



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FUNDAMENTS OF HUMAN VOICE BIOMECHANICS

Part 2

JAN ŠVEC

Department of Biophysics, Faculty of Science,
Palacký University Olomouc, CZ

Univerzita Palackého jako komplexní vzdělávací instituce

CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002337

ZÁKLADY BIOMECHANIKY LIDSKÉHO HLASU

Část 2

JAN ŠVEC

Katedra experimentální fyziky, Př.F., UP v Olomouci

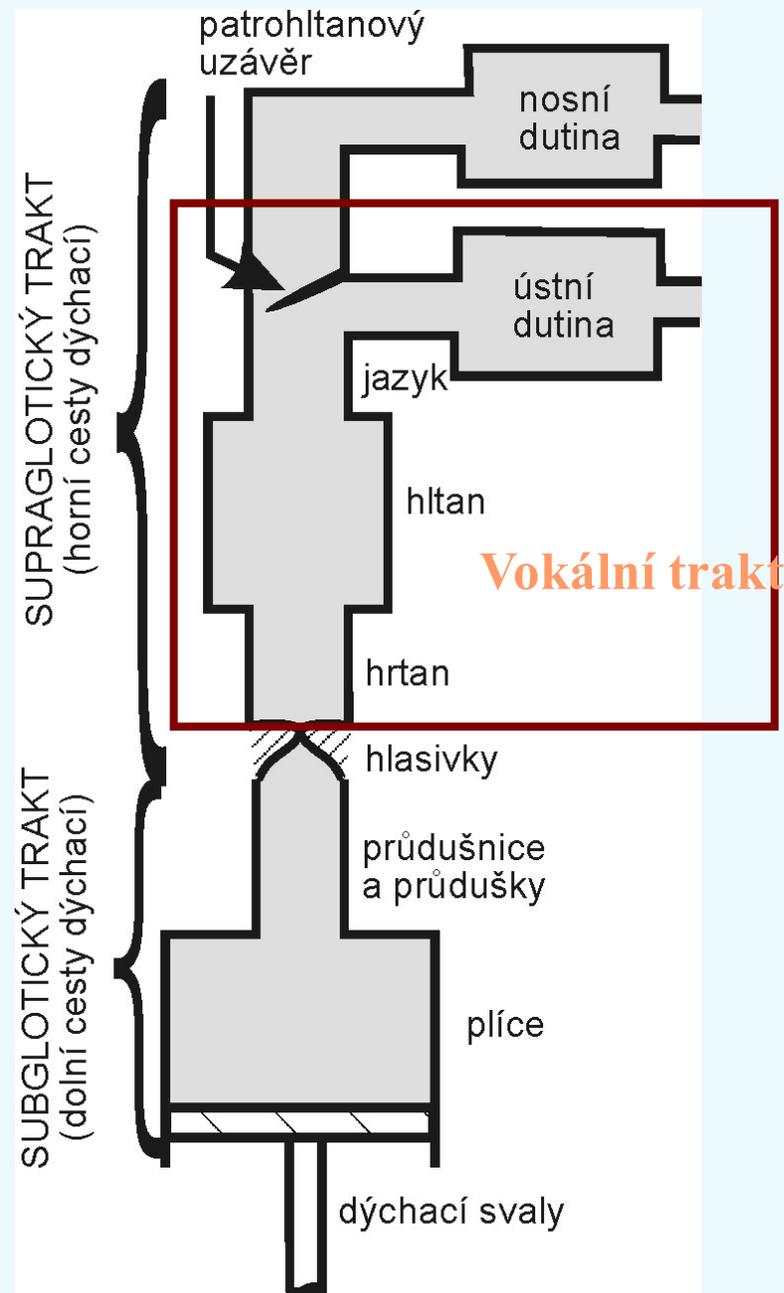
Literatura:

**Jan Švec: *Studium mechanicko-akustických vlastností lidského hlasu.*
(Dizertační práce), Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká
fakulta, Katedra experimentální fyziky, 1996.**

Glottis = hlasivková štěrbina
Supra = nad
Sub = pod
Subglottický = podhlasivkový
Supraglottický = nadhlasivkový

FYZIKÁLNĚ- AKUSTICKÉ SCHÉMA HLASOVÉHO SYSTÉMU

Flanagan (1965)



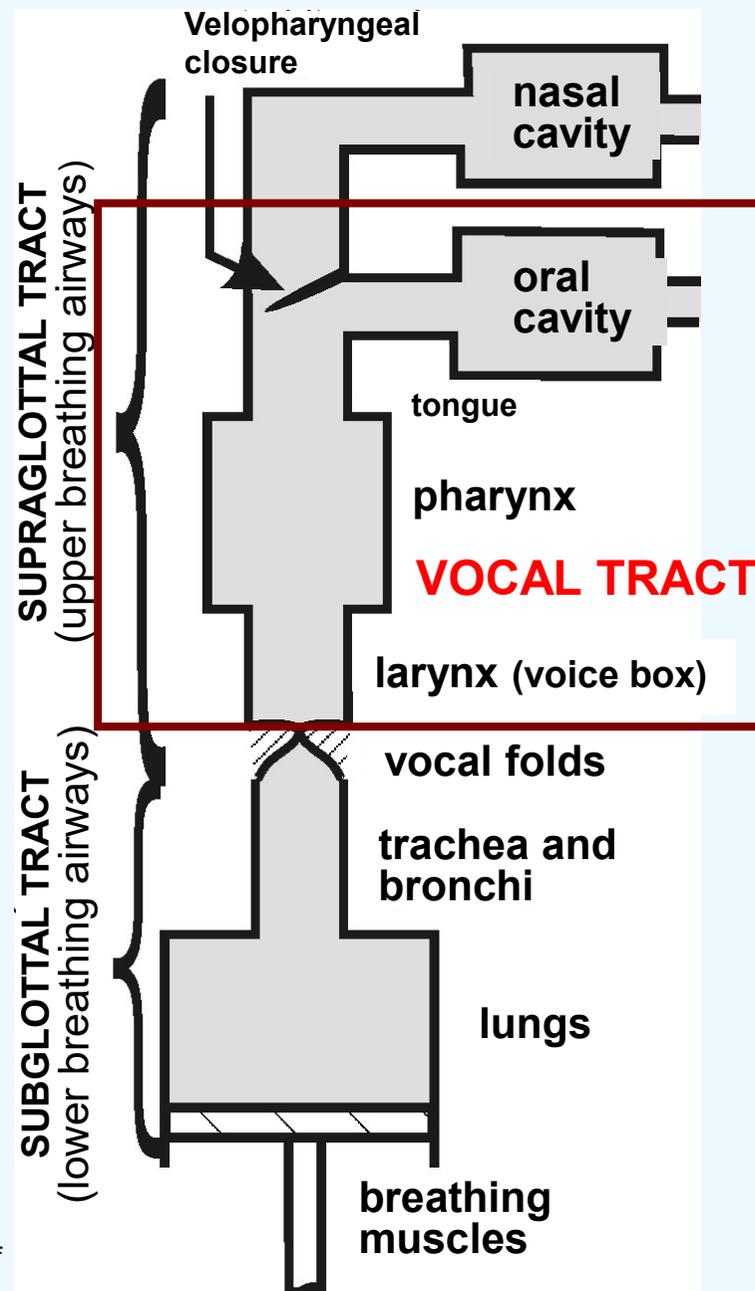
Glottis = space between the vocal folds
Supra = above
Sub = below
Subglottal = below the glottis
Supraglottal = above the glottis

