkon je akustická energie vyzářená zdrojem a šířená vzduchem za jednotku času [4]. Akustická energie je popsána akustickou intenzitou, která vyjadřuje směr a velikost toku akustické energie. Akustický výkon je dán vztahem:

$$W = \oiint_S \vec{I} \cdot \vec{n} dS \quad [W] \quad (1.12)$$

Čili dán skalárním součinem vektoru akustické intenzity a normálového vektoru plochy.

$$W = p \cdot \vec{u} \cdot S = \vec{I} \cdot S \quad [W] \quad (1.13)$$

Kde:

S sledovaná plocha [m<sup>2</sup>]

Hladinu akustického výkonu zjistíme ze vztahu:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [dB] \quad (1.14)$$

Kde:

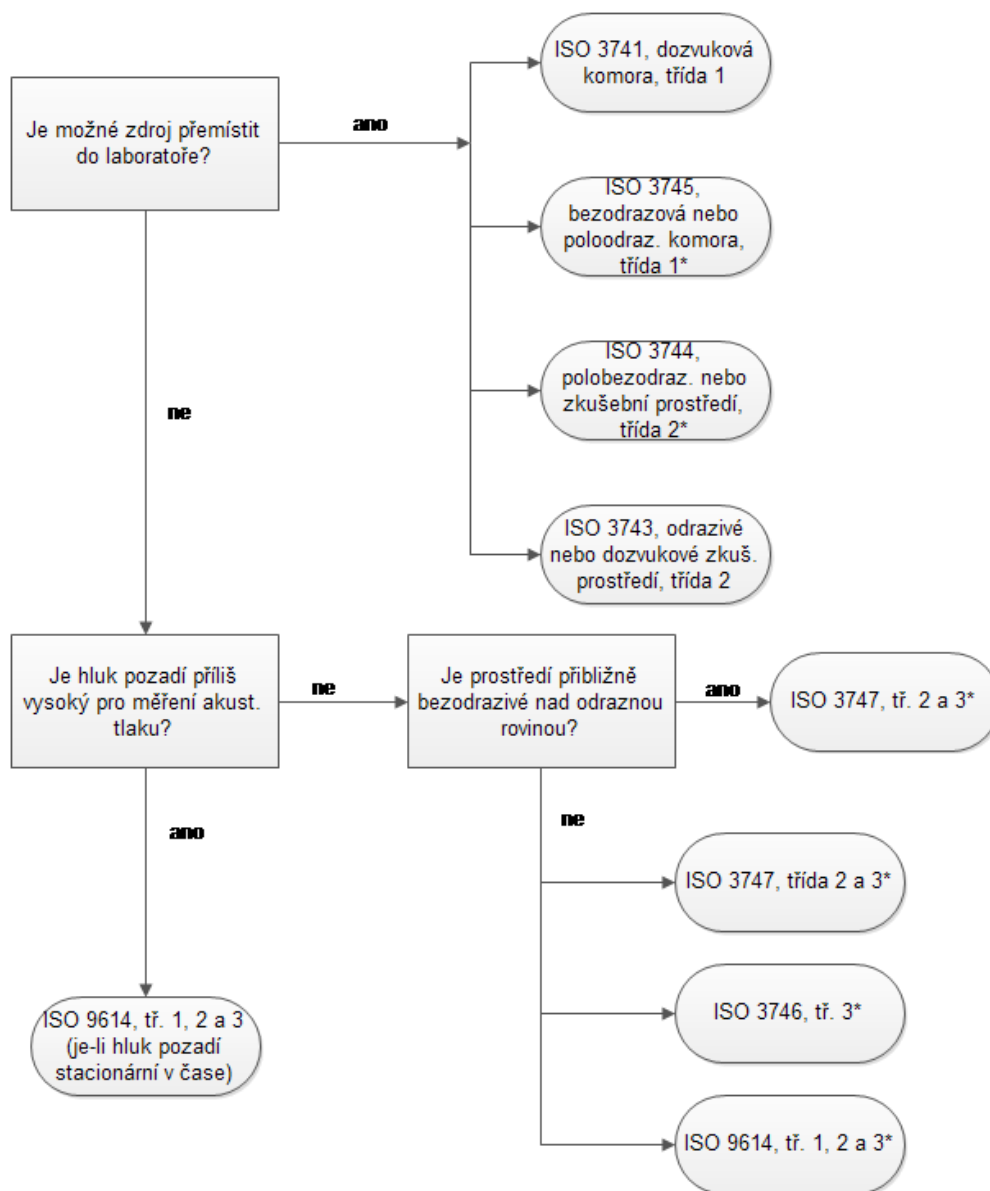
W zjištěný akustický výkon

W<sub>0</sub> referenční hodnota akustického výkonu W<sub>0</sub> = 1.10<sup>-12</sup> W

Zjištění velikosti referenční hodnoty akustického výkonu je přibliženo u rovnice (1.6).

## 2 Metody měření akustického výkonu

Pro dosažení správných a vzájemně srovnatelných výsledků měření je potřeba postupovat podle mezinárodních norem ISO. Pro měření akustického výkonu pomocí akustického tlaku je základní řada norem ČSN ISO 374X. Pro měření akustického výkonu pomocí akustické intenzity je základní řada norem ČSN ISO 9614-X. Základní norma je ČSN ISO 3740, ta uvádí přehled jednotlivých norem pro jednotlivé případy v závislosti na rozměrech a přemístitelnosti zdroje, jeho časové stálosti a především na prostředí, ve kterém se měří [3]. Volba vhodné metody je přibližena na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Volba měřicí metody pro stanovení akustického výkonu. Převzato z [3].



### 3 Měření akustického výkonu v bezodrazové komoře

Toto měření potřebuje pro svoji funkčnost volné pole, které je simulováno bezodrazovou komorou nebo bezodrazovou komorou s tvrdou podlahou. Ve volném poli platí vztah (1.9) a vektor akustické intenzity má směr vnější normály ke kulové (nebo polokulové) měřicí ploše, v jejímž středu se nachází zkoušený zdroj. Kulová plocha se rozdělí na části o plochách  $S_i$  a uprostřed každé se změří akustický tlak  $p_i$ . Akustický výkon daný vztahem (1.12) je pak aproximován [3]:

$$W \approx \sum_{i=1}^N \frac{p_i^2}{\rho_0 c_0} S_i \quad [dB] \quad (3.1)$$

Kde:

N      počet dílčích měřících ploch

Jednotlivé metody měření akustického výkonu ve volném poli jsou důkladně popsány v normách. Rozdíly mezi jednotlivými metodami tkví v nárocích na měřicí prostředí (hluk v pozadí, volné pole atd.), tvar měřicí plochy, počet měřících mikrofonů atd. Tato kapitola zpracovává především normu pro přesné metody určování hladin akustického výkonu pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti [5].

#### 3.1 Referenční meteorologické podmínky

Pro účely výpočtu hladin akustického výkonu odpovídají referenční meteorologické podmínky referenční charakteristické akustické impedanci  $\rho c = 415,5 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ . Referenční meteorologické podmínky tedy jsou:

- 1) Teplota vzduchu:      23,0 °C
- 2) Statický tlak:          101,325 kPa
- 3) Relativní vlhkost:    50%

#### 3.2 Měřicí plocha a rozmístění měřících bodů

Pro určení hladin akustického výkonu podle mezinárodní normy ČSN EN ISO 3745 se používá kulová či polokulová měřicí plocha. K získání hladin akustického tlaku je možno použít jedno z následujících uspořádání mikrofonů na měřicí ploše:

- Pevné polohy pro měření na kulové či polokulové měřicí ploše
- Souosé kruhové dráhy v rovnoběžných rovinách na kulové či polokulové ploše
- Poledníkové dráhy posuvu na kulové či polokulové ploše
- Spirálová dráha na kulové či polokulové ploše

Pro měření hladin akustického výkonu lze použít i jiná uspořádání mikrofonů a měřících ploch. Účelem jejich použití je především zvýšení přesnosti a ne jednoduché snížení počtu poloh mikrofonů, nebo jiný ústupek v konfiguraci normou stanovených rozložení. Při použití jiné konfigurace mikrofonů a jiné měřící plochy se musí prokázat, že rozdíl mezi hladinami akustického výkonu v třetinooktávových pásmech sledovaného frekvenčního rozsahu a těmi, jenž byly určeny při jednom z norem stanovených uspořádání v žádném pásmu nepřekročí  $\pm 0,5$  dB. Dále musí alternativní měřící plocha úplně obklopovat zdroj.

### 3.3 Doba měření hladin akustického tlaku

Hladiny časově průměrovaného akustického tlaku zkoušeného zdroje  $L'_{pi(ST)}$  se musí určit v každé poloze mikrofonu nebo pro každou dráhu posuvu mikrofonu za typickou pracovní periodu zdroje a pro každý vybraný pracovní režim. Pokud jsou v jednotlivých polohách mikrofonu hladiny akustického tlaku proměnné v čase, je potřeba důkladně vybrat časový interval pozorování a zvolený interval se uvede v protokolu o zkoušce. Pro frekvenční pásma o střední frekvenci 160 Hz a nižší musí být doba pozorování minimálně 30 s. Pro frekvenční pásma o střední frekvenci 200 Hz a vyšší musí být doba pozorování minimálně 10 s. Při použití pohybujícího se mikrofonu musí být doba integrování dána počtem úplných drah posuvu a musí zahrnovat minimálně dvě celé dráhy posuvu.

Těsně před nebo ihned po měření hladin akustického tlaku měřeného zdroje zvuku se musí provést měření hladiny akustického tlaku na pozadí  $L_{pi(B)}$ . Toto měření musí proběhnout v každé poloze mikrofonu nebo mikrofonem pohybujícím se po dráze za stejný časový interval měření, který byl použit pro měřený zdroj zvuku.

Korekce na hluk na pozadí se spočítá podle vztahu:

$$K_{1I} = -10 \log(1 - 10^{-0,1\Delta L_{PI}}) [dB] \quad (3.2)$$

Kde:

$$\Delta L_{PI} = L'_{pi(ST)} - L_{pi(B)}$$

$L'_{pi(ST)}$  hladina časově průměrovaného akustického tlaku se zapnutým zdrojem hluku [dB]

$L_{pi(B)}$  hladina časově průměrovaného akustického tlaku na pozadí [dB]

Korekce na hluk na pozadí se rovná nule, pokud je  $\Delta L_{PI} \geq 15$  dB.

Korekci na hluk počítáme podle vzorce (3.2) v případě, že  $\Delta L_{PI} = (6 \text{ dB}, 15 \text{ dB})$  pro třetinooktávová pásma se středními frekvencemi 200 Hz a nižšími a 6300 Hz a vyššími.

Korekci na hluk počítáme podle vzorce (3.2) v případě, že  $\Delta L_{PI} = (10 \text{ dB}, 15 \text{ dB})$  pro třetinooktávová pásma se středními frekvencemi od 2500 Hz do 5000 Hz.

$K_{1I} = 1,26 \text{ dB}$  v případě, že  $\Delta L_{PI} < 6 \text{ dB}$  pro jedno nebo více třetinooktávových pásem se středními frekvencemi 200 Hz a nižšími a 6300 Hz a vyššími.

$K_{1I} = 0,46$  dB v případě, že  $\Delta L_{PI} < 10$  dB pro jedno nebo více třetinooktávových pásem se středními frekvencemi od 2500 Hz do 5000 Hz.

### 3.4 Výpočet hladin časově průměrovaného akustického tlaku na ploše

Zvolený výpočet závisí na tom, zda má měřicí plocha dílčí oblasti o shodných plošných obsazích, či nemá.

#### 3.4.1 Měřicí plocha, která má dílčí oblasti se shodným plošným obsahem

V případě měřicí plochy, která má k pevným polohám mikrofonu nebo ke kruhovým dráhám mikrofonu přiřazené dílčí oblasti o shodném plošném obsahu, se hladina časově průměrovaného akustického tlaku na ploše  $\bar{L}_p$  musí vypočítat podle rovnice:

$$\bar{L}_p = 10 \log \left[ \frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{0,1 L_{pi}} \right] [dB] \quad (3.3)$$

Kde:

$$L_{pi} = L'_{pi(ST)} - K_{1I}$$

$N_M$  počet poloh mikrofonů

#### 3.4.2 Měřicí plocha, která nemá dílčí oblasti se shodným plošným obsahem

V případě měřicí plochy, která má k pevným polohám mikrofonu nebo ke kruhovým dráhám mikrofonu přiřazené dílčí oblasti o neshodných plošných obsazích, se hladina časově průměrovaného akustického tlaku na ploše  $\bar{L}_p$  musí vypočítat podle rovnice:

$$\bar{L}_p = 10 \log \left[ \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_M} S_i \times 10^{0,1 L_{pi}} \right] [dB] \quad (3.4)$$

Kde:

$$L_{pi} = L'_{pi(ST)} - K_{1I}$$

$S_i$  dílčí plošný obsah měřicí plochy přiřazený i-té poloze mikrofonu [m<sup>2</sup>]

$S$  plošný obsah celé měřicí plochy [m<sup>2</sup>]

$N_M$  počet poloh mikrofonu.

#### 3.4.3 Kruhové dráhy mikrofonu

Pokud k určení použijeme mikrofon pohybující se podél kruhových drah, jež jsou specifikovány v normě, získá se hladina akustického tlaku na ploše  $\bar{L}_p$  pomocí rovnice (3.3), kde  $L_{pi}$  je průměrná hladina akustického tlaku na i-té dráze.

### 3.4.4 Poledníkové nebo spirálové dráhy mikrofonu

Pokud se mikrofon pohybuje po poledníkové nebo spirálové dráze posuvu (viz kapitola 3.2), určí se hladina časově průměrovaného akustického tlaku na ploše  $\overline{L}_p$  kvadratické a průměrováním výstupu mikrofonu a přiřazením vhodného váhového činitele k plošným obsahům povrchu koule.

### 3.5 Výpočet hladiny akustického výkonu v bezodrazové komoře

Ve volném akustickém poli se hladina akustického výkonu  $L_W$  v každém sledovaném frekvenčním pásmu nebo vážená funkcí A za referenčních podmínek spočítá dle rovnice:

$$L_W = \overline{L}_p + 10 \log \left( \frac{S_1}{S_0} \right) \text{ dB} + C_1 + C_2 + C_3 \text{ [dB]} \quad (3.5)$$

Kde:

- $\overline{L}_p$  hladina časově průměrovaného akustického tlaku na ploše pro zkoušený zdroj [dB]  
 $S_0 = 1 \text{ m}^2$   
 $S_1$  plošný obsah měřicí plochy [ $\text{m}^2$ ]

#### 3.5.1 Výpočet korekcí $C_1$ , $C_2$ , $C_3$

Pro přesný výpočet se musí provést výpočet  $C_1$  – korekce na referenční veličiny,  $C_2$  – korekce na akustickou vyzařovací impedanci a  $C_3$  – korekce na pohltivost vzduchu na specifických frekvencích.

