

# Senzorové systémy v CIM

Ing. Richard Balogh

## Akustické systémy

3. 4. 2023

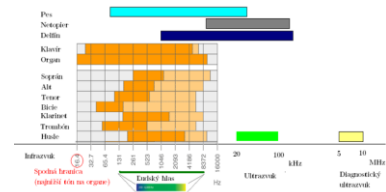
1

## Akustické systémy

Zameranie na **ultrazvuk (UZ)**:  
vyššia  $f$  (40kHz ÷ 10MHz)

Prečo?

- UZ frekvencie sa ľahšie smerujú a detekujú
- menšia  $\lambda$  → vyššia presnosť (100 kHz →  $\lambda = 3,43$  mm)
- vysielače a prijímače - prijateľnejšie rozmery
- systémy nerušia ľudský sluch



Metódy:

- známa rýchlosť šírenia zvuku  $c$
- geometria šírenia.

2

## Akustické systémy – využitie

Využitie:

- zistenie prekážok, meranie vzdialeností
- defektoskopia
- meranie prietoku
- medicína - kontrola vnútorných orgánov
- systémy s povrchovými vlnami (PAV, angl SAW)
- spolupráca s inými obormi - akustooptika, chémia, atď



3

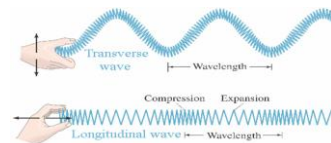
## Zvuk (sound, Schall, Звук)

### Základné pojmy

šírenie mechanických vlnít hmotných častíc prostredia okolo rovnovážnej polohy

Typy vln:

- priestorové (objemové)
  - priečne
  - pozdlžné
- Povrchové Akustické Vlny (PAV)
  - priečne
  - pozdlžné



Plyny a kvapaliny – len pozdlžné vlny

### Ultrazvukové (UZ) vlny

- plyny od 20 ÷ 40 kHz do 300 ÷ 400 kHz

4

## Akustické veličiny

veličina	jednotka	popis	vzťahy
akustický tlak $p$ sound pressure	[Pa]	rozdiel medzi okamžitým tlakom prostredia a jeho tlakom pri šírnutí zvuku	
akustická rýchlosť $v$ sound particle velocity	[m/s]	rýchlosť pohybu častíc – porovnaj s $c$	$v = \xi / t$
rýchlosť šírenia $c$ sound velocity	[m/s]	rýchlosť šírenia zvukovej vlny v prostredí	závisí od teploty a vlhkosti
akustická impedancia $Z$ acoustic impedance	[Pa.s.m <sup>-1</sup> ]	komplexná veličina vyjadrená podielom tlaku na danej ploche a rýchlosťou	$Z = \frac{p}{v} = \rho c$
intenzita zvuku $I$ sound intensity	[W/m <sup>2</sup> ] [dB]	charakterizuje prenos akustického výkonu $P$	$I = p \cdot v = P/A$
akustický výkon $P$ sound power	[W]	výkon vyžarovaný alebo prenášaný priestorovo-činným akustickým vlnením	$P = E / t$
vlnová dĺžka $\lambda$ wavelength	[m]	pre rýchlosť $c$ v danom prostredí	$\lambda = c / f$

5

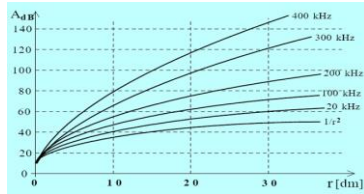


6

### Útlm UZ vln

## Šírenie UZ v plynoch (vzduchu)

intenzita klesá  $\approx 1/x^2$   
– reálne viac.



koeficient útlmu

- $\alpha$  [1/m] alebo
- $\alpha_{dB}$  [dB/m]  $\rightarrow (A_{dB} = \alpha_{dB} \cdot r)$

konst. budenie, harmonický signál, nekles. amplitúdy

7

### Rýchlosť šírenia c

## Šírenie UZ v plynoch (vzduchu)

upravená rovnica (vzduch, platí pre  $f < 100$  MHz)

$$c = 331,46 (1 + 1,83 \cdot 10^{-3} \vartheta) (1 + 2,2 \cdot 10^{-4} \delta)$$

- $\vartheta$  - teplota (plynu) [°C] a
- $\delta$  - relatívna vlhkosť (plynu) [%].