PHYSICAL- ACOUSTICAL ANALOGY OF VOICE PRODUCTION SYSTEM

Flanagan (1965)

Flanagan JL. Speech analysis, synthesis and perception. New York: Academic Press, 1965.

Švec J. Studium mechanicko-akustických vlastností lidského hlasu. [Studies of the mechano-acoustic properties of the human voice source]. (Doctoral dissertation). Olomouc: Palacký University, Faculty of Natural Sciences, 1996.



HLAS:

**Využívá specifické typy zvuku, který vydává
člověk**

CO JE TO ZVUK?

VOICE:

Makes use of specific sounds produced by humans

WHAT IS SOUND?

CO JE TO ZVUK?

Rychlé změny tlaku vzduchu (akustický tlak),
které se šíří formou vlnění a jsou slyšitelné.

(Zjednodušená definice)

Změny akustického tlaku vzduchu lze sledovat
prostřednictvím mikrofonu ve spojení s jednoduchým
osciloskopickým přístrojem

WHAT IS SOUND?

Quick changes of air pressure (acoustic pressure) which spread as waves and are audible (simplified definition)

The changes of acoustic pressure can be monitored using a microphone and a simple oscilloscope.

DEMONSTRACE / DEMONSTRATION
zvuk / sound

VOCE VISTA

(software)



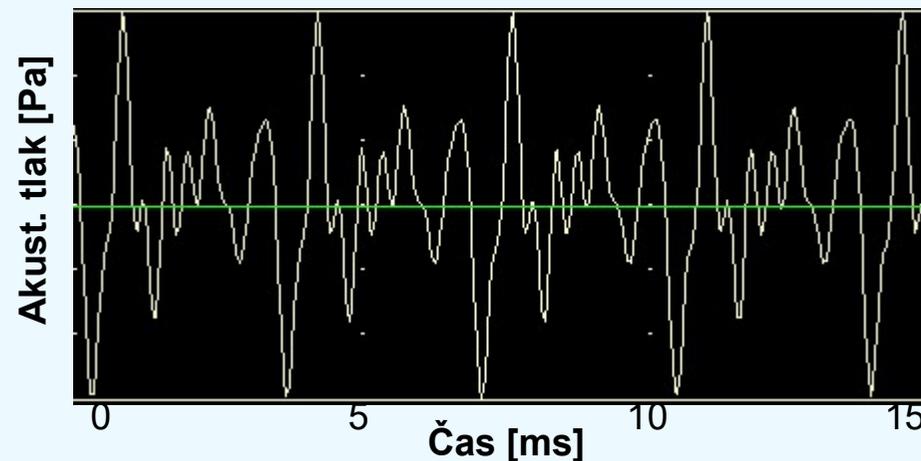
D.G. Miller

DRUHY ZVUKŮ

Zvuky se dělí na :