$C_1$  – korekce na referenční veličiny bere v úvahu rozdíly mezi referenčními veličinami použité pro výpočet hladiny akustického tlaku a hladiny akustického výkonu. Korekce je funkcí změny charakteristické akustické impedance vzduchu za meteorologických podmínek v době a místě měření.

$$C_1 = 10 \log \left[ \frac{p_0^2 S}{\rho c P_0} \right] \text{ dB} = -10 \log \frac{p_s}{p_{s,0}} + 5 \log \left[ \frac{(273 + \theta)}{\theta_1} \right] \text{ [dB]} \quad (3.6)$$

Kde:

- $p_0$  referenční akustický tlak [Pa]  
 $\rho c$  charakteristická akustická impedance vzduchu v místě a době měření [ $\text{N.s.m}^{-3}$ ]  
 $P_0$  referenční akustický výkon [W]  
 $p_s$  statický tlak v době a místě měření [kPa]  
 $p_{s,0}$  referenční statický tlak 101,325 kPa  
 $\theta$  teplota vzduchu v době a místě měření [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\theta_0 = 314 \text{ K}$ , teplota, kdy je statický tlak roven  $p_{s,0}$ , při které mají akustická intenzita a akustický tlak totožné hodnoty v dB, pokud se měří v rovinné vlně

$$\theta_1 = 296 \text{ K}$$

$C_2$  – korekce na akustickou vyzařovací impedanci převádí aktuální akustický výkon za meteorologických podmínek v době a místě měření na akustický výkon za referenčních meteorologických podmínek. Hodnota se musí získat z příslušného zkušební předpisu pro hluk. Pokud ale zkušební předpis pro hluk neexistuje, pak tato rovnice platí pro zdroj typu monopól a pro další zdroje je střední hodnotou [6,7].

$$C_2 = -10 \log \frac{p_s}{p_{s,0}} + 15 \log \left[ \frac{(273 + \theta)}{\theta_1} \right] \text{ [dB]} \quad (3.7)$$

Kde:

$p_0$  referenční akustický tlak [Pa]

$\rho c$  charakteristická akustická impedance vzduchu v místě a době měření [ $\text{N.s.m}^{-3}$ ]

$\theta$  teplota vzduchu v době a místě měření [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\theta_1$  296 K

$C_3$  – korekce na pohltivost na specifických frekvencích [9] se vypočítá podle vzorce:

$$C_3 = A_0(1,0053 - 0,0012A_0)^{1,6} \text{ [dB]} \quad (3.8)$$

Kde:

$A_0$  číselná hodnota  $\alpha(f)r$ , kde  $\alpha(f)$  je součinitel útlumu pro specifickou teplotu, vlhkost, statický tlak jako funkce frekvence<sup>1</sup>,  $r$  je měřicí poloměr. [ $\text{dB.m}^{-1}$ ]

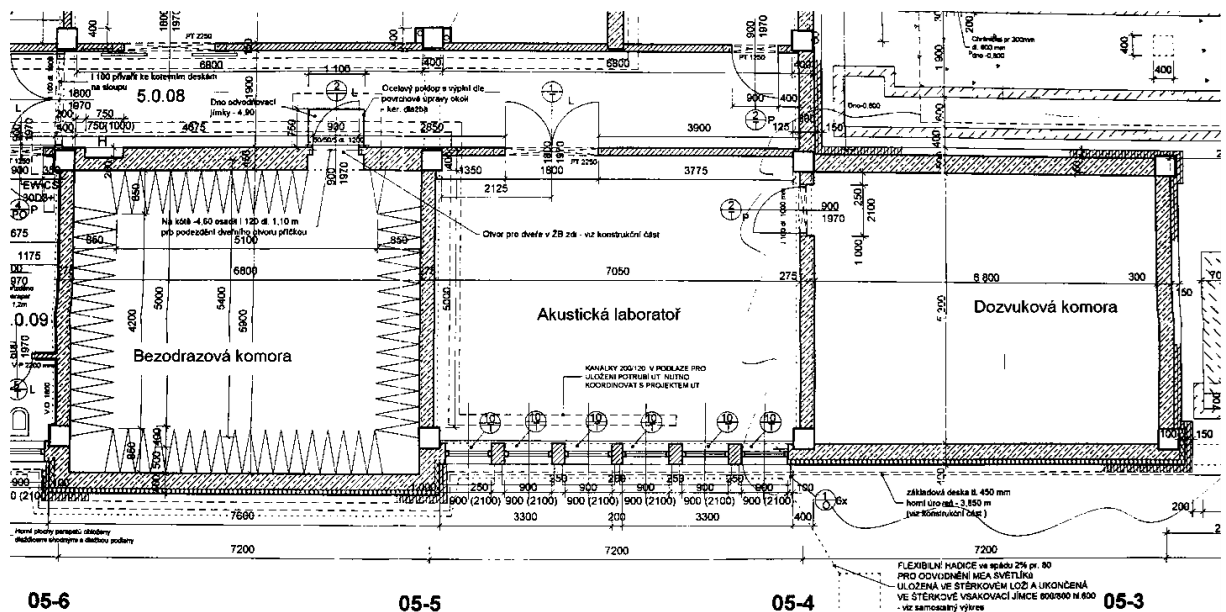
---

<sup>1</sup> Podle rovnic (3) až (5) uvedených v normě ISO 9613-1:1993

## 4 Akustické laboratoře na FEL

Akustické komory se používají při akustickém měření především z důvodu zjednodušení definování zvukového pole. Jejich cíl je přiblížit se vlastnostem volného nebo difúzního pole, pro které lze popsat vztah mezi akustickým tlakem a akustickým výkonem. Dalším důvodem stavby těchto speciálních komor je odrušení hluku z okolního prostředí.

Akustické laboratoře Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni disponují bezdrazovou komorou, dozvukovou komorou a akustickou laboratoří fungující jako obslužná místnost a výuková laboratoř.



Obr. 4.1: Půdorys akustických laboratoří FEL

Akustická laboratoř dále disponuje tímto vybavením:

- Analyzátor Brüel & Kjaer PULSE
- Ruční zvukoměry Brüel & Kjaer 2260 a 2231
- Mikrofony pro volné a difúzní pole
- Sondy pro měření akustické intenzity Brüel & Kjaer 3599

Akustické laboratoře se zabývají měřením hlučnosti zařízení, frekvenční analýzou zvuku, měřením akustického výkonu, lokalizací zdroje zvuku, měřením vibrací, elektroakustikou a stavební akustikou<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Akustika a vibrace. *RICE - Regionální inovační centrum elektrotechniky* [online]. Plzeň [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <https://www.rice.zcu.cz/cz/services/acustics/>

#### 4.1 Bezodrazová komora

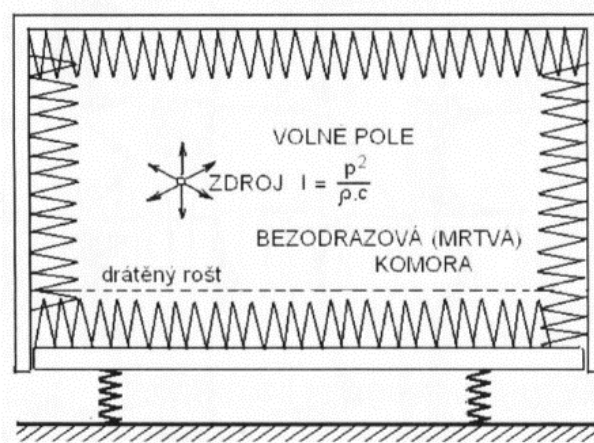
Tato komora se používá z několika důvodů:

- Dosažení volného akustického pole, kdy měření akustického výkonu probíhá ve volném akustickém poli a není ovlivněno odraženou akustickou vlnou.
- Disipace akustické energie, kdy se akustická energie mění v obkladu stěn na energii tepelnou.
- Snížení hluku pozadí na požadovanou úroveň, protože hluk pozadí má zásadní vliv při měření tichých zdrojů zvuků.

Volného akustického pole se dosahuje použitím pohltivých obkladů stěn, stropu a podlahy v podobě klínů nebo jehlanů. K útlumu zvuku zde dochází častými odrazy od šikmých stěn jehlanů při současném pohlcování akustické energie materiálem, ze kterých jsou vyrobeny [2]. Tyto akustické klíny jsou vyrobeny z vysoce absorpčních materiálů, u kterých činitele pohlcení  $\alpha$  dosahuje takřka 0,99 [10]. Materiály s takto vysokou hodnotou činitele pohlcení  $\alpha$  jsou zpravidla porézní materiály. Tvar a velikost klínů stejně jako velikost komory ovlivňuje měřitelné kmitočtové pásmo bezodrazové komory. Používají se akustické klíny, jejichž délka je  $\frac{1}{4}$  vlnové délky spodní frekvence. Například pro dolní mezní frekvenci 100 Hz se používají klíny s délkou 915 mm [10]. Útlum na nízkých frekvencích je totiž větší, čím rozměrnější je místnost a čím delších jehlanů je pro obklad použito [2].

Hluk a vibrace z vnějšího prostředí se omezují konstrukcí komory systémem „dům v domě“. Na vnější stěny, strop a podlahu jsou použity těžké cihly a beton, které zabraňují průniku okolního hluku do komory. Vnitřní komora je odpružena pro snížení vibrací.

Instalaci akustických klínů na vnější zeď bez nutnosti stavby vnitřní místnosti je možná v prostorech s dostatečně nízkou hladinou hluku na pozadí.



Obr. 4.2: Příklad bezodrazové komory. Převzato z [2]

Kvalita, chování a způsobilost bezodrazové komory pro měření akustického výkonu se posuzuje srovnáním prostorového poklesu akustického tlaku vyzařovaného zkoušeným

zdrojem s poklesem akustického tlaku se vzdáleností od zdroje v souladu se zákonem poklesu akustického tlaku, ke kterému dochází ve skutečném volném poli [5].

#### 4.1.1 Bezodrazová komora na FEL



**Obr. 4.3: Bezodrazová komora FEL ZČU<sup>3</sup>**

Bezodrazová komora je součástí akustických laboratoří. Zdi, strop i podlaha je pokryta absorpčními klíny z materiálu ORSIL o délce 850 mm. V komoře je celkem 5550 absorpčních klínů. Podlaha je realizována zvukově transparentní drátovou sítí.

Bezodrazová komora má dále níže uvedené vlastnosti:

- Dolní mezní frekvence: 90 Hz
- Splňuje požadavky: ČSN EN ISO 3745
- Světlé rozměry komory: 5 m x 4 m x 6,4 m
- Regulace teploty: 21 – 30 °C
- Objem komory: 128,3 m<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Dny otevřených dveří FEL. *Západočeská univerzita - Fakulta elektrotechnická* [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://old.fel.zcu.cz/dod.aspx>



## 5 Přípravky pro měření akustického výkonu v bezodrazové komoře využívané v současnosti

Pro dosažení správných a vzájemně srovnatelných výsledků měření je potřeba postupovat podle platných mezinárodních norem ISO, které definují přesné rozmístění měřících mikrofonů na měřící ploše. Toho lze dosáhnout několika způsoby.

Buď se mikrofony umístí do stojanů, jež se nastaví do požadované pozice. Tento proces je zdoluhavý a především u přesné laboratorní metody<sup>4</sup> je požadavek na velký počet měřících bodů.

Proto si některé příslušné akustické laboratoře navrhnu a realizují přípravek, který tento proces usnadňuje a urychluje. Další výhodou takovýchto řešení je možnost udělat je univerzální pro různé druhy měření a tyto měřící systémy plně zautomatizovat. Řešení jsou často unikátní a akustické laboratoře si tento svůj přípravek chrání licencí nebo jiným prostředkem.

Dále v této kapitole budou uvedeny a znázorněny přípravky, které se v praxi používají pro měření akustického výkonu v bezodrazové komoře.

### 5.1 Akustické laboratoře ve OE Sciencetech Co., Ltd. - Čína



Toto zařízení je určeno pro použití v polobezodrazové komoře. Pomocí nastavitelných ramen lze libovolně upravit poloměr měřící polokoule. Taktéž je možno nastavit libovolnou měřící plochu.

Obr. 5.1: Přípravek společnosti OE Sciencetech Co., Ltd.<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> ČSN EN ISO 3745

<sup>5</sup> Anechoic chamber, semianechoic chamber and the reverberation chamber. *OE sciencetech CO., Ltd.* [online]. 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.oe.com.tw/pagelvb2.php?lv=2&idept=1>

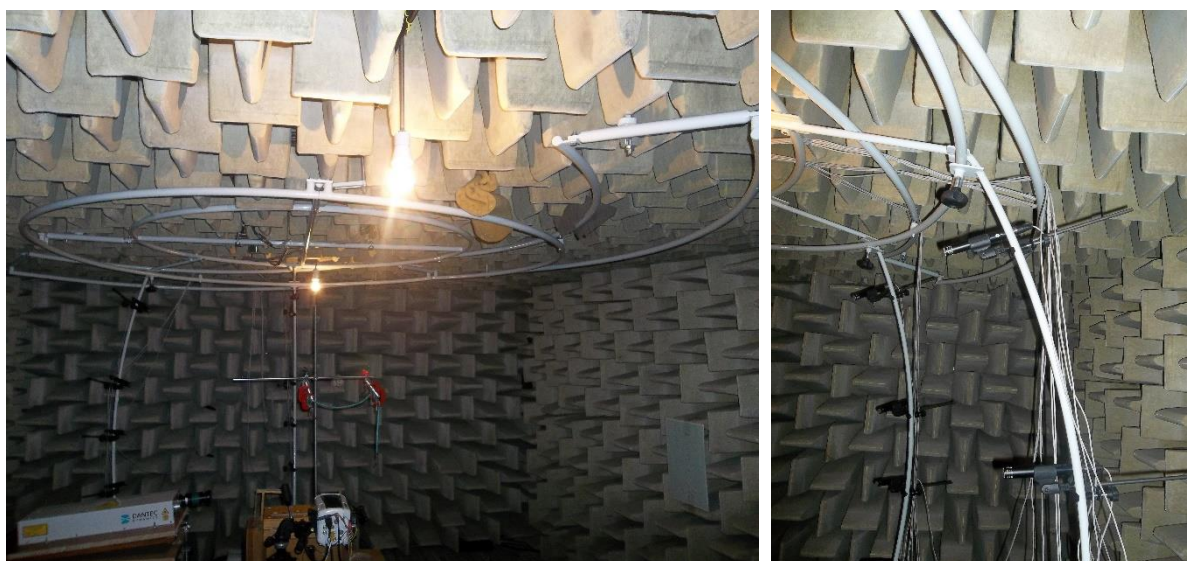
## 5.2 Akustické laboratoře ve Feng Chia University –Taiwan



Měřicí systém se nachází v polobezodrazové komoře univerzity Feng Chia v Taiwanu. Umožňuje měřit akustický výkon na měřicím ploše ve tvaru polokoule o různém poloměru.