Priklad:

- Pri meraní  $L = 1m$  a  $\Delta\vartheta 2^\circ C$  je chyba **3,62 mm**.
- Pri  $\Delta\delta 20\% C$  je chyba **35,33 mm** (pre  $L = 1m$ )

8

## Akustické meniče

- geometria
- elektrické parametre
- akustické parametre (ich vzťah k elektrickým)
- recipročná činnosť - jeden menič vysiela i prijíma



Reálne systémy:

- **piezoelektrické** (ako permanentný magnet v el.)
- **kondenzátorové** (elektrostatické)
- **elektrický výboj** - najmä iskra ako vysielač

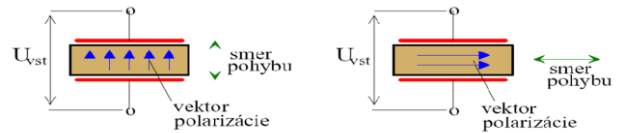
Akustické parametre:

- akustický výkon (tlak) v mieste merania min.  $10^{-2}$  Pa
- citlivosť prijímača min. 0,1 mV/Pa (bežne 1 ÷ 20 mV/Pa)

9

## Piezoelektrické meniče

piezoelectric transducer



piezoelektrický jav

piezokeramika, (prírodné materiály)

Výroba:

- suroviny, mletie, zmiešanie, lisovanie,
- vypálenie, **polarizácia**

10

## Piezoelektrický jav

Materiály

$(Pb(Zr_{1-x}Ti_x)_2O_7)$  with  $0 \leq x \leq 1$  – keramika, skratka PZT

Krystalické látky

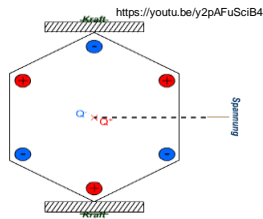
- Kremeň
- Langazit ( $La_3Ga_5SiO_{14}$ ) – a quartz-analogous crystal
- Gallium orthophosphate ( $GaPO_4$ ) – a quartz-analogous
- Lithium niobate ( $LiNbO_3$ )
- Lithium tantalate ( $LiTaO_3$ )
- Lead titanate ( $PbTiO_3$ )

Keramika

- PZT
- $Ba_xNa_{1-x}O_3$

Bezolovnaté

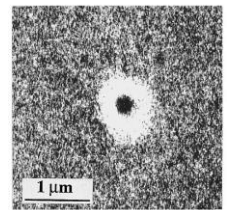
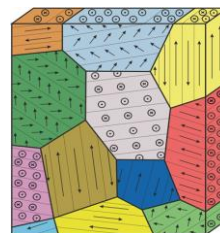
- Bismuth ferrite ( $BiFeO_3$ )
- Barium titanate ( $BaTiO_3$ )



March 1880: Jacques and Pierre Curie discover piezoelectricity

## Piezoelektrické meniče

piezoelectric transducer



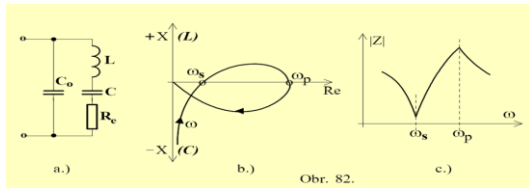
Piezoresponse image of a PZT-0.8 film excited by voltage pulse

Gruverman, Alexei & Auciello, O. & Tokumoto, H. (1996). Scanning force microscopy for the study of domain structure in ferroelectric thin films. Journal of Vac Kozinov, Sergey & Kuna, Meinhard. (2018). Simulation of fatigue damage in ferroelectric polycrystals under mechanical/electrical loading. Journal of the Mech

11

12

## Piezelektrické meniče ekvivalentná schéma

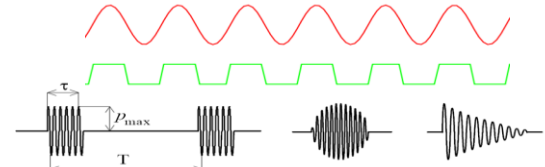


rezonančný obvod – náhradné parametre:

$C_0$  – statická kapacita (~nF)  
 $L$  – úmerná hmotnosti  
 $\omega_s$  – sériová rezonancia  
 $C$  – úmerná mech. poddajnosti  
 $R_e$  – mechanické straty  
 $\omega_p$  – paralelná rezonancia