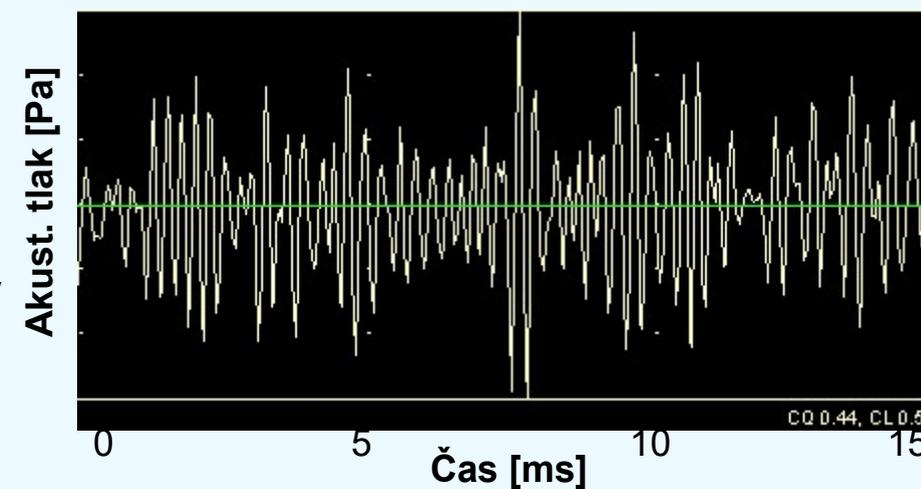
A) Tóny

periodický průběh vlny



B) Šumy

neperiodický průběh vlny

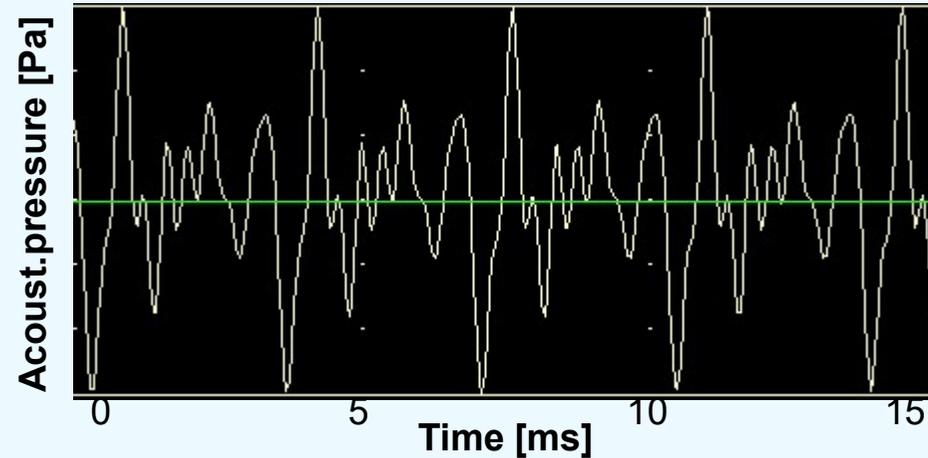


TYPES OF SOUND

Sounds can be divided to :

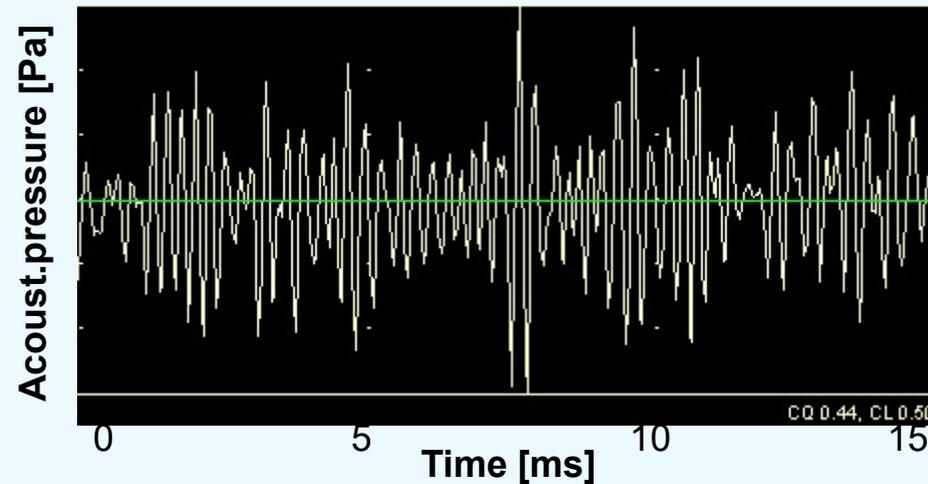
A) Tones

Periodic waveform



B) Noises

Non-periodic waveform



TÓN: URČENÍ ZÁKLADNÍ PERIODY A ZÁKLADNÍ FREKVENCE

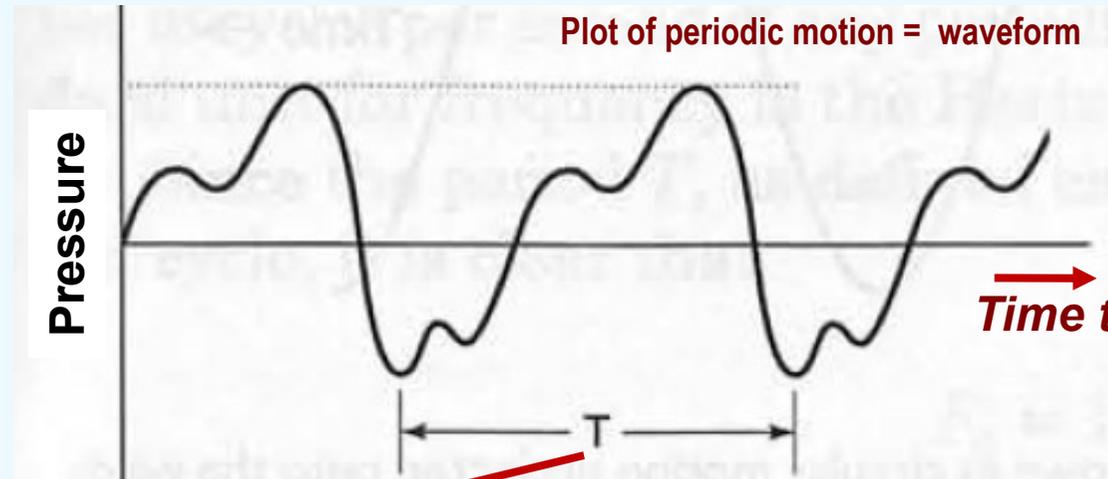


Základní perioda = čas za který se děj opakuje.
Symbol: T . Jednotka: [s]

Základní frekvence = kolikrát za sekundu se děj opakuje.
Symbol: f_o . Jednotka : [Hz]

Platí: $f_o = 1/T$ and $T = 1/ f_o$

TONE: FUNDAMENTAL PERIOD AND FUNDAMENTAL FREQUENCY



Fundamental period = time after which the event repeats.
Symbol: T . Unit: $[s]$

Fundamental frequency = number of repetitions per second.
Symbol: f_o . Unit: $[Hz]$

It holds: $f_o = 1/T$ and $T = 1/f_o$

TÓNY

Mají periodický průběh vln. Dělí se na:

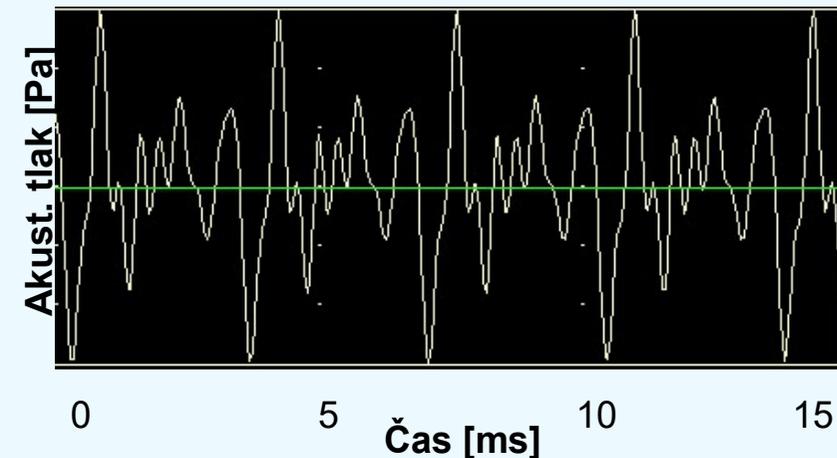
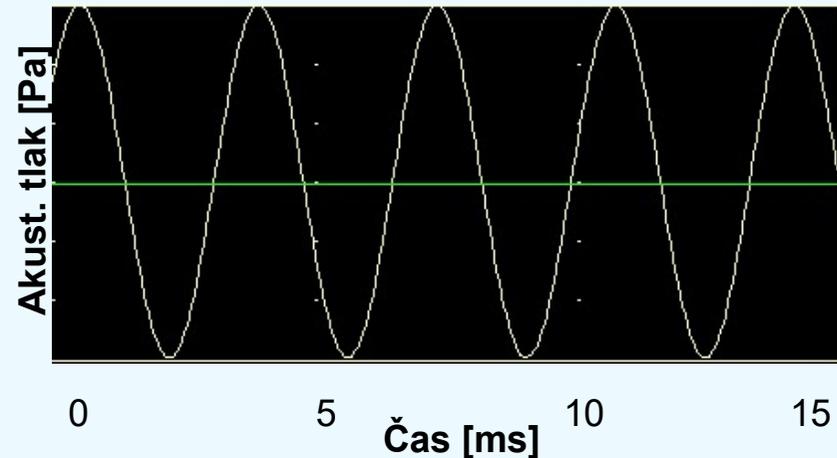
1) Čisté tóny - sinusový průběh v čase. Nejjednodušší tóny. V přírodě se běžně nevyskytují. Jsou plně charakterizovány základní frekvencí $f_0 =$ [Hz] a amplitudou A.

Spektrum čistých tónů vykazuje zesílení pouze na jedné frekvenci (viz dále).

2) Složené tóny - zvuky, ve kterém je tvar zvukové vlny periodický ale není sinusový.

Spektrum složených tónů je harmonické: skládá se ze základní frekvence a jejích celočíselných násobků (tzv. svrchních harmonických tónů) – (viz dále).

Svrchní harmonické tóny zodpovídají za barvu zvuku. Barva zvuku umožňuje od sebe odlišit dva různé tóny na stejné frekvenci (klavír, cimbál, kytara, trubka, dva různé hlasy, atd.)

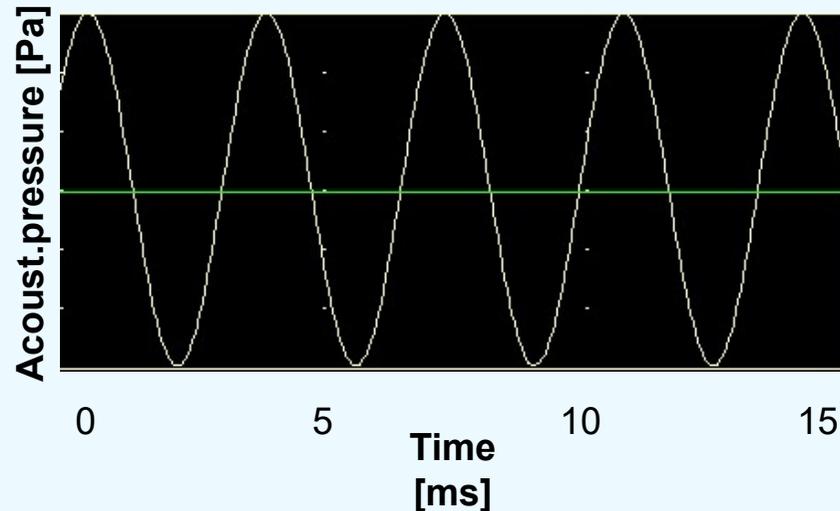


TONES

Their waveform is periodic. Can be divided to:

1) Pure tones – have sinusoidal waveforms. They are the simplest tones. Hard to find in nature. Fully characterized by frequency f [Hz], amplitude and phase.

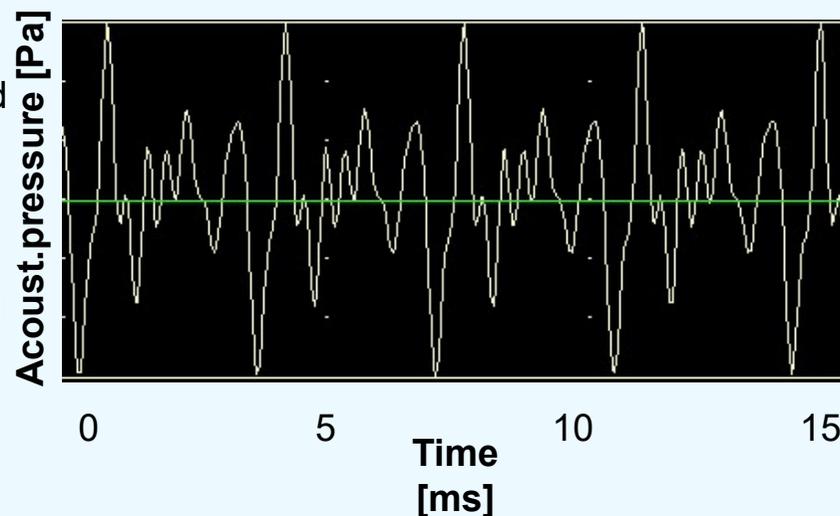
Spectrum of pure tones shows a peak at just a single frequency (see later).