Obr. 5.2: Přípravek ve Feng Chia University<sup>6</sup>

## 5.3 Akustické laboratoře patřící Hudební a taneční fakultě AMU



Obr. 5.3: Aktuální přípravek používaný v Hudební a taneční fakultě AMU

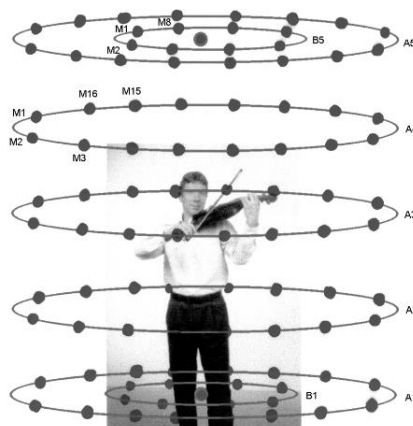
Bezodrazová komora se nachází v akustických laboratořích HAMU pod vedením ing. Zdeňka Otčenáška, Ph.D. Komora má rozměry 5,26 x 3,75 x 2,25 m. Dolní mezní frekvence je 125 Hz.

Současný přípravek umožňuje použít měřicí plochu ve tvaru polokoule a válce o několika poloměrech při splnění ČSN EN ISO 3745. Tento systém, jehož návrh i realizace pochází z akustických laboratořích HAMU, je licencovaný.

---

<sup>6</sup> Anechoic Chamber Introduction. *Feng Chia University -Taiwan* [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.sportscenter.fcu.edu.tw>

Dřívější přípravek fungoval na principu pomocné konstrukce ve tvaru kruhu, na niž byly připevněny mikrofony, a následně byla nastavována do požadované výšky. Tento přípravek používal měřící plochu ve tvaru válce. Vizualizace poloh mikrofону a poloh přípravku je znázorněno na Obr. 5.4.



Obr. 5.4: Předchozí přípravek používaný v Hudební a taneční fakultě AMU<sup>7</sup>

#### 5.4 Akustické laboratoře ve RWTH Aachen University – Německo



Tato konstrukce se nachází v Institutu technické akustiky Technické univerzity v Cáchách v Německu.

System je určen pro použití v bezodrazové komoře a slouží k měření akustických parametrů hudebních nástrojů, jako je vyzařovaný akustický výkon a směrovost. Kulová konstrukce je vyrobena z 90 tyčí ze skelných vláken, díky kterým je konstrukce dostatečně robustní a přitom lehká. Na kulové měřící ploše o průměru 4,2 metrů je celkem 32 měřících mikrofónů [16].

Obr. 5.5: Měřící přípravek v ITA - RWTH Aachen University. Převzato z [16]

<sup>7</sup> JAKEŠ, V. a Z. OTČENÁŠEK. Šestnáctikanálový záznam zvuku hudebních nástrojů. In: *Sborník 60. akustického semináře a 36. akustické konference*. Kouty, 2000, s. 30-33. ISBN 80-01-02179-3.



## 5.5 Akustické laboratoře v Brigham Young University – USA

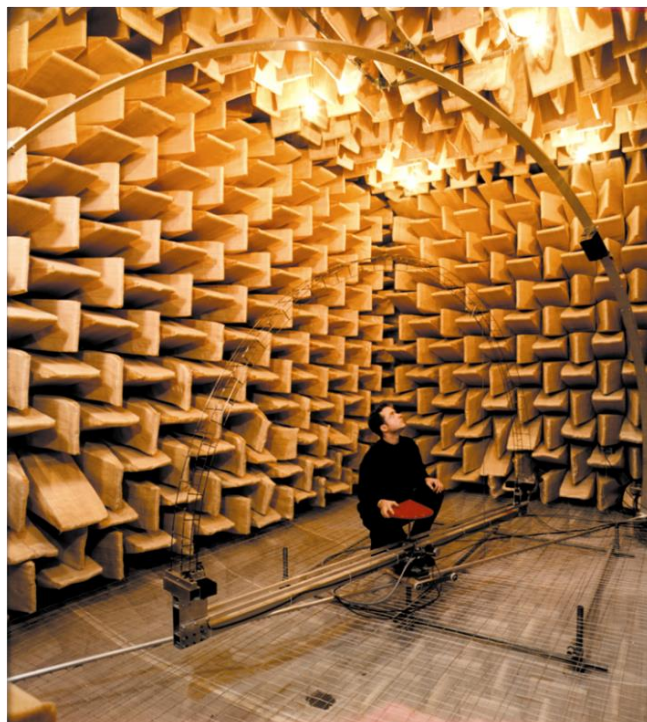


Akustické laboratoře v Brigham Young University jsou vybaveny dvěma bezodrazovými komorami. Velká bezodrazová komora má rozměry 8,71 x 5,66 x 5,74 m a dolní mezní frekvence je 80 Hz. Malá bezodrazová komora má rozměry 3 x 2,38 x 2,59 m a dolní mezní frekvence je 150 Hz [11].

Měřicí systém zachycený na Obr. 7.6 se nachází ve velké bezodrazové komoře. Jedná se o polokulové mikrofonní pole s automatizovaným otáčejícím se stojanem pro měřený vzorek.

Obr. 5.6: Měřicí systém ve Brigham Young University. Převzato z [11]

## 5.6 Akustické laboratoře v University of Salford, Manchester – Velká Británie

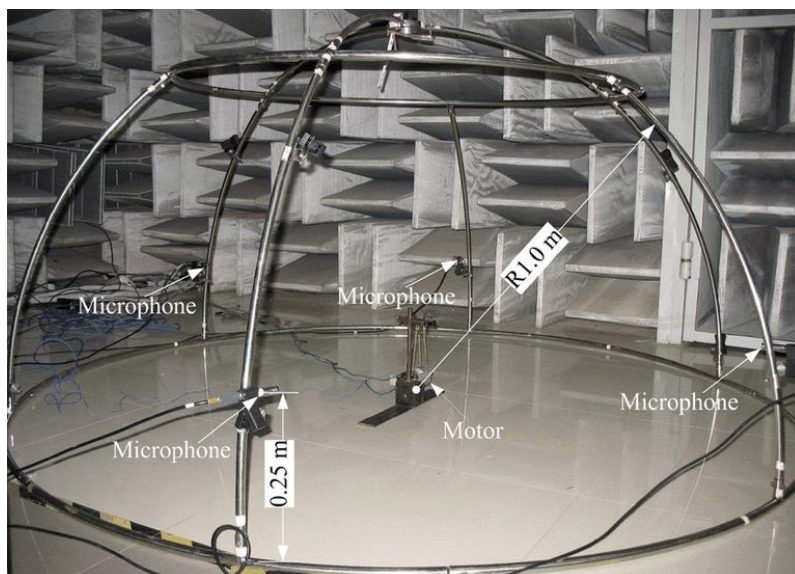


Akustické laboratoře patřící University of Salford mají k dispozici bezodrazovou komoru, dvě polobezodrazové komory a dozvukovou komoru. Systém se nachází v bezodrazové komoře o rozměrech 5,4 x 4,1 x 3,3 m. Dolní mezní frekvence je 100 Hz [12].

Měřicí systém umožňuje měřit hladinu akustického výkonu podle série norem BS ISO 374X.

Obr. 5.7: Měřicí systém v University of Salford, Manchester. Převzato z [12]

## 5.7 Akustická laboratoř v School of Electronic, Information, and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University – Čína






Tento přípravek byl použit v polobezodrazové komoře o rozměrech 8,4 x 6,2 x 4,8 m s dolní mezní frekvencí 120 Hz. Jeho účelem bylo změřit hladiny akustického tlaku, jež produkoval stejnosměrný motor s permanentními magnety s vystředěným rotorem [13].

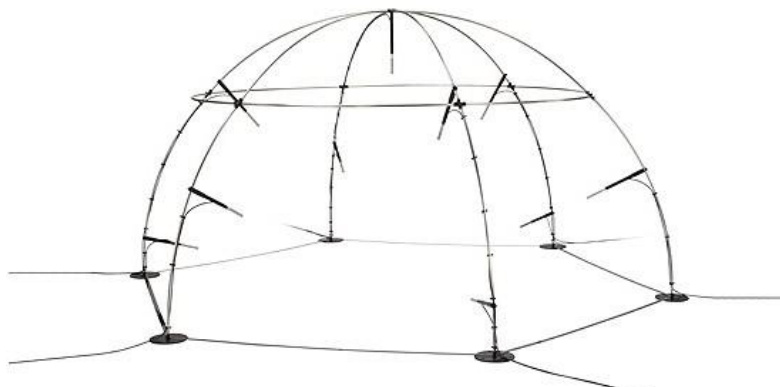
Obr. 5.8: Přípravek používaný v School of Electronic, Information and Electrical Engineering. Převzato z [13]

## 5.8 Komerční řešení od společnosti G.R.A.S. Sound & Vibration A/S

Dánská firma G.R.A.S. Sound & Vibration A/S nabízí polokulovou strukturu, kterou lze snadno sestavit i rozmontovat. Tato sestava vyhovuje mezinárodním normám ISO 3744, ISO 3745 a ISO 3746. Kompletní přehled všech variant souprav včetně dodávaného příslušenství je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 5-I: Nabídka různých variant. Převzato z [14]

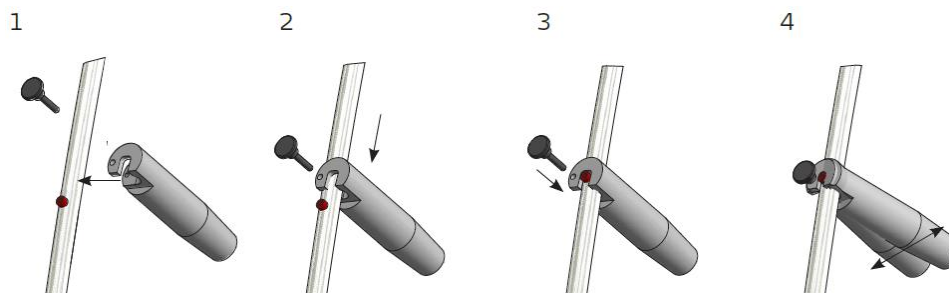
Microphone Sets	ISO 3746:2010 ANSI S12.56 4 Channels	ISO 3744:2010 ANSI S12.54 10 Channels	ISO 3745:2012 ANSI S12.55 20 Channels
 <b>Frequency Range</b> 3.15 Hz – 20 kHz  <b>Dynamic Range</b> 17 dBA – 135 dB  <b>Sensitivity</b> 50 mV/Pa	1 m radius: <b>G.R.A.S. 67HA-04</b> 2 m radius: <b>G.R.A.S. 67HB-04</b>  <b>Including</b> 1x Hemisphere structure 4x G.R.A.S. 46AE 1/2" CCP Standard Microphone Sets, cables, holders	1 m radius: <b>G.R.A.S. 67HA-05</b> 2 m radius: <b>G.R.A.S. 67HB-05</b>  <b>Including</b> 1x Hemisphere structure 10x G.R.A.S. 46AE 1/2" CCP Standard Microphone Sets, cables, holders	1 m radius: <b>G.R.A.S. 67HA-06</b> 2 m radius: <b>G.R.A.S. 67HB-06</b>  <b>Including</b> 1x Hemisphere structure 20x G.R.A.S. 46AE 1/2" CCP Standard Microphone Sets, cables, holders
 <b>Frequency Range</b> 3.15 Hz – 20 kHz  <b>Dynamic Range</b> 17 dBA – 146 dB  <b>Sensitivity</b> 50 mV/Pa	1 m radius: <b>G.R.A.S. 67HA-01</b> 2 m radius: <b>G.R.A.S. 67HB-01</b>  <b>Including</b> 1x Hemisphere structure 4x G.R.A.S. 46AF 1/2" LEMO Standard Microphone Sets, cables, holders	1 m radius: <b>G.R.A.S. 67HA-02</b> 2 m radius: <b>G.R.A.S. 67HB-02</b>  <b>Including</b> 1x Hemisphere structure 10x G.R.A.S. 46AF 1/2" LEMO Standard Microphone Sets, cables, holders	1 m radius: <b>G.R.A.S. 67HA-03</b> 2 m radius: <b>G.R.A.S. 67HB-03</b>  <b>Including</b> 1x Hemisphere structure 20x G.R.A.S. 46AF 1/2" LEMO Standard Microphone Sets, cables, holders
 <b>Frequency Range*</b> 6 Hz – 20 kHz  <b>Dynamic Range</b> 6.5 dBA – 113 dB  <b>Sensitivity</b> 900 mV/Pa	1 m radius: <b>G.R.A.S. 67HA-07</b> 2 m radius: <b>G.R.A.S. 67HB-07</b>  <b>Including</b> 1x Hemisphere structure 4x G.R.A.S. 40HL 1/2" LEMO Low-noise Microphone Sets, cables, holders	1 m radius: <b>G.R.A.S. 67HA-08</b> 2 m radius: <b>G.R.A.S. 67HB-08</b>  <b>Including</b> 1x Hemisphere structure 10x G.R.A.S. 40HL 1/2" LEMO Low-noise Microphone Sets, cables, holders	1 m radius: <b>G.R.A.S. 67HA-09</b> 2 m radius: <b>G.R.A.S. 67HB-09</b>  <b>Including</b> 1x Hemisphere structure 20x G.R.A.S. 40HL 1/2" LEMO Low-noise Microphone Sets, cables, holders



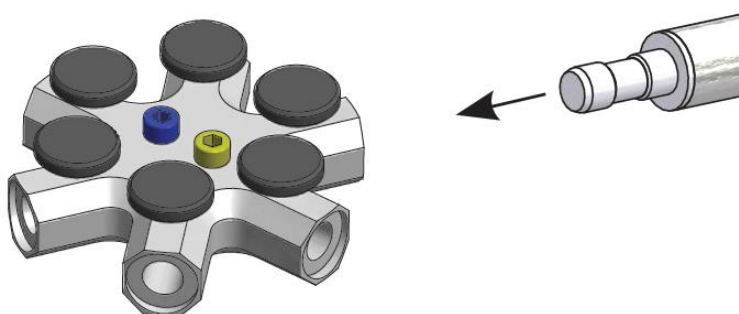
**Obr. 5.9: Polokulový set G.R.A.S. 67HA-05.  
Převzato z [14]**

Polokulová struktura je složena z ohnutých profilů. Každý profil je vybaven speciální koncovkou pro snadnou montáž do spojovacích prvků. Dále jsou vybaveny upevňovacím systémem, který umožňuje připevnit mikrofon do správné pozice. Tento systém je znázorněn na Obr. 5.9. Každý set obsahuje pozice pro všechny použité normy.