13

## Piezelektrické meniče budenie vysielča



- kontinuálny signál  
- harmonický, alebo obdĺžnik 30 ÷ 200 V
- rádiový impulz
- impulzné budenie - jeden impulz

14

## Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov

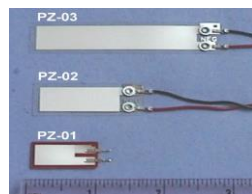
Materiály:

### Piezokeramika

Vyžarovanie do vzduchu

fólia z **PVdF** (polyvinylidenfluorid)  
 polarizovaný polymér,  
 použitie ako piezokeramika

Vlnový odpor  $\rho_c$  (resp.  $Z$ ) [ $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ]:  
 vzduch @ 20°C 4,13·10<sup>2</sup>  
 voda @ 20°C 1,48·10<sup>6</sup>  
 PVdF fólia 3,30·10<sup>6</sup>  
 piezokeramika 3,00·10<sup>7</sup>

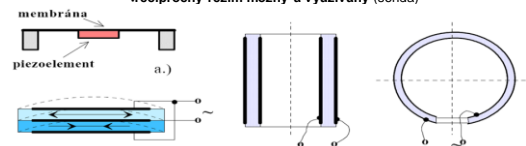


15

## Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov

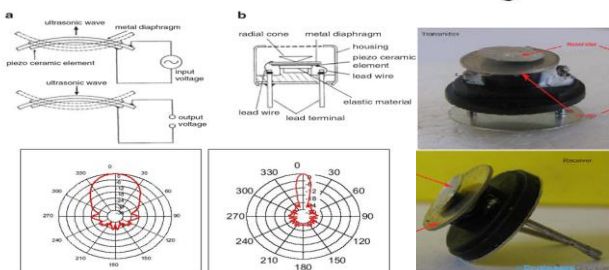
- platnička, disk → x  
membrána  
Sawyerovo dvojča (opačné vektory polarizácie)
- dutý valec → xy, valcová vlna
- dutá guľa → guľová vlnoplocha, priestorové merania

• recipročný režim možný a využívaný (sonda)



16

## Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov



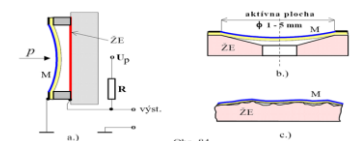
17

## Kondenzátorové meniče

vysielače: elektrostatické sily  
 prijímače (mikrofóny): dopad zvuku → zmena C

- ŽE – živá elektróda
- M – membrána
- Up – pol. napätie (50 – 300 V)

pre UZ frekvencie:  
 – malé rozmery  
 – tenké membrány  
 (pokovený plast 1 ÷ 20 μm)



- polarizovaný plast typu **elektret** – netreba polarizačné napätie
- *self system* - pre plochu viacnásobný (84b)
- zdrsnená elektróda (84c)

18

## Kondenzátorové meniče



Využitie Si (aj ako membrána)

### Príklad:

Vytvorená Si membrána 0,8 x 0,8 mm, h = 150 nm, Al pokovenie 100 nm. V ďalšej časti Si substrátu je elektronika.

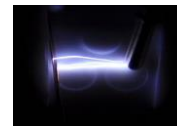
Budenie meničov: ~ 10 ÷ 100 V.

Meniče sú širokopásmové,  $f_{medz}$  50 ÷ 300 kHz

recipročný režim možný a využívaný

19

## Elektrický výboj ako vysielateľ UZ vln



### Elektrická iskra

- výboj medzi elektródami prierazné napätie

- + veľká intenzita zvuku  
strmá nábežná hrana  
široké frekv. spektrum, od počuteľných do cca 500 kHz  
kvázibodový zdroj zvuku
- iskra - zdroj porúch, nutné sú odrušenia (tínenia)  
dráha iskry je náhodná - menšia presnosť  
výbušné prostredia !!!

20

## Elektrický výboj

### Iskra

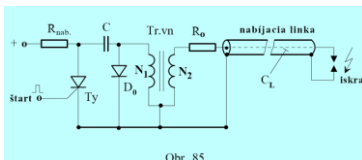


Realizácia:

statický zdroj - potrebné  $V_n$  (8 ÷ 10 kV), menej vhodný

impulzný zdroj -  $V_n$  impulzný transformátor obr. 85.