2) Complex tones - sounds with periodic but non-sinusoidal waveform,

Spectrum of combined tones is harmonic: consists of the fundamental frequency and its multiples -“overtones” or „harmonics“ (see later).

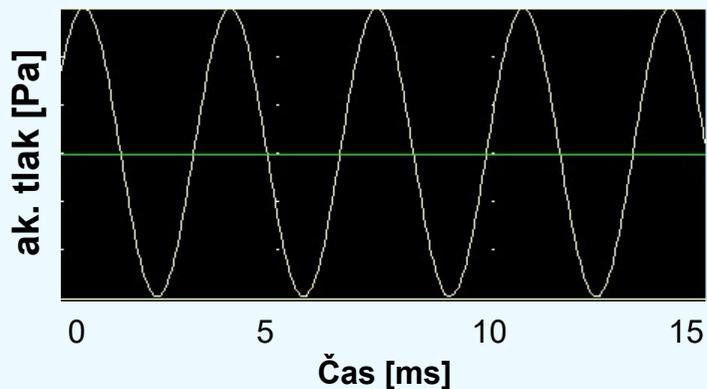
Overtones are responsible for the sound timbre. Timbre allows distinguishing two sounds that have the same frequency and intensity (piano, guitar, trumpet, two different persons etc.)



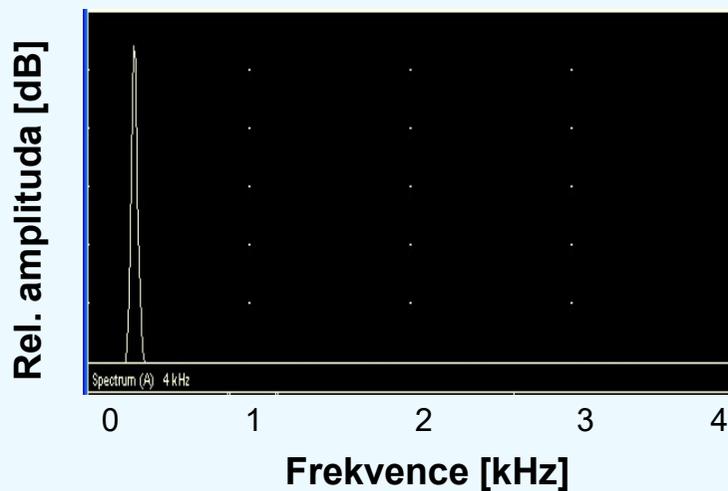
TÓNY: tvar vlny a spektrum

1) Čisté tóny

Časový průběh - sinusoida.

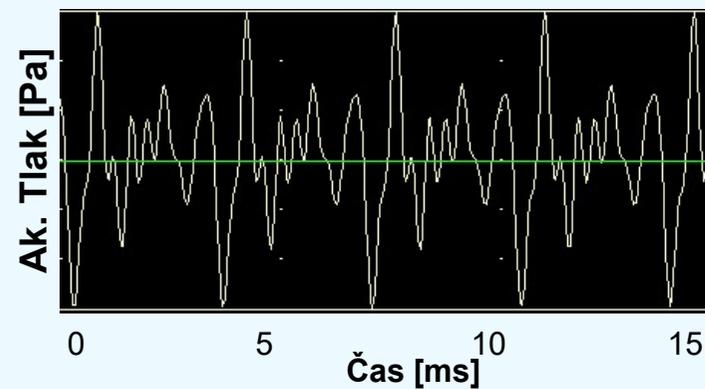


Spektrum - zesílení pouze na jedné frekvenci.

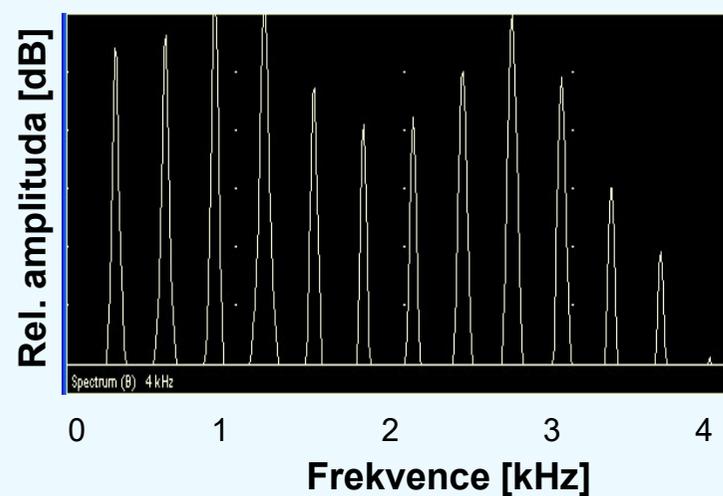


2) Složené tóny

Časový průběh - periodický, nesinusový.



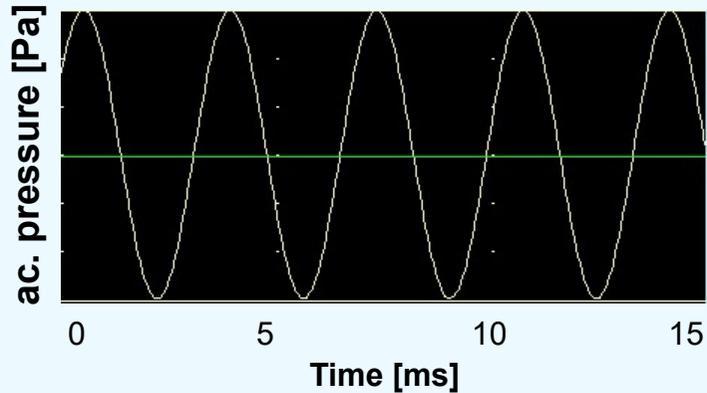
Spektrum - harmonické: základní frekvence + její celočíselné násobky (tzv. svrchní harmonické tóny).