Horní propojovací díl umožňuje propojit všechny profily a vrchní měřící mikrofon, jehož použití je požadováno v normách<sup>8</sup>, je znázorněn na Obr. 5.10. Jednotlivé sady se od sebe liší použitým měřicím poloměrem, dodávaným příslušenstvím a typem konektoru, které měřící mikrofony používají.



**Obr. 5.10: Systém upevnění mikrofonů. Převzato z [14]**



**Obr. 5.11: Horní propojovací díl. Převzato z [15]**

<sup>8</sup> ČSN EN ISO 3744, ČSN EN ISO 3746



## 6 Požadavky na měřicí přípravky

### 6.1 Cíle návrhu

Navrhovaný přípravek by měl splňovat následující kritéria:

- Snadné určení vzdálenosti měřících mikrofonů od měřeného vzorku
- Jednoduchá montáž měřících mikrofonů na požadované pozice
- Konstrukce z lehkých materiálů, která je zároveň snadno rozebíratelná a přemístitelná
- Zanedbatelný vliv konstrukce přípravku na měření
- Měření bude v souladu s mezinárodními normami: ČSN EN ISO 3744, ČSN EN ISO 3745, ČSN EN ISO 3746

### 6.2 Požadavky na měřicí plochu

Každá norma specifikuje požadavky na tvar a velikost hypotetické plochy, na které se nacházejí pozice nebo dráhy měřících mikrofonů.

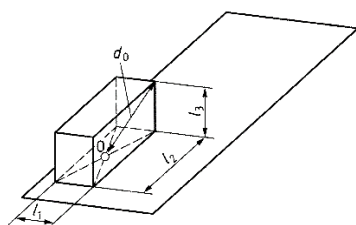
Tvar měřicí plochy, jež je společná pro všechny požadované normy, je polokoule. Níže budou uvedeny požadavky jednotlivých norem na tuto měřicí plochu.

#### 6.2.1 Referenční obalová plocha

Pro usnadnění výběru tvaru a rozměrů měřicí plochy se používá referenční obalová plocha. Referenční obalová plocha je určena povrchem nejmenšího hypotetického kvádru, který přesně uzavírá zkoušený zdroj. Při určování rozměrů referenční obalové plochy je možné zanedbat vyčnívající části, jež nevyzařují významnou část zvuku[4].

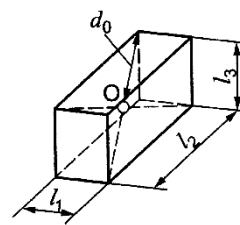
Umístění referenční plochy, měřicí plochy a pozic mikrofonů pro měření je určeno s ohledem na souřadnicový systém s počátkem 0 v rovině podlahy, kde bod 0 je střed referenční obalové plochy.

Výpočet charakteristického rozměru zdroje  $d_0$  závisí počtu odrazivých rovin.



Referenční obalová plocha na jedné odrazivé rovině,  $d_0 = \sqrt{(l_1/2)^2 + (l_2/2)^2 + l_3^2}$

**Obr. 6.1: Referenční obalová plocha a výpočet  $d_0$  podle ČSN EN ISO 3744. Převzato z [4]**



bezodrazová místnost,  $d_0 = \sqrt{(l_1/2)^2 + (l_2/2)^2 + (l_3/2)^2}$

**Obr. 6.2: Referenční obalová plocha a výpočet  $d_0$  podle ČSN EN ISO 3745. Převzato z [5]**

### 6.2.2 Požadavky dané ČSN EN ISO 3744

Polokoule má střed v počátku souřadnic 0, měřicí poloměr  $r$  musí být větší nebo roven dvojnásobku charakteristickému rozměru zdroje  $d_0$ , ale zároveň nesmí být menší než 1 m a větší než 16m.

Pro malá zařízení je možné použít měřicí poloměr menší než 1 m, ale nesmí být menší než 0,5 m. Poloměr menší než 1 m může totiž způsobit omezení dolní části sledovaného frekvenčního pásma[4].

### 6.2.3 Požadavky dané ČSN EN ISO 3745

Polokoule má střed v počátku souřadnic 0, měřicí poloměr  $r$  musí splňovat všechny tyto podmínky:

- $r \geq 2d_0$ , kde  $d_0$  je charakteristický rozměr zdroje,
- $r \geq \lambda/4$ , kde  $\lambda$  je vlnová délka zvuku na nejnižší sledované frekvenci,
- $r \geq 1 \text{ m}$ .

V případě malých zdrojů s nízkým hlukem, jež se měří v omezeném rozsahu frekvencí, je dovolen měřicí menší než 1 m, nikoliv však menší než 0,5 m [5].

### 6.2.4 Požadavky dané ČSN EN ISO 3746

Polokoule musí mít střed v počátku souřadnic 0, měřicí poloměr  $r$  musí být větší nebo roven dvojnásobku charakteristickému rozměru zdroje  $d_0$ , ale zároveň nesmí být menší než 1 m a větší než 16m.

Pro malá zařízení je možné použít měřicí poloměr menší než 1 m, ale nesmí být menší než 0,5 m [15].

## 6.3 Požadavky na umístění měřících mikrofonů

Každá norma taktéž specifikuje počet poloh měřících mikrofonů a jejich preferované pozice.

### 6.3.1 Požadavky dané ČSN EN ISO 3744

Tato technická metoda s třídou přesnosti 2 má pro polokulovou měřicí plochu 10 hlavních pozic mikrofonů a 10 doplňkových pozic. Hlavní měřicí pozice jsou označeny čísly 1 až 10. Doplňková sestava pozic je označena čísly 11 až 20.

Souřadnice hlavních pozic jsou uvedeny v tabulce 6-I, souřadnice doplňkové sestavy jsou uvedeny v tabulce 6-II. Grafické znázornění pozic je v příloze B.



Tab. 6-I: Souřadnice hlavních pozic ČSN EN ISO 3744. Převzato z [4]

Poloha číslo	x/r	y/r	z/r
1	-0,99	0	0,15
2	0,5	-0,86	0,15
3	0,5	0,86	0,15
4	-0,45	0,77	0,45
5	-0,45	-0,77	0,45
6	0,89	0	0,45
7	0,33	0,57	0,75
8	-0,66	0	0,75
9	0,33	-0,57	0,75
10	0	0	1

Tab. 6-II: Souřadnice doplňkových pozic ČSN EN ISO 3744. Převzato z [4]

Poloha číslo	x/r	y/r	z/r
11	0,99	0	0,15
12	-0,5	0,86	0,15
13	-0,5	-0,86	0,15
14	0,45	-0,77	0,45
15	0,45	0,77	0,45
16	-0,89	0	0,45
17	-0,33	-0,57	0,75
18	0,66	0	0,75
19	-0,33	0,57	0,75
20	0	0	1

### 6.3.2 Požadavky dané ČSN EN ISO 3745

Tato přesná metoda s třídou přesností 1 má pro polokulovou měřicí plochu 20 hlavních pozic mikrofonů a 20 doplňkových pozic. Hlavní měřicí pozice jsou označeny čísly 1 až 20. Doplňková sestava pozic je označena čísly 20 až 40.

Souřadnice hlavních pozic jsou uvedeny v tabulce 6-III, souřadnice doplňkové sestavy jsou uvedeny v tabulce 6-IV. Grafické znázornění pozic je v příloze C.

Tab. 6-III: Souřadnice hlavních pozic ČSN EN ISO 3745. Převzato z [5]

Poloha	x/r	y/r	z/r
1	-1	0	0,025
2	0,499	-0,864	0,075
3	0,496	0,859	0,125
4	-0,492	0,853	0,175
5	-0,487	-0,844	0,225
6	0,961	0	0,275
7	0,474	0,82	0,325
8	-0,927	0	0,375
9	0,453	-0,784	0,425
10	0,88	0	0,475
11	-0,426	0,737	0,525
12	-0,409	-0,709	0,575
13	0,36	-0,676	0,625
14	0,369	0,639	0,675
15	-0,689	0	0,725
16	-0,316	-0,547	0,775
17	0,565	0	0,825
18	-0,242	0,419	0,875
19	-0,38	0	0,925
20	0,111	-0,192	0,975

Tab. 6-IV: Souřadnice vedlejší pozic ČSN EN ISO 3745. Převzato z [5]

Poloha	x/r	y/r	z/r
21	1	0	0,025
22	-0,499	0,864	0,075
23	-0,496	-0,859	0,125
24	0,492	-0,853	0,175
25	0,487	0,844	0,225
26	-0,961	0	0,275
27	-0,474	-0,82	0,325
28	0,927	0	0,375
29	-0,453	0,784	0,425
30	-0,88	0	0,475
31	0,426	-0,737	0,525
32	0,409	0,709	0,575
33	-0,36	0,676	0,625
34	-0,369	-0,639	0,675
35	0,689	0	0,725
36	0,316	0,547	0,775
37	-0,565	0	0,825
38	0,242	-0,419	0,875
39	0,38	0	0,925
40	-0,111	0,192	0,975

### Požadavky dané ČSN EN ISO 3746

Tato provozní metoda má třídu přesnosti 3. Na polokulové měřicí ploše má čtyři hlavní pozice mikrofonu označeny čísly 4, 5, 6, 10 a čtyři doplňující polohy mikrofonu s označením 14, 15, 16, 20. Souřadnice pozic jsou uvedeny v tabulkách 6-V a 6-VI a grafické znázornění je zobrazeno v příloze A.

Tab. 6-V: Souřadnice hlavních pozic ČSN EN ISO 3746. Převzato z [15]

Poloha číslo	x/r	y/r	z/r
4	-0,45	0,77	0,45
5	-0,45	-0,77	0,45
6	0,89	0	0,45
10	0	0	1

Tab. 6-VI: Souřadnice vedlejších pozic ČSN EN ISO 3746. Převzato z [15]

Poloha číslo	x/r	y/r	z/r
14	0,45	-0,77	0,45
15	0,45	-0,77	0,45
16	-0,89	0	0,45
20	0	0	1

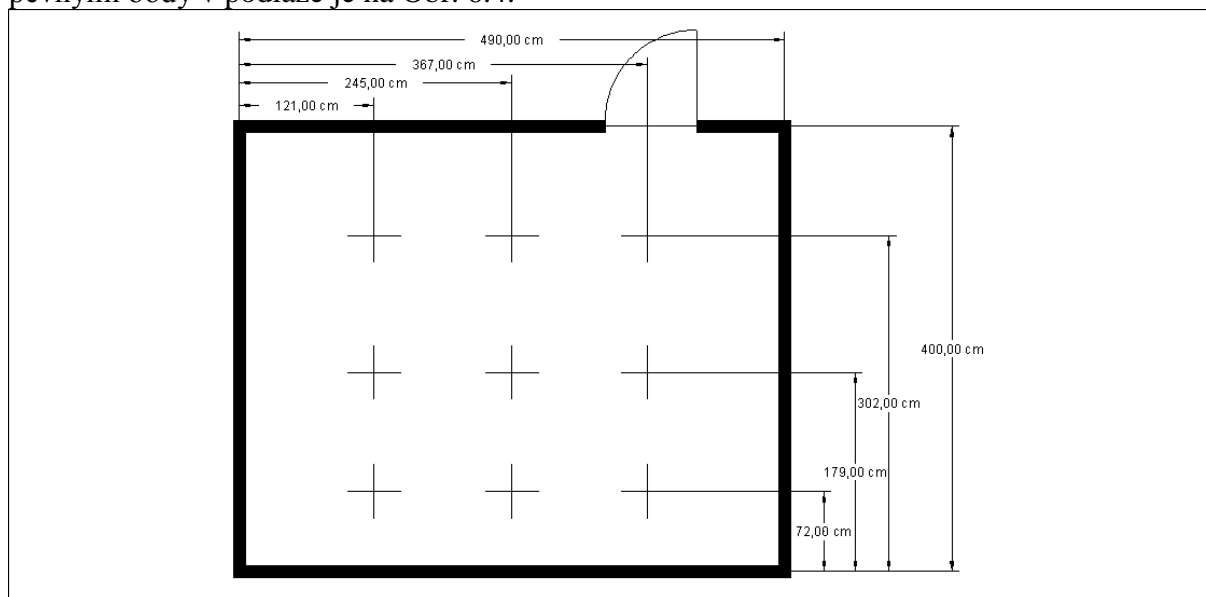
### 6.4 Dispozice bezdrazové komory

Bezdražová komora je vstupem o rozměrech 200 x 110 cm. Pro připevnění přípravku je v komoře k dispozici soustava stropních lanek a soustava pevných bodů v podlaze.