- \* C sa nabíja z + cez  $R_{nab}$  (50 ÷ 300 V)
- \* Start otvorí Ty a C je vybíjaný do primáru Tr.vn
- \*  $N_1 \gg N_2$  →  $U_{obl}$  je vysoké (impulz)
- \* nabíja sa "nabíjacia linka" (koaxiálny kábel) s kapacitou  $C_L$
- \* U medzi elektródami rastie → ionizačný proces
- \* U prekročí elektrickú pevnosť vzduchu → kmitový výboj
- \* energia z nabíjacej linky  $W_L = 1/2 C_L \cdot U_{obl}^2$



Obr. 85.

21

## Elektrický výboj

### Iskra

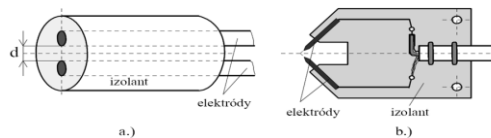
Optimálna medzera medzi elektródami je 0,3 ÷ 0,6 mm

(intenzita a presnosť)

polohy iskry

Vlastné meniče – žiariče

a.) s výbojom po povrchu



22

## Tlejivý výboj ako prijímač UZ vln



stabilný výboj,

definovaný pre  $I = 10^{-5} \div 1A$  (nízke tlaky-trubice)

parametre výboja závisia od p (aj akustický p)

elektrické parametre vieme vyhodnotiť

Vlastnosti:

- malé rozmery - bodový prijímač
- bez hmotných pohyblivých častí - vysoká medzná f
- recipročný režim práce
- komplikované napájanie - konst. =  $U_N$  cca 4 kV
- výbušné prostredie
- nestabilita výboja : (citlivosť, vlastné kmitanie)

23

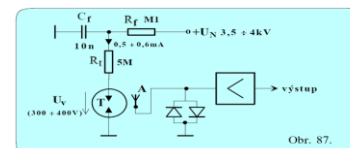
## Tlejivý výboj ako prijímač

výboj je medzi dvoma zahrotenými elektródami

prúd pri atm. tlaku musí byť obmedzený odporom (na  $10^{-5} \div 1A$ ), inak vzniká iskra

- pretekajúci prúd závisí od tlaku

- riešenie s "anténou" A.



Obr. 87.

Poznámka:

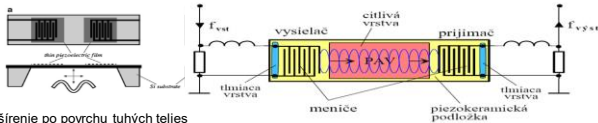
Nestabilita výboja - vážny problém. Prijímač sa náhodne stáva kmitajúcou sústavou, vydávajúcou zvuk (praskanie), čím je vyrušený z činnosti. Toto bráni zatiaľ jeho vážnejšiemu využitiu.

24

### PAV: Povrchová akustická vlna

SAW: Surface acoustic wave

"Rayleighiho vlny"



- šírenie po povrchu tuhých telies
  - c je vysoká ⇒ vysoké f (desiatky MHz)
  - filtre, analyzátory plynov, vlnkomery
  - budenie - interdigitálne meniče = hrebeňové elektródy na piezokeramickej podložke – PZT keramika, t.j.  $Pb(ZrTi)O_3$
  - rozmery a charakter meničov → základná f (napr. pre 30 MHz šírka 25  $\lambda_m$ , medzery 25  $\lambda_m$ )
- Senzor - dva interdigitálne meniče, medzi nimi je aktívna (selektívna) vrstva

25

### 6.3. Akustické metódy

Možnosti merania vzdialeností a súradníc:

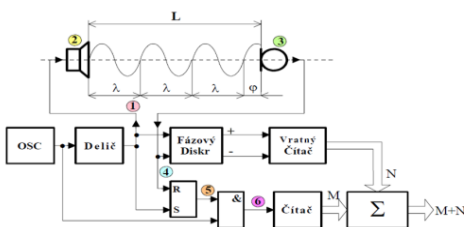
- vysielanie
  - kontinuálne metódy - nepretržité
  - impulzné metódy - vysielanie okamih
- zachytenie
  - priama vlna
  - odrazená vlna