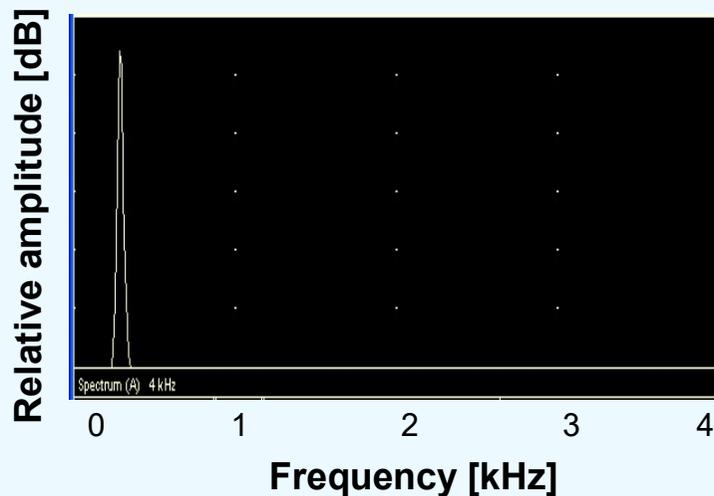
TONES: waveforms vs. spectrum

1) PURE tones

Waveform - sinusoidal.

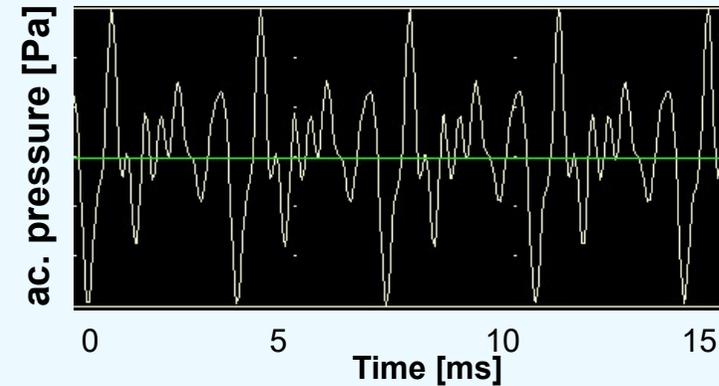


Spectrum - peak at a single frequency.

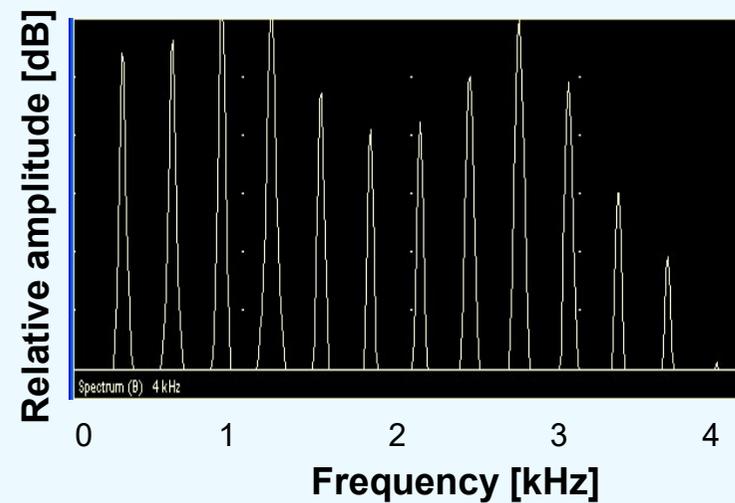


2) COMPLEX tones

Waveform - periodic, non-sinusoidal.



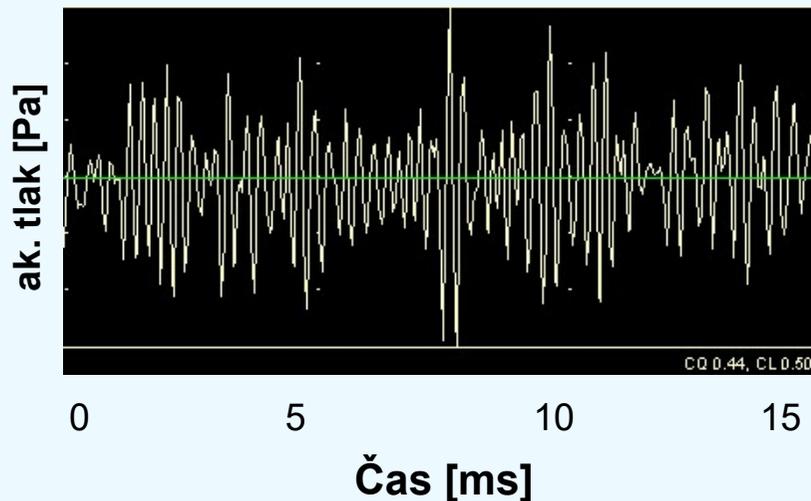
Spectrum - discrete, harmonic: fundamental frequency + its multiples - "overtones".



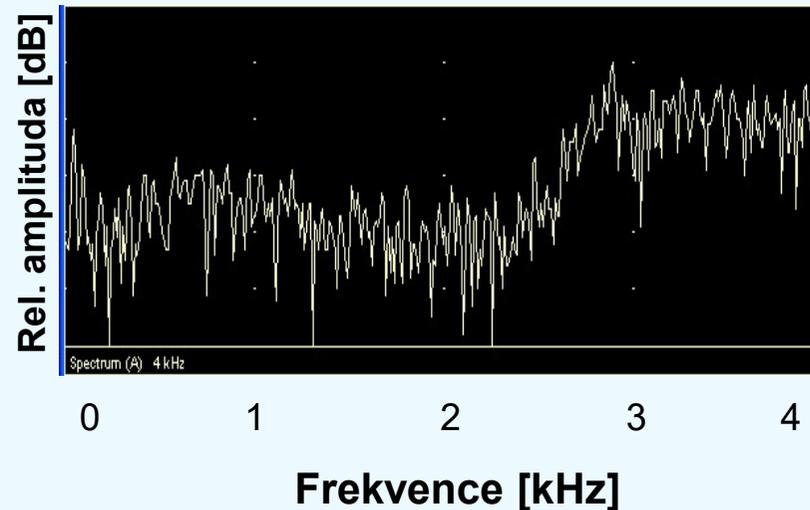
ŠUMY

Šumy jsou složené zvuky, které jsou neperiodické. Jejich spektrum je neharmonické, může být spojité.