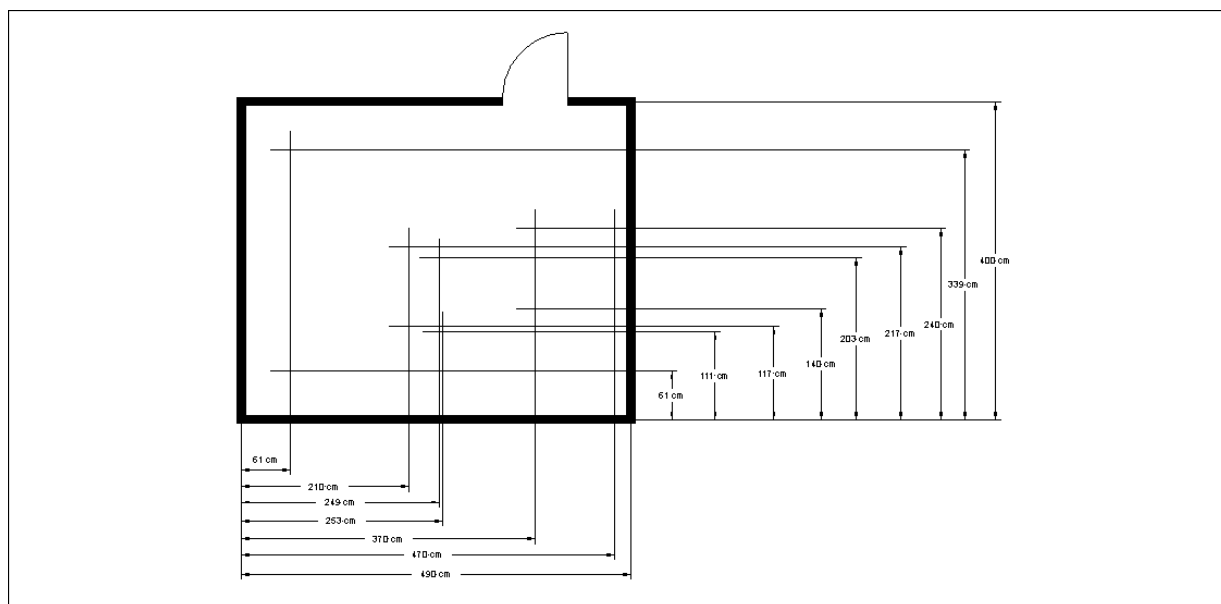
Celkem devět lanek visících ze stropu v pravidelných rozestupech se používá například pro upevnění měřených vzorků, upevnění měřících mikrofonů nebo pro pověšení měřicí sítě při měření akustické intenzity.

Pevné body v podlaze jsou objímky umístěné mezi absorpčními klíny v podlaze. Do těchto objímek je možné vložit trubky o průměru 5 cm. Takto je možné namontovat například měřicí plošiny, pochozí rošty nebo dálkově řízené otočné zařízení.

Pro účely návrhu konstrukce bylo potřeba určit pozici v bezdražové komoře pro lanka i pevné body v podlaze a změřit jejich vzájemnou vzdálenost. K tomuto účelu se použil laserový dálkoměr. Půdorys s okótovanými lanky je znázorněn na Obr. 6.3 a půdorys s okótovanými pevnými body v podlaze je na Obr. 6.4.



Obr. 6.3: Půdorys bezdražové komory s pozicemi lanek



Obr. 6.4: Půdorys bezdrazové komory s pozicemi pevných bodů v podlaze

## 6.5 Vybavení určené pro měřicí přípravky

Pro měření ve volném poli je k dispozici celkem 12 ¼“ mikrofonů G.R.A.S 40HP viz Obr. 6.5. Pro tyto mikrofony je určen mikrofonní držák G.R.A.S. RA1085 viz Obr. 6.6. Je určen pro mikrofonní pole. Držák je navržen tak, aby měl minimální vliv na akustické pole.

Mezi další vybavení použitelné pro měření akustického výkonu v bezdrazové komoře je dálkově ovládané otočné zařízení na obrázku 6.7.



Obr. 6.5: : G.R.A.S. 40HP<sup>9</sup>



Obr. 6.6: G.R.A.S. RA1085<sup>10</sup>



Obr. 6.7: Dálkově ovládané otočné zařízení

<sup>9</sup> G.R.A.S. 40PH Free-Field Array Mic. *G.R.A.S. Sound and Vibration A/S* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.gras.dk/index.php/40ph.html>

<sup>10</sup> G.R.A.S. RA1085 Holder for Array microphone in PR0002 Array module. *G.R.A.S. Sound and Vibration A/S* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.gras.dk/index.php/ra1085.html>

## 7 Konstrukce měřících přípravků

Pro návrh měřících přípravků byl použit 3D CAD software SolidWorks 2013. Možnosti umístění přípravku je limitováno počtem pevných bodů v podlaze a lanek ze stropu. Umístění přípravku prostým položením na drátovou síť je komplikované, protože síť je pružná. Například při pohybu člověka po síti může být prohyb sítě až 10 cm.

### 7.1 Pomocný rám do bezodrazové komory

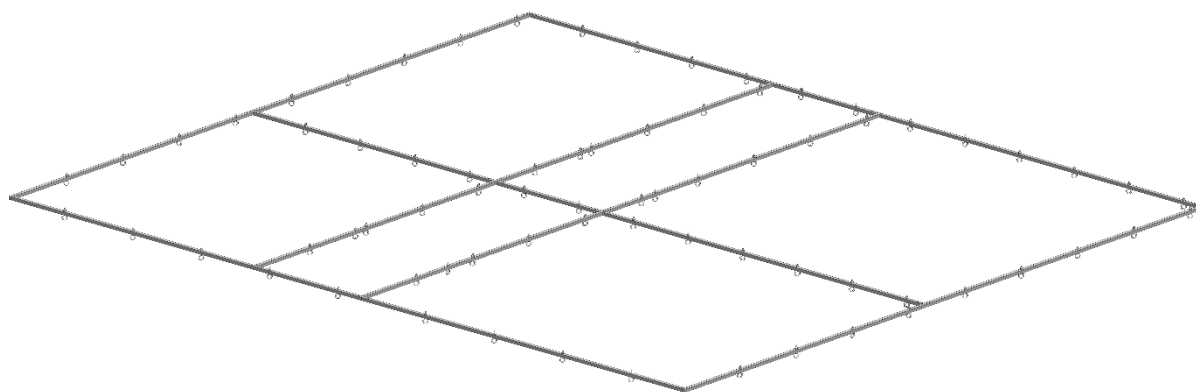
Snadné uchycení měřícího přípravku řeší pomocný rám, který bude zavěšen ve výšce dvou metrů na lankách ze stropu. Tento rám je navržen tak, aby umožnil připevnit konstrukci nad většinu pevných bodů v podlaze.

#### 7.1.1 Návrh

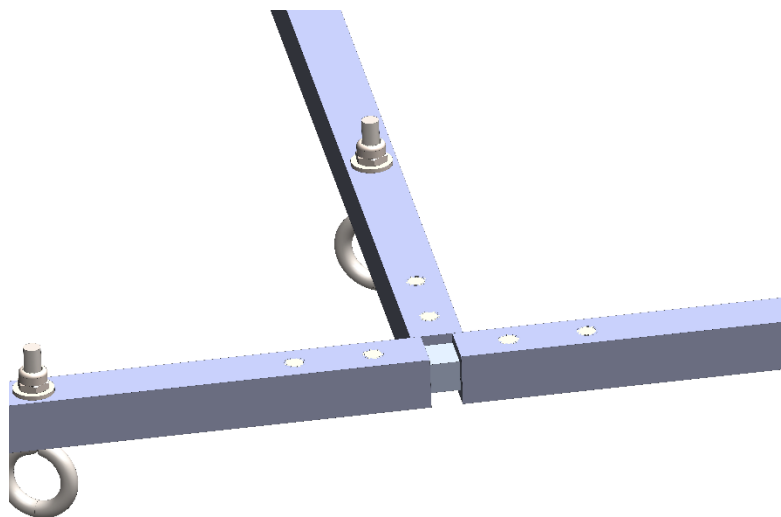
Rám je navržen ze čtvercových profilů 10 x 10 mm. Dílčí krátké profily jsou navzájem spojeny spojovacím dílem, jež využívá vnitřní prostor profilů. Spojovací díly jsou navrženy z duralu kvůli jeho pevnosti a odolnosti. K zajištění dostatečné pevnosti spoje jsou použity dva M3 závity do každého dílčího spojovaného profilu, jejichž spodní část obsahuje kuželové zahloubení pro tyto šroubové spoje. Navržené spoje jsou znázorněny na obrázcích 7.4 až 7.6. Uchycení s měřicí konstrukcí zajišťují oka s metrickým závitem M3, které jsou v pravidelných rozestupech 250 mm ve vertikálním směru a 200 mm v horizontálním směru umístěné na rámu.

Rám umožňuje připevnění nejen měřicí konstrukce přípravku, ale i dalšího vybavení. Například měřicí síť pro měření akustické intenzity.

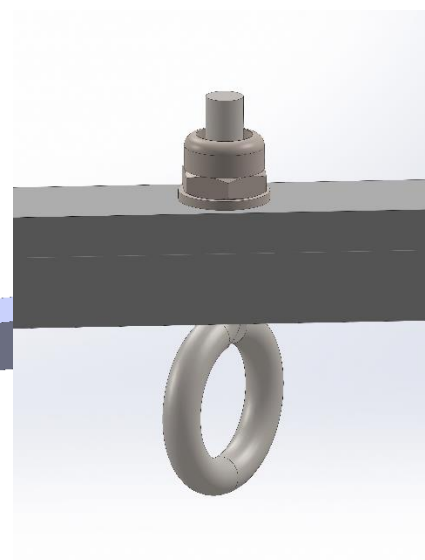
U tohoto pomocného rámu se předpokládá jeho trvalá instalace v bezodrazové komoře. V případě, kdy bude nutné jej rozebrat, je rám navržen tak, aby se nemusel rozebírat celý.



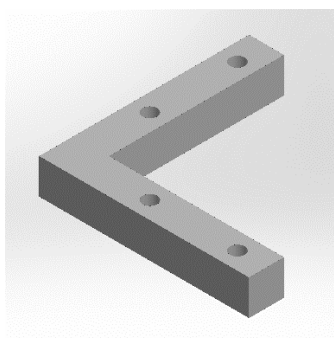
Obr. 7.1: Celkový pohled na pomocný rám



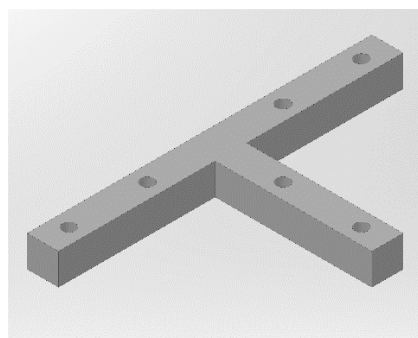
Obr. 7.2: Detail příčného spoje



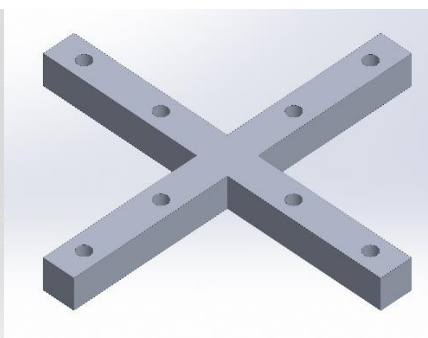
Obr. 7.3: Detail závěsného oka



Obr. 7.4: Vnitřní rohový spojovací díl



Obr. 7.5: Vnitřní příční spojovací díl



Obr. 7.6: Vnitřní křížový spojovací díl

### 7.1.2 Realizace

K výrobě se použil čtvercový profil 10 x 10 x 2 mm z hliníkové slitiny EN AW-6060 T66 dodané společností ALFUN a.s. Tato slitina se vyznačuje velmi dobrou odolností proti korozi, velmi dobrou svařitelností a nízkou obrobiteľností<sup>11</sup>.

Spojovací díly budou vyrobeny v Regionálním technologickém institutu Fakulty strojní ZČU metodou vyřezání vodním paprskem do 6 mm silného duralu.

Pro šroubové spoje byly použity šrouby se zápusťnou hlavou M3 x 10. Pro připevnění ok s metrickým závitem M3 x 25 byla použita nízká samojistná matice M3 a dvě podložky z obou stran.

<sup>11</sup> ALFUN - hliník. ALFUN [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/hlinik>

## 7.2 Polokulová struktura

Pro realizaci měření podle požadovaných norem<sup>12</sup> byl navržen měřicí přípravek v podobě polokulové struktury, která umožňuje montáž měřících mikrofonů do všech požadovaných hlavních pozic. Měřicí poloměr této polokulové konstrukce je 1 m.

### 7.2.1 Návrh

Polokulová struktura je navržena z čtvercových profilů 10 x 10 mm. Pro umístění měřících mikrofonů slouží šest měřících ramen ve tvaru čtvrtiny kruhu o poloměru 1075 mm. Tyto oblouky jsou umístěny v pravidelných 60° rozestupech okolo středu měřící plochy. Podstava polokulové konstrukce je vyrobena z šesti zakružených profilů o poloměru 1075 mm a zakružených o 60°. Poloměr 1075 mm byl stanoven z důvodu, že měřicí mikrofon uchycený v držáku má délku od uchycení držáku po konec mikrofonu 75 mm.

Celkové rozměry konstrukce činí 1080 mm x 2160 mm. Vzhledem k rozměrům vstupu do bezodrazové komory (viz kapitola 6.4) se musí počítat s dodatečnou montáží měřícího přípravku v bezodrazové komoře.

Pro spojení těchto zakružených profilů se vybíralo z několika variant:

- **Spojení realizované předem naohýbanými protikusy plechu**

Protikusy plechu vyřezané do požadovaného tvaru spoje se spojí šroubovými spoji. Nevýhoda tohoto řešení je velký počet šroubových spojů a dílů, což ztěžuje montáž přípravku v bezodrazové komoře.

- **Využití technologických přídavek na konci zakružených profilů pro vnitřní spojovací díly**

Pro zakružování je třeba počítat s technologickým přídavkem 200 mm na obě strany profilu. Tyto přídavky se dají při jejich adekvátním zkrácení využít pro vnitřní spojovací díly, jež se k profilům připevní šroubovými spoji. Nevýhoda tohoto řešení je, že při výpočtu požadovaného poloměru při zakružování je potřeba brát ohled na tyto přídavky, které mají vliv na délku oblouku. Výsledný poloměr oblouku je menší, což vede k deformaci měřící plochy. Měřicí mikrofony následně není možné přesně umístit do pozic požadovaných normami.

- **Vnitřní spojovací díly s odpovídajícím zakřivením**

Tato varianta počítá s výrobou vnitřních spojovacích dílů s dodatečným zakřivením, jež zasunou do konce zakružených dílů. Výroba těchto dílů je možná na fréze. Kvůli nedostatku rovných ploch, za které by bylo možné opracovávaný díl uchytit, je nutné použít výrobu metodou „řádkování“. Nevýhoda tohoto řešení je především cena. Hrubý odhad ceny výroby dílů pro jednu konstrukci je 12 až 18 tisíc korun.