26

### 6.3. Akustické metódy ► kontinuálne

#### Fázová metóda

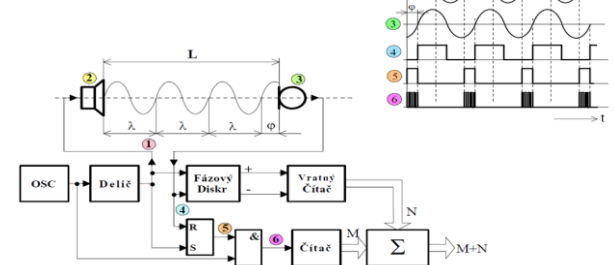
- inkrementálna metóda
- vždy pre  $\phi = 0$  → vznikne impulz → pridaná  $\lambda$  vzdialenosť (+ alebo -, smer)



27

### 6.3. Akustické metódy ► kontinuálne

#### Fázová metóda

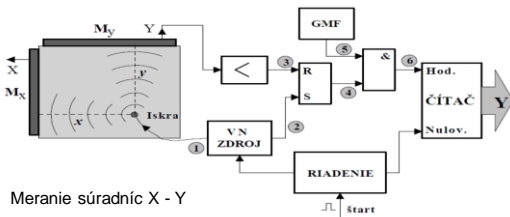


28

### 6.3. Akustické metódy ► impulzné

#### Impulzná metóda

- metódy sú absolútne - skutočná vzdialenosť.
- potrebný akustický impulz (strmý nástup)
- modulovaná nosná - rádiový impulz

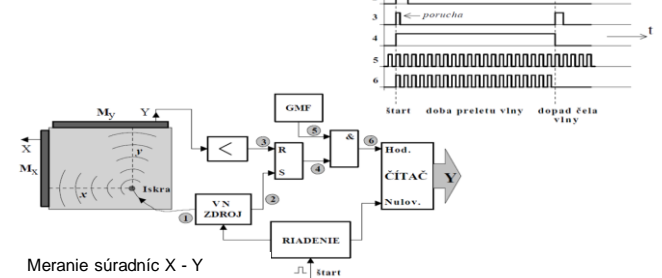


Meranie súradníc X - Y

29

### 6.3. Akustické metódy ► impulzné

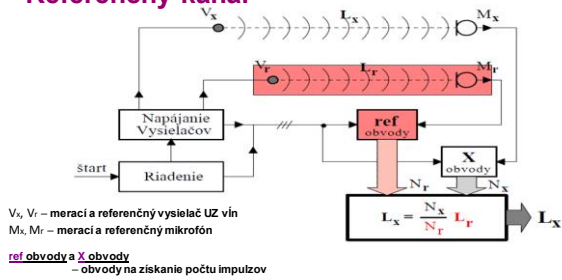
#### Impulzná metóda



Meranie súradníc X - Y

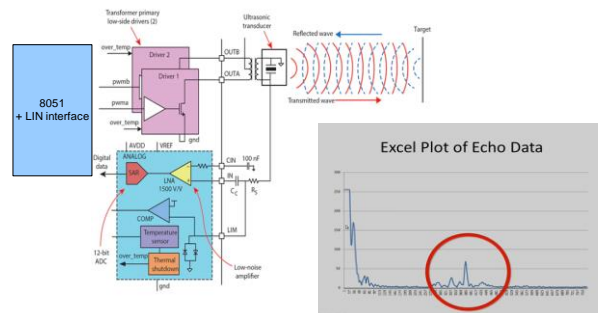
30

6.3. Akustické metódy ► impulzné  
Referenčný kanál



31

6.3. Akustické metódy ► PGA450 – ASIC od TI



Source: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pga450-q1.pdf>

32

6.3. Akustické metódy ► Porovnávací tabuľka

	Parallax PING J1	China HC SR-04	Devantech SRF08	Devantech SRF02	Maxbotix LV-MaxSonar-EZ0	Polaroid / SensComp 8500
robotshop.eu	33,29 €	1,67 – 6,61	36,40 €	14,27 €	28,81 €	--
rozsah opakovanie	0,2 – 3 m 20 ms	0,2 – 4 m 25 ms	0,03 – 6 m 65 ms	0,22 – 6 m 65 ms	0,3 – 5 m 50 ms	0,15 – 10,5 m 80 ms
presnosť napájanie	+/- 2 cm 5 V	0,5 cm 5 V	3-4 cm 5 V	3-4 cm 5 V	1% 2,5 – 5 V	1% 5 V
budenie	40 kHz	40 kHz	40 kHz	40 kHz	42 kHz	50kHz
interface	start+echo	start, echo	I2C bus	I2C, serial	serial, analog, pulse	Init / echo / blank...