Časový průběh - nepravidelný



Spektrum - zesílení pásem frekvencí

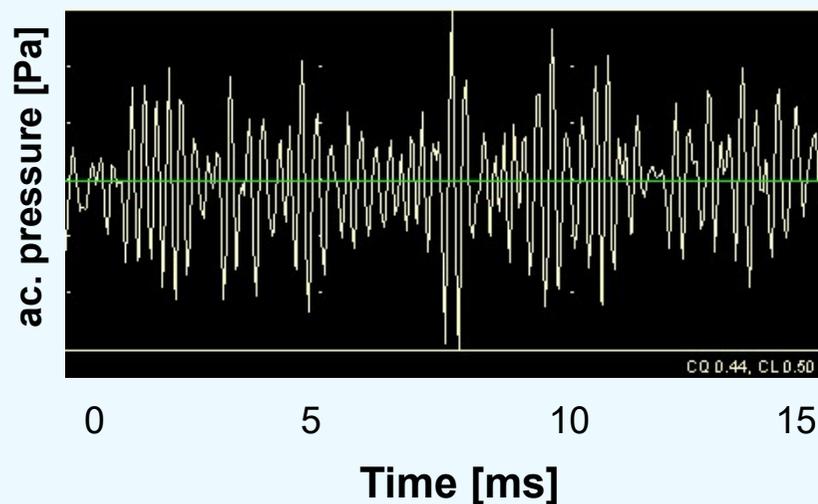


NOISES

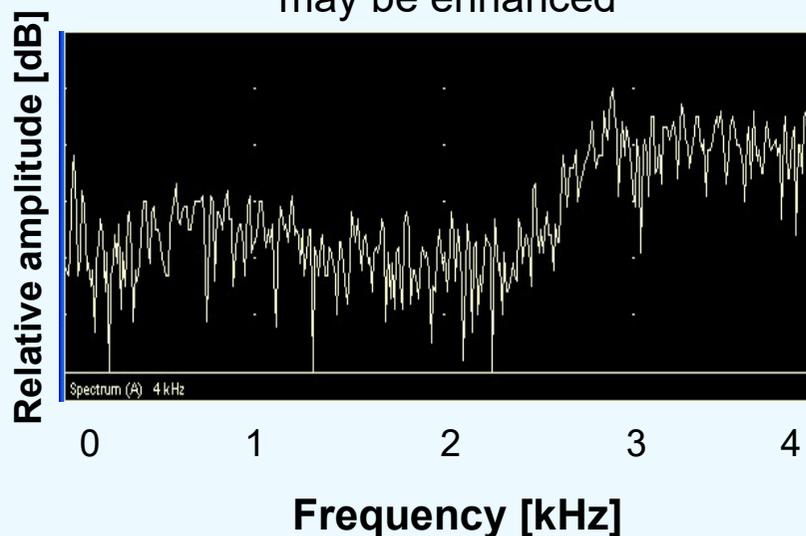
Noises are complex non-periodic sounds.

Their spectrum is non-harmonic, can be continuous.

Time waveform - non-periodic



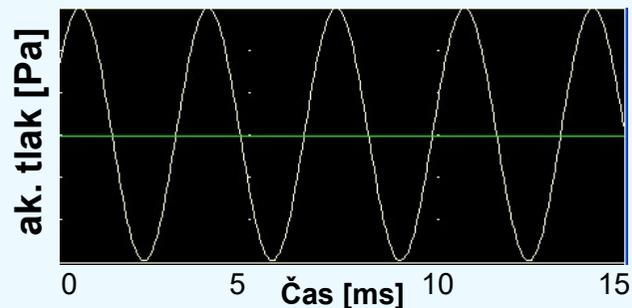
Spectrum - some frequency bands may be enhanced



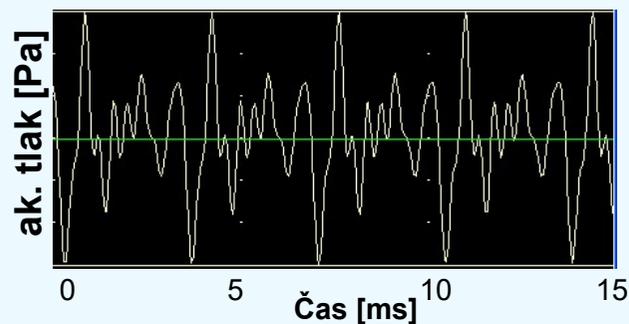
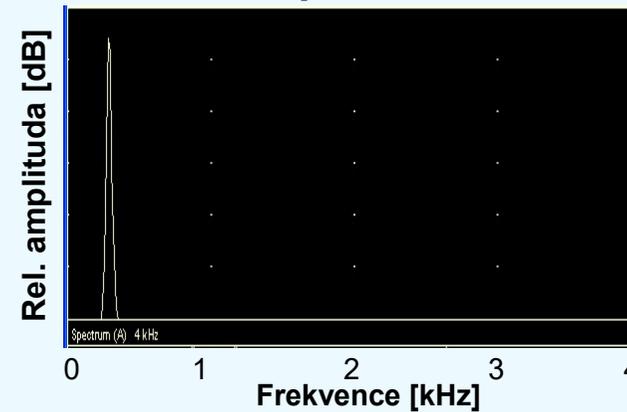
DRUHY ZVUKŮ - SHRNUÍ

Časový průběh

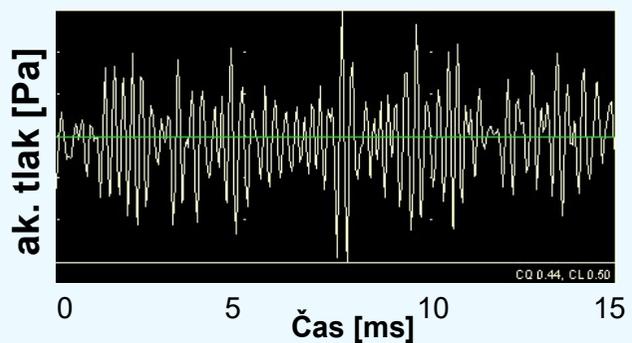
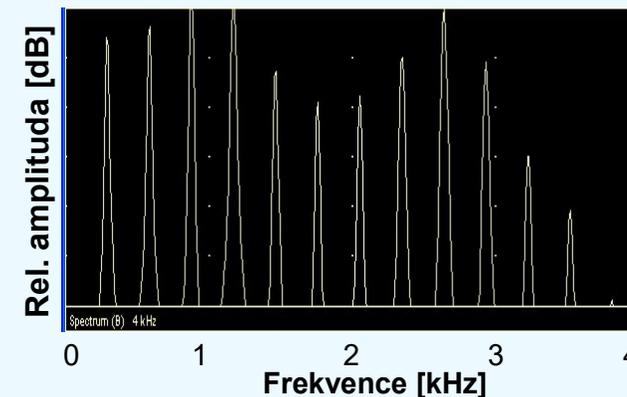
Spektrum



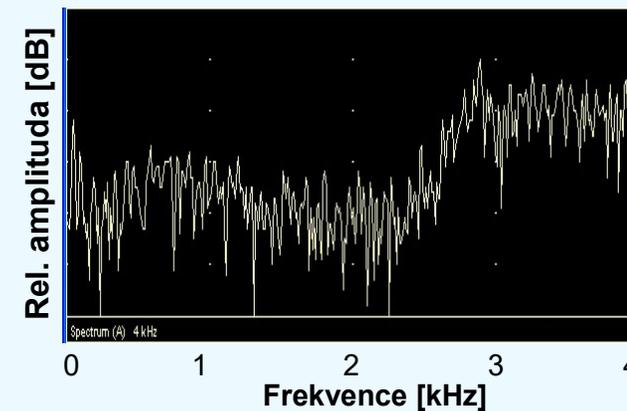
A1) Čisté tóny



A2) Složené tóny



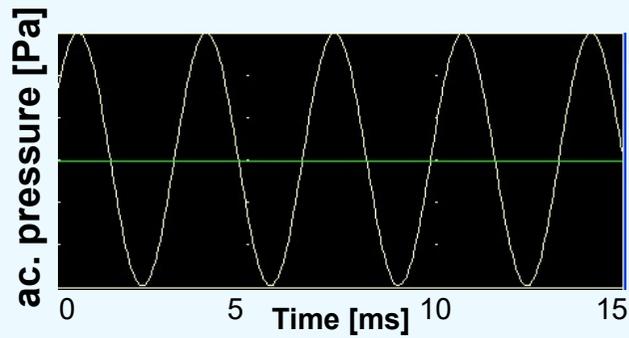
B) Šumy



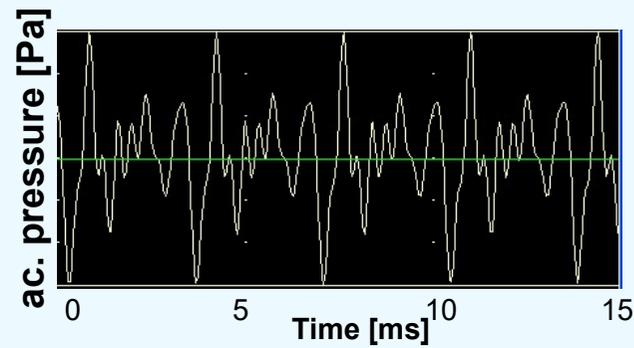
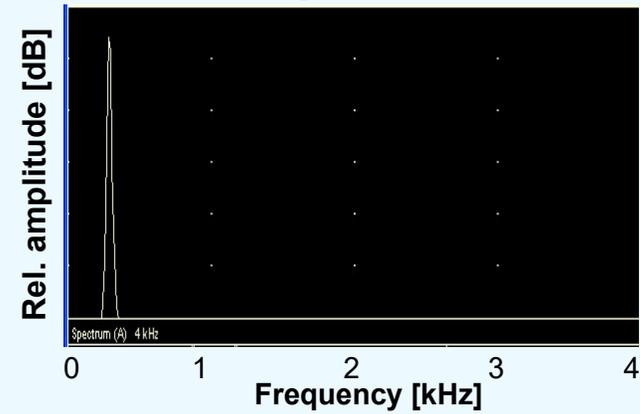
SOUND TYPES - SUMMARY

Waveform

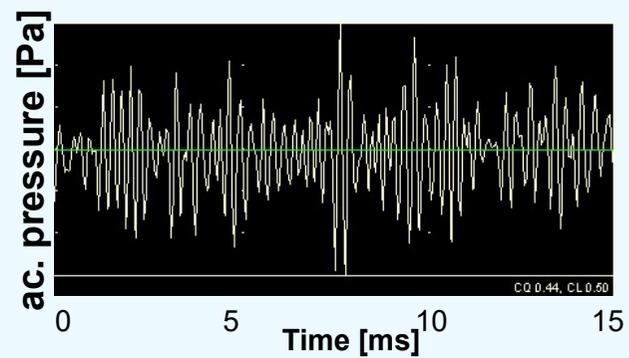
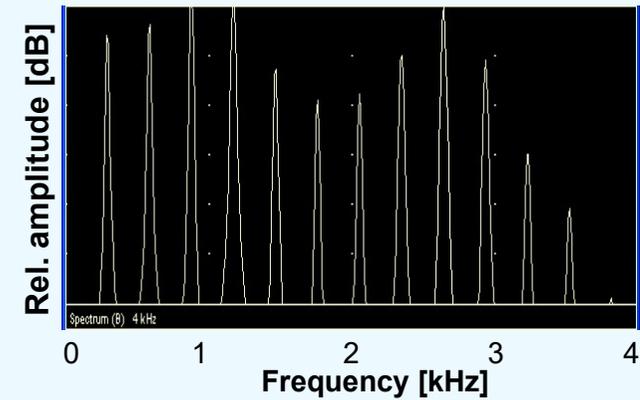
Spectrum