---

<sup>12</sup> ČSN EN ISO 3744, ČSN EN ISO 3745, ČSN ISO 3746

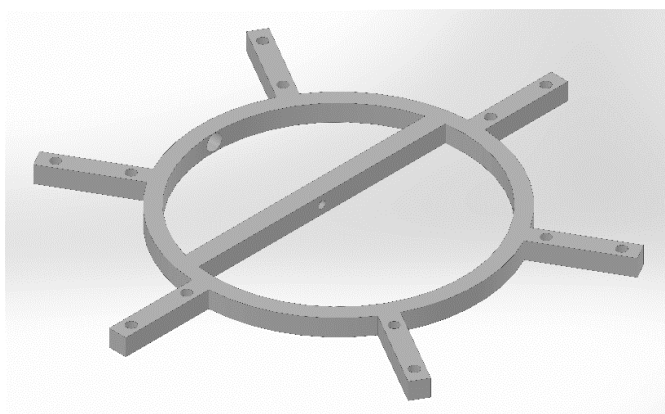
- **Dodatečně narovnané konce zakružených profilů s vnitřními spojovacími díly**

Konce profilů zakružených na poloměr 1075 mm mají na konci jen malé zakřivení, lze je dodatečně opatrně narovnat a použít klasické rovné spojovací díly, jež se šroubovými spoji upevní ke spojovaným profilům. Nevýhoda tohoto řešení je nutnost opětovného opracování zakružených profilů.

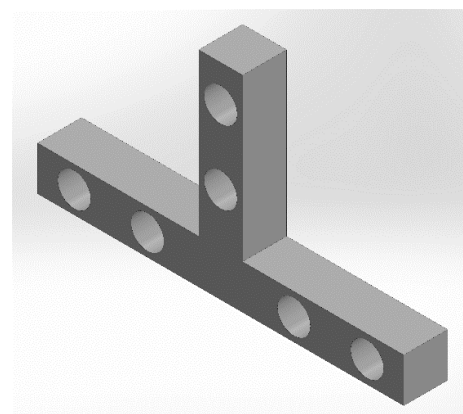
Při návrhu horního spojovacího dílu je důležitá možnost upevnění horního mikrofonu, což je vyžadováno normou [4] a [15]. Při návrhu je dále důležité minimalizovat odrazivou plochu dílu. Doporučený poměr odrazivé plochy a volného prostoru je maximálně 50%.

Navržený horní spojovací díl, který je znázorněn na Obr. 7.7, má tento poměr cca 20%. Spojovací díl má poloměr 50 mm, proto je nutné horní oblouky polokulové struktury o tuto vzdálenost oříznout. Výška spojovacího dílu je 6 mm. Ke spojení slouží 30 mm dlouhé spojky, jež slouží k zasunutí do narovnaných konců horních oblouků. Každá spojka má dva M4 závity. Detail spojení je na Obr. 7.9.

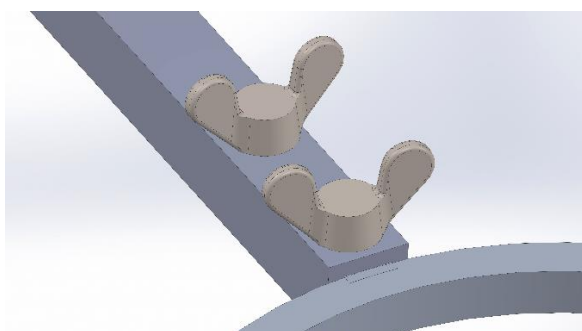
Pro spojení oblouků podstavce a měřících oblouků je navržen vnitřní spojovací díl znázorněný na Obr. 7.8, který se zasune do opracovaných konců oblouků. Opracování je možné vidět na Obr. 7.10. Spodní spojovací díl má pro každý spojovaný díl dva otvory pro M4 šroubové spoje.



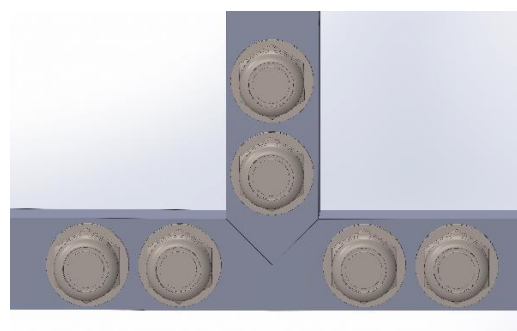
Obr. 7.7: Horní spojovací díl



Obr. 7.8: Spodní spojovací díl

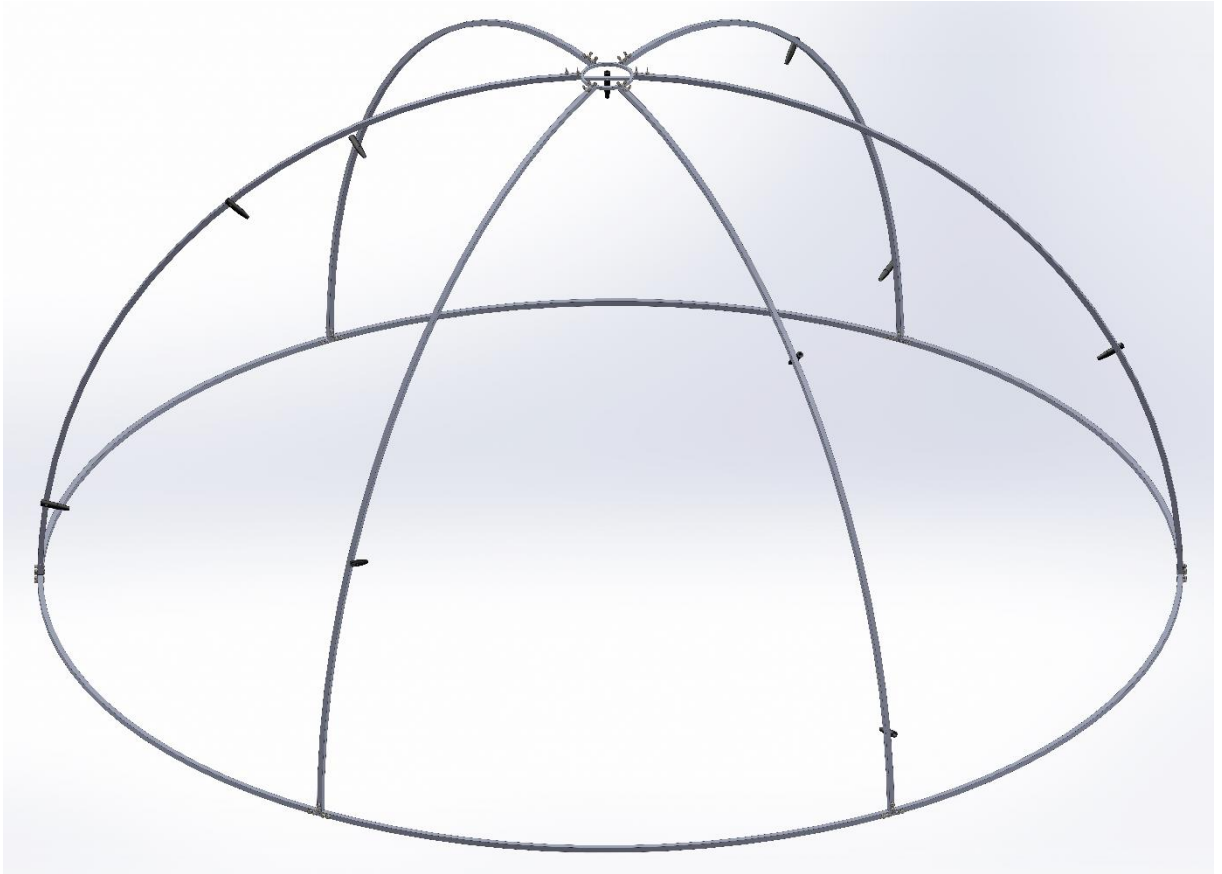


Obr. 7.9: Detail uchycení u horního spoje

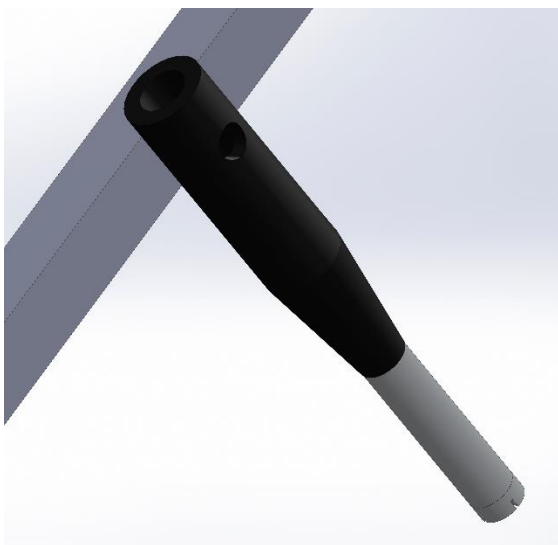


Obr. 7.10: Detail uchycení u spodního spoje

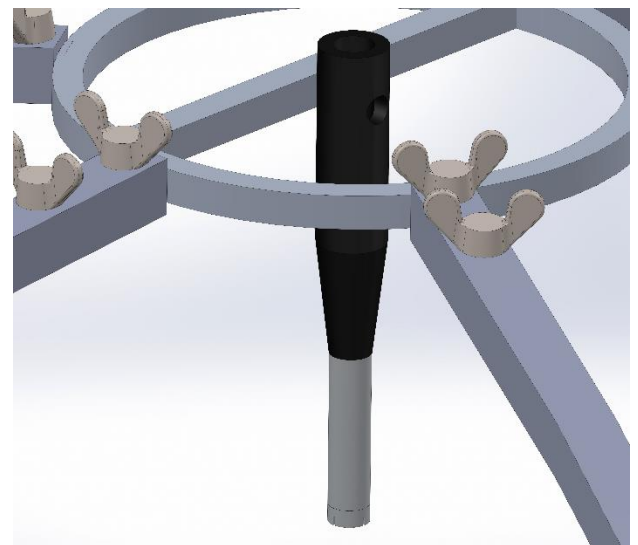
Celkem se použilo šest oblouků spojených spodními spojovacími díly, které tvoří podstavu polokulové konstrukci a šest horních měřících oblouků spojených horním spojovacím dílem. Pohled na celou strukturu s umístěnými mikrofonními držáky v pozicích podle mezinárodní normy ČSN EN ISO 3744 je na Obr. 7.11.



**Obr. 7.11: Polokulová konstrukce s rozmístěnými mikrofony podle ČSN EN ISO 3744**



**Obr. 7.12: Detail uchycení mikrofonu**



**Obr. 7.13: Detail uchycení horního mikrofonu**



### 7.2.2 Realizace

K výrobě se použily čtvercové profily 10 x 10 x 2 mm z hliníkové slitiny EN AW-6060 T66. Tyto profily se zakružily na požadovaný úhel a poloměr u společnosti UNIT-PLUS s.r.o. Celkem bylo do této firmy dáno šest profilů k zakružení o 90° na poloměr 1075 mm a šest profilů k zakružení o 60° taktéž na poloměr 1075 mm.

V této firmě také byly opracovány konce profilů seříznutím do tvaru, který je používán u spoje oblouků podstavy s horním obloukem. Tento spoj je znázorněn na obr. 7.10.

Pro uchycení mikrofonních držáků G.R.A.S. RA0185 jsou do měřících oblouků polokulové konstrukce vyvrtány metrické závity M3 v pozicích podle daných norem<sup>13</sup>.

Pro umístění horního spojovacího dílu bylo nutné každý měřící oblouk seříznout o 50 mm na jeho horním konci.

K umožnění zasunutí vnitřních spojovacích prvků bylo zapotřebí dodatečně narovnat konce zakružených profilů, jejichž zakřivení činilo cca 5%.

Jednotlivé spojovací díly budou vyrobeny Regionálním technologickým institutem Fakulty strojní ZČU metodou vyřezání vodním paprskem do 6 mm silného duralu.

Pro upevnění horního spojovacího dílu s měřícími oblouky je díl opatřen dvěma M4 závity. Pro každý spojovaný profil slouží metrický šroub s křídlovou hlavou M4 x 10 mm.

U spodního spojovacího dílu je spojení s jednotlivými oblouky realizováno pomocí dvěma šroubovými spoji v každém profilu. Šroubový spoj je proveden šroubem s válcovou zaoblenou hlavou M4 x 16 a nízkou samojistnou matkou M4.

Technický výkres sestavy a jednotlivých částí je přiložen v příloze.

---

<sup>13</sup> ČSN EN ISO 3744, ČSN EN ISO 3745, ČSN EN ISO 3746

### 7.3 Přípravek pro otočné zařízení

Pro využití otočného zařízení byl navržen přípravek s měřícím poloměrem 1 m. K umístění se používá navržený pomocný rám do bezodrazové komory.

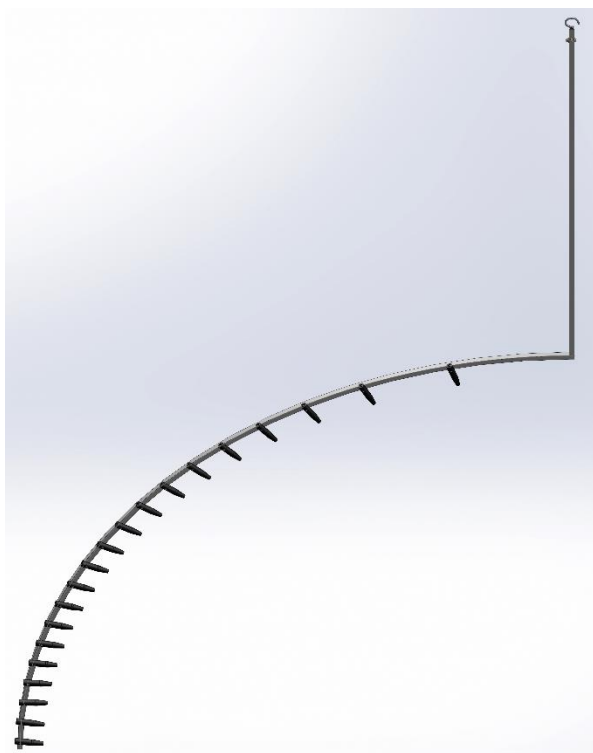
Přípravek zahrnuje všechny hlavní pozice měřících mikrofonů podle mezinárodní normy ČSN EN ISO 3745, viz tabulka 6-III a grafické znázornění pozic mikrofonů v příloze C. K dosažení kulové měřící plochy se měřený zdroj zvuku otáčí o 60°.