33

6.3. Akustické metódy ► impulzné  
Priestorové merania

usporiadanie s bodovými,

kvázibodovými, resp.  
guľovými mikrofónmi

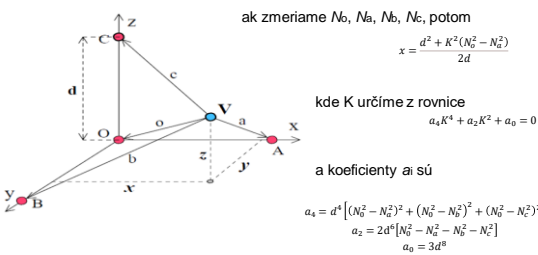
nutné min. 3, pre 4 a viac možná i určitá kompenzácia

- a.) kompenzuje vplyv teploty a vlhkosti (4 ks)
- b.) kompenzuje aj gradient teploty v zvislom smere – časť (5 ks)

- zdroj guľovej vlny (piezo, iskra)
- snímače bodové, kvázibodové, alebo guľové
- meriame 4 (5) vzdialeností, (počty impulzov Na, Nb, Nc, No)
- súradnice – zložitejšie vzťahy

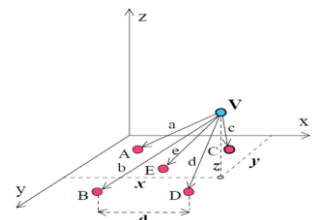
34

6.3. Akustické metódy ► impulzné  
Priestorové merania



35

6.3. Akustické metódy ► impulzné  
Priestorové merania



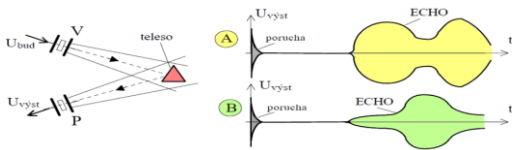
**Poznámka:**  
Kompenzácia vektorových vplyvov - prúdenia je možná len cyklickou zámennou funkcie → nutné recipročné meniče.

36

6.3. Akustické metódy ► impulzné

**Určenie tvaru telesa z echa**

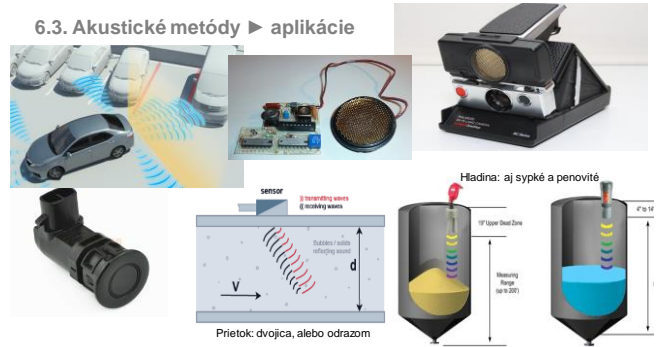
približná metóda pre jednoduché, značne odlišné telesá  
využitá je odrazená vlna impulznej metódy



- obálka odrazenej vlny má určitý tvar - ECHO
- tvar je pre každé teleso iný (závisí tiež od natočenia)
- A, B sú echa pre dva rôzne typy telesa

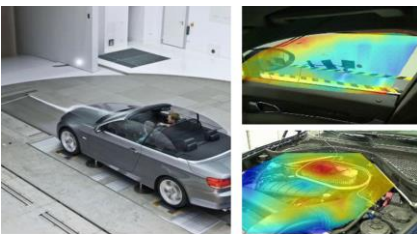
Porovnaním so "standardnými tvarmi" sa dá približne usúdiť, čo sa nachádza v zornom poli.

6.3. Akustické metódy ► aplikácie

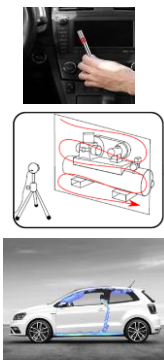


6.3. Akustické metódy ► aplikácie

**Akustická mapa**



Analyza hlučnosti, odhlučnenie problematických častí



Source: [https://www.microflown.com/assets/uploads/bestanden/Product-Leaflet/Product-Leaflet\\_ScarPaint-8pages.pdf](https://www.microflown.com/assets/uploads/bestanden/Product-Leaflet/Product-Leaflet_ScarPaint-8pages.pdf)