#### 7.3.1 Návrh

Přípravek je navržen z čtvercového profilu 10 x 10 mm. Má tvar čtvrtiny kruhu o poloměru 1075 mm. K fixaci pevné polohy vůči měřenému zdroji slouží hák určený k zachycení k pomocnému rámu a lanka ze spodní části měřícího ramene, která se zachytí k pomocnému rámu.

Pro uchycení mikrofonních držáků G.R.A.S. RA0185 slouží M3 závity rozmístěné na měřícím oblouku podle požadavku ČSN EN ISO 3745.

Oblouk má poloměr 1075 mm. Tento poloměr byl stanoven proto, že měřící mikrofon uchycený v držáku má délku od uchycení držáku po konec mikrofonu 75 mm.



**Obr. 7.14:** Závěsné měřící rameno osazený držáky G.R.A.S. RA0185



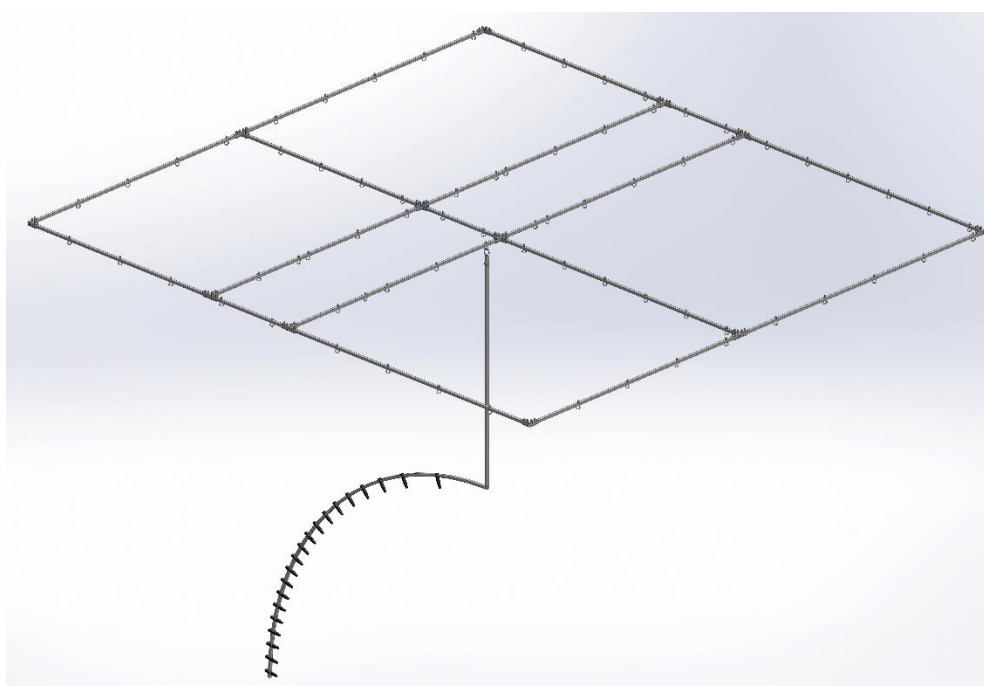
**Obr. 7.15:** Detail uchycení měřícího mikrofonu



Pro zavěšení k pomocnému rámu slouží hák s metrickým závitem M4 x 25 mm. Ten je zašroubován do ocelového hranolu s vyvrtaným M4 závitem.

Hranol má rozměry 6 x 6 mm a je zasunut do konce profilu. Pro upevnění je zajištěn dvěma M4 šroubovými spoji.

**Obr. 7.16: Detail umístění závěsného háku**



**Obr. 7.17: Zavěšené měřící rameno na pomocném ramenu**

### 7.3.2 Realizace

K výrobě se použil čtvercový profil 10 x 10 x 2 mm z hliníkové slitiny EN AW-6060 T66. Profil byl zakružen stejně jako u předchozí polokulové konstrukce u firmy UNIT PLUS s.r.o. na poloměr 1075 mm.

Zakružený profil je svarem spojen s 900 mm dlouhým profilem. Konec profilu je opatřen ocelovým hranolem o průřezu 6 x 6 mm. Tento hranol opatřený hákem s metrickým závitem M4 x 25 mm je k profilu sešroubován dvěma šrouby se zaoblenou válcovou hlavou M4 x 16 mm s nízkou samojistnou maticí M4.

Výkresová dokumentace přípravku je svázána v příloze.

## 8 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a zrealizovat přípravek pro zjednodušení a zefektivnění měření akustického výkonu, především z hlediska určení měřicí vzdálenosti mezi mikrofonem a měřeným vzorkem.

V úvodu teoretické části jsou definovány základní akustické veličiny. Následuje část věnovaná metodám měření akustického výkonu. Jsou zde představeny mezinárodní normy ISO, které se týkají této problematiky, a volba správné měřicí metody. Dále se tato část zabývá postupem při určení hladin akustického výkonu v bezodrazové komoře. Princip funkce bezodrazové komory a důvody pro jejich použití jsou popsány v následující kapitole. Teoretická část končí přehledem o současných používaných systémech pro měření akustického výkonu. Zahrnut je také rozbor komerčního řešení od dánské firmy G.R.A.S. Sound and Vibration A/S.

Praktická část začíná požadavky, které jsou kladeny na navržený měřicí přípravek. Jsou zde rozepsány požadavky na měřicí plochu, počet měřících mikrofonů a jejich poloha na měřicí ploše dané příslušnými normami. Dále jsou popsány možnosti uchycení měřících přípravků v bezodrazové komoře, včetně pozic lanek visících ze stropů a pevných bodů v podlaze. Tyto pozice se musely určit zaměřením pomocí laserového dálkoměru. Pozice pevných bodů v podlaze bezodrazové komory neodpovídaly plánu jejich umístění a přesné umístění lanek nebylo určeno vůbec. Tato část končí přehledem příslušenství pro měřený přípravek.

Praktická část dále pokračuje kapitolou o konstrukci měřících přípravků, která zahrnuje informace o jejich návrhu i realizaci. Pro rozšíření možnosti připevnění v bezodrazové komoře byl navrhnout pomocný rám, jenž bude viset ve výšce 2 – 2,5 metrů od pochozí sítě na lankách. Rám umožňuje připevnit nejen měřicí přípravky, ale např. i měřicí síť pro měření akustické intenzity nebo měřený vzorek. Pro měření akustického výkonu byla navržena polokulová konstrukce s měřícím poloměrem jeden metr, která umožňuje montáž měřících mikrofonů na požadované pozice podle všech požadovaných norem. Je složena z dvanácti zakružených profilů a jejich spojení řeší spojovací díly, které se budou zasunovat do narovnaných konců profilů. Další navržený měřicí přípravek využívá pro měření otočné zařízení v bezodrazové komoře. K připevnění využívá navržený pomocný rám. Umožňuje měřit podle mezinárodní normy ČSN EN ISO 3745 na polokulové ploše o měřícím poloměru jeden metr. Technická dokumentace rámu a přípravků v podobě výkresů je přiložena v příloze.

Vzhledem k tomu, že během práce byly požadavky průběžně upravovány podle toho, jak vznikala samotná konstrukce, tak na realizaci přípravků se stále pracuje. Nyní se nachází ve stavu, kdy profily jsou zpracovány na požadovaný tvar, tj. mají požadovanou délku, jsou zakruženy o požadovaný úhel na poloměr 1075 mm a jejich konce jsou narovnány a opracovány pro spojení. Spojovací díly pro rám a polokulovou konstrukci se budou vyrábět technologií řezem vodního paprsku do materiálu u Regionálního technologického institutu fakulty strojní. Instalace pomocného rámu je ve fázi přípravy, po jejím dokončení dojde k ověření funkčnosti navržených přípravků při měření akustického výkonu.

## Seznam obrázků

OBR. 1.1: VZNIK AKUSTICKÉ TLAKU POHYBEM ČÁSTIC PROSTŘEDÍ. PŘEVZATO Z [2].....	13
OBR. 2.1: VOLBA MĚŘÍCÍ METODY PRO STANOVENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU. PŘEVZATO Z [3].	16
OBR. 4.1: PŮDORYS AKUSTICKÝCH LABORATOŘÍ FEL.....	22
OBR. 4.2: PŘÍKLAD BEZODRAZOVÉ KOMORY. PŘEVZATO Z [2] .....	23
OBR. 4.3: BEZODRAZOVÁ KOMORA FEL ZČU .....	24
OBR. 5.1: PŘÍPRAVEK SPOLEČNOSTI OE SCIENTECH Co., LTD.....	25
OBR. 5.2: PŘÍPRAVEK VE FENG CHIA UNIVERSITY.....	26
OBR. 5.3: AKTUÁLNÍ PŘÍPRAVEK POUŽÍVANÝ V HUDEBNÍ A TANEČNÍ FAKULTĚ AMU .....	26
OBR. 5.4: PŘEDCHOZÍ PŘÍPRAVEK POUŽÍVANÝ V HUDEBNÍ A TANEČNÍ FAKULTĚ AMU .....	27
OBR. 5.5: MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVEK V ITA - RWTH AACHEN UNIVERSITY. PŘEVZATO Z [16] .....	27
OBR. 5.6: MĚŘÍCÍ SYSTÉM VE BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY. PŘEVZATO Z [11] .....	28
OBR. 5.7: MĚŘÍCÍ SYSTÉM V UNIVERSITY OF SALFORD, MANCHESTER. PŘEVZATO Z [12].....	28
OBR. 5.8: PŘÍPRAVEK POUŽÍVANÝ V SCHOOL OF ELECTRONIC, INFORMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING. PŘEVZATO Z [13].....	29
OBR. 5.9: POLOKULOVÝ SET G.R.A.S. 67HA-05. PŘEVZATO Z [14].....	30
OBR. 5.10: SYSTÉM UPEVNĚNÍ MIKROFONŮ. PŘEVZATO Z [14] .....	30
OBR. 5.11: HORNÍ PROPOJOVACÍ DÍL. PŘEVZATO Z [15].....	30
OBR. 6.1: REFERENČNÍ OBALOVÁ PLOCHA A VÝPOČET $D_0$ PODLE ČSN EN ISO 3744. PŘEVZATO Z [4] .....	31
OBR. 6.2: REFERENČNÍ OBALOVÁ PLOCHA A VÝPOČET $D_0$ PODLE ČSN EN ISO 3745. PŘEVZATO Z [5] .....	31
OBR. 6.3: PŮDORYS BEZODRAZOVÉ KOMORY S POZICEMI LANEK.....	34
OBR. 6.4: PŮDORYS BEZODRAZOVÉ KOMORY S POZICEMI PEVNÝCH BODŮ V PODLAZE .....	35
OBR. 6.5: : G.R.A.S. 40HP .....	35
OBR. 6.6: G.R.A.S. RA0185.....	35
OBR. 6.7: DÁLKOVĚ OVLÁDANÉ OTOČNÉ ZAŘÍZENÍ .....	35
OBR. 7.1: CELKOVÝ POHLED NA POMOCNÝ RÁM.....	36
OBR. 7.2: DETAIL PŘÍČNÉHO SPOJE .....	37
OBR. 7.3: DETAIL ZÁVĚSNÉHO OKA .....	37
OBR. 7.4: VNITŘNÍ ROHOVÝ SPOJOVACÍ DÍL .....	37
OBR. 7.5: VNITŘNÍ PŘÍČNÍ SPOJOVACÍ DÍL .....	37
OBR. 7.6: VNITŘNÍ KŘÍŽOVÝ SPOJOVACÍ DÍL .....	37
OBR. 7.7: HORNÍ SPOJOVACÍ DÍL .....	39
OBR. 7.8: SPODNÍ SPOJOVACÍ DÍL .....	39
OBR. 7.9: DETAIL UCHYCENÍ U HORNÍHO SPOJE .....	39
OBR. 7.10: DETAIL UCHYCENÍ U SPODNÍHO SPOJE.....	39
OBR. 7.11: POLOKULOVÁ KONSTRUKCE S ROZMÍSTĚNÝMI MIKROFONY PODLE ČSN EN ISO 3744.....	40
OBR. 7.12: DETAIL UCHYCENÍ MIKROFONU .....	40
OBR. 7.13: DETAIL UCHYCENÍ HORNÍHO MIKROFONU .....	40
OBR. 7.14: ZÁVĚSNÉ MĚŘÍCÍ RAMENO OSAZENÝ DRŽÁKY G.R.A.S. RA0185.....	42
OBR. 7.15: DETAIL UCHYCENÍ MĚŘÍCÍHO MIKROFONU .....	42
OBR. 7.16: DETAIL UMÍSTĚNÍ ZÁVĚSNÉHO HÁKU .....	43
OBR. 7.17: ZAVĚŠENÉ MĚŘÍCÍ RAMENO NA POMOCNÉM RAMENU .....	43

## **Seznam tabulek**

TAB. 5-I: NABÍDKA RŮZNÝCH VARIANT. PŘEVZATO Z [14].....	29
TAB. 6-I: SOUŘADNICE HLAVNÍCH POZIC ČSN EN ISO 3744. PŘEVZATO Z [4] .....	33
TAB. 6-II: SOUŘADNICE DOPLŇKOVÝCH POZIC ČSN EN ISO 3744. PŘEVZATO Z [4] .....	33
TAB. 6-III: SOUŘADNICE HLAVNÍCH POZIC ČSN EN ISO 3745. PŘEVZATO Z [5].....	33
TAB. 6-IV: SOUŘADNICE VEDLEJŠÍ POZIC ČSN EN ISO 3745. PŘEVZATO Z [5].....	33
TAB. 6-V: SOUŘADNICE HLAVNÍCH POZIC ČSN EN ISO 3746. PŘEVZATO Z [15].....	34
TAB. 6-VI: SOUŘADNICE VEDLEJŠÍCH POZIC ČSN EN ISO 3746. PŘEVZATO Z [15] .....	34

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KÁŇA, Ladislav. *Elektroakustika* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2002.
- [2] BERAN, Vlastimil. *Chvění a hluk*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [3] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2460-1.
- [4] ČSN EN ISO 3744 *Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové komory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] ČSN EN ISO 3745 *Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové komory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [6] DAVIES, R.S. Equation for the determination of the density of moist air. *Metrologia*. 1992, **29**, pp. 67-70
- [7] HÜBNER, G. Accuracy consideration on the meteorological correction for a normalized sound power level. In: *Proceeding Inter-Noise 2000*, Nice, France, INCE Conference Proceedings, 2000-08-27, **204**, pp. 1907-1912
- [9] JOPPA, P.D., SUTHERLAND, L.C., ZUCKERWAR, A.J. Representative frequency approach to the effect of band pass filters on evaluation of sound attenuation by the atmosphere. *Noise Control Eng.J.* 1996, **44**, pp. 261-273
- [10] Acoustic Test Chambers and Environments. *National Instruments* [online]. 2014 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/264/en/>
- [11] Acoustics Facilities at BYU | Acoustics Research Group. *Brigham Young University* [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <https://acoustics.byu.edu/content/acoustics-facilities-byu>
- [12] Salford Acoustics. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Salford\\_Acoustics](https://en.wikipedia.org/wiki/Salford_Acoustics)
- [13] HE, Guhuan a HUANG. In: *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012, **48**(5). DOI: 10.1109/TMAG.2011.2178100. ISSN 0018-9464. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6095368>
- [14] G.R.A.S. Hemisphere kits. *G.R.A.S. Sound and Vibration A/S* [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.gras.dk/index.php/products/hemispheres.html>

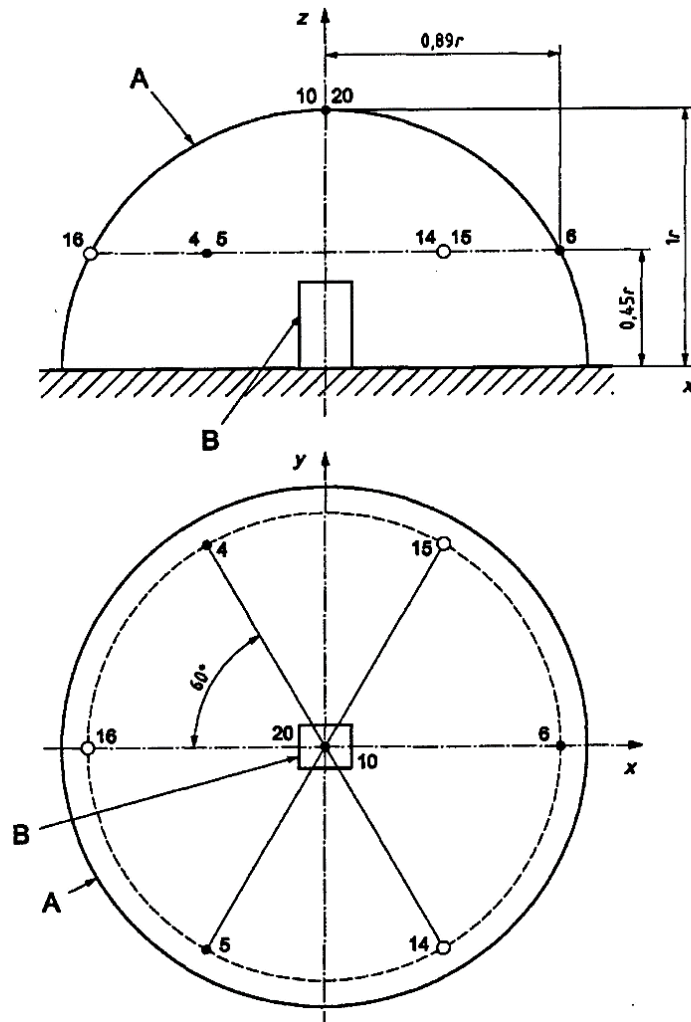
[15] ČSN EN ISO 3746 *Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Provozní metoda s měřicí obalovou plochou nad odrazivou rovinou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[16] Gottfried Behler, Martin Pollow, Michael Vorländer. Measurements of musical instruments with surrounding spherical arrays. Société Française d'Acoustique. *Acoustics 2012*, Apr 2012, Nantes, France. 2012. <hal-00811213>



## Přílohy

## Příloha A: Grafické znázornění rozložení pevných měřících bodů podle ČSN EN ISO 3746

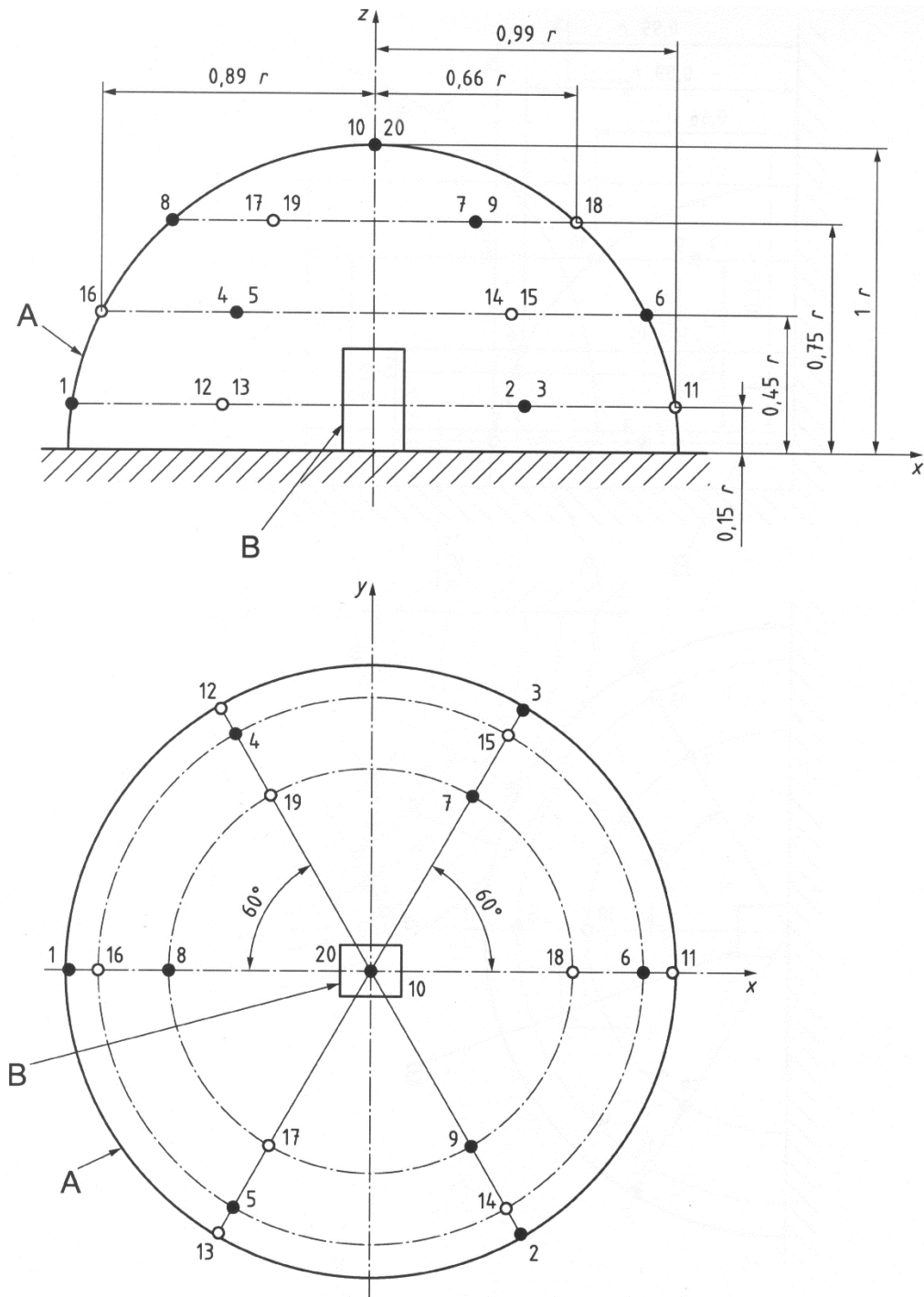


## Legenda

- hlavní polohy mikrofonů (4, 5, 6, 10)
- doplňkové polohy mikrofonů (14, 15, 16, 20)
- A měřicí plocha
- B referenční obalová plocha
- $r$  poloměr měřicí plochy

Obr. A.1: Umístění měřících poloh na měřicí polokouli. Převzato z [15]

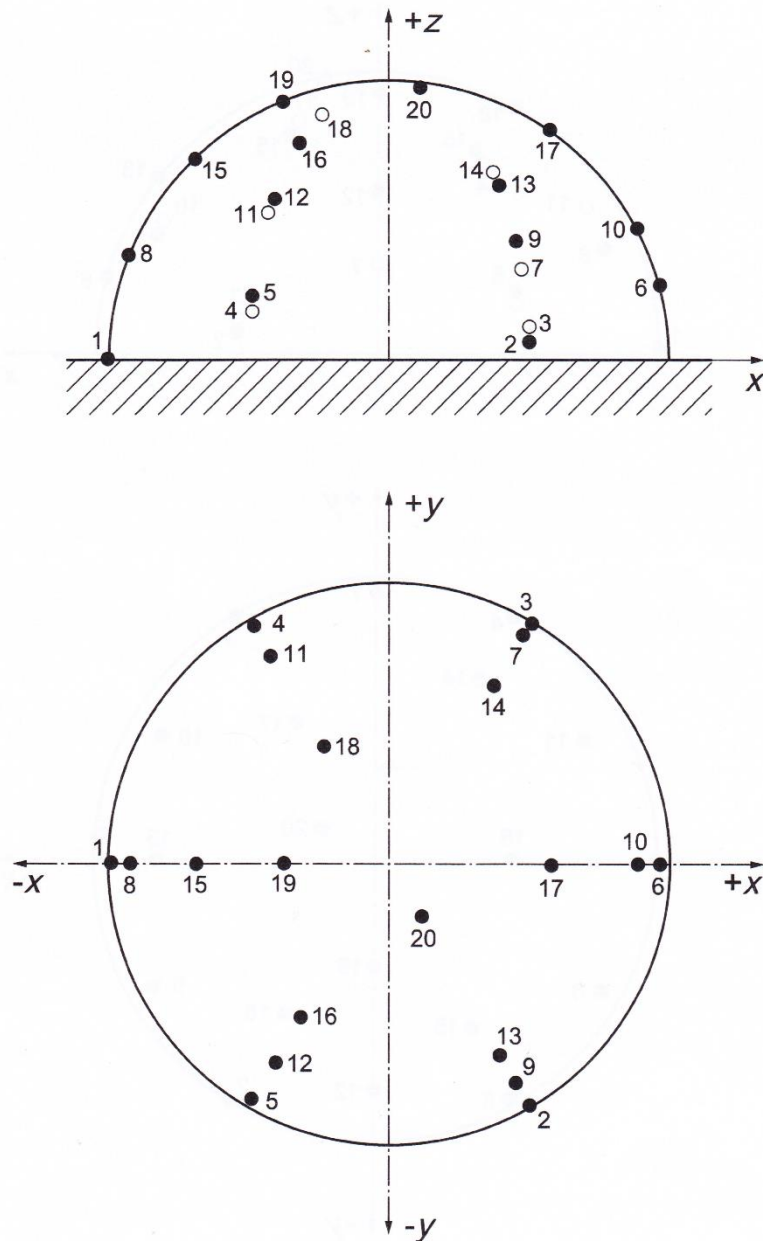
### Příloha B: Grafické znázornění rozložení pevných měřících bodů podle ČSN EN ISO 3744



#### Legenda

- hlavní polohy mikrofonů (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)
- doplňkové polohy mikrofonů (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20)
- A měřící plocha
- B referenční obalová plocha
- $r$  poloměr měřící plochy

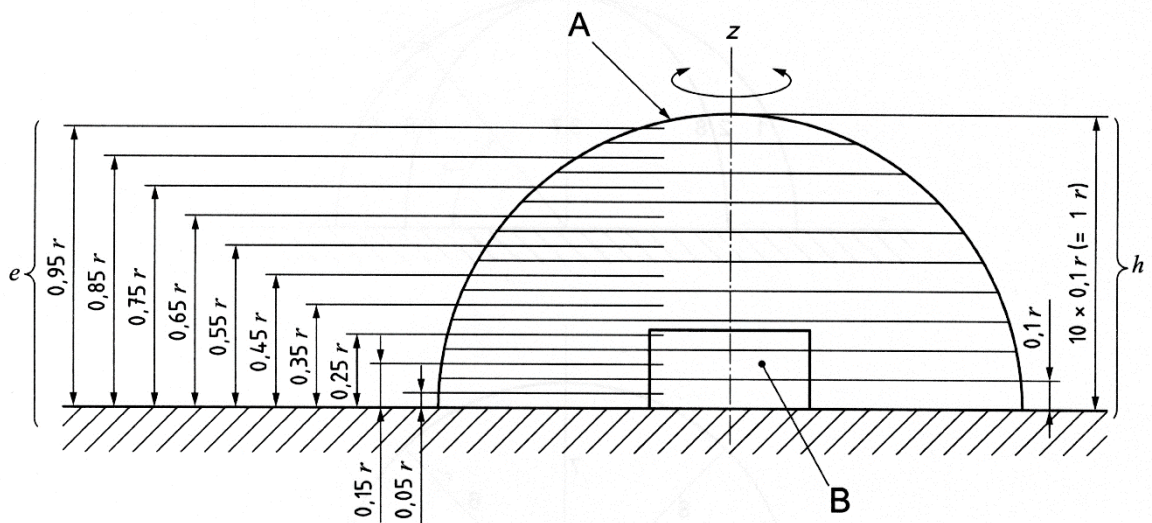
**Obr. B.1: Umístění měřících poloh na měřící polokouli. Převzato z [4]**

**Příloha C: Grafické znázornění rozložení pevných měřících bodů podle ČSN EN ISO 3745****Legenda**

- polohy mikrofonu na přilehlé straně
- polohy mikrofonu na odvrácené straně

**Obr. C.1: Umístění měřících poloh na měřící polokouli. Převzato z [5]**

**Příloha D: Grafické znázornění kruhových drah mikrofonu na polokulové měřicí ploše podle ČSN EN ISO 3745**



**Legenda**

- A měřicí plocha
- B referenční obalová plocha
- $e$  výšky drah posuvu mikrofonu
- $h$  výšky odpovídajících oblastí na povrchu polokoule
- $r$  poloměr měřicí plochy
- $z$  osa otáčení mechanismu zajišťujícího pohyb mikrofonu

**Obr. D.1: Soustředné kruhové dráhy mikrofonu. Převzato z [5]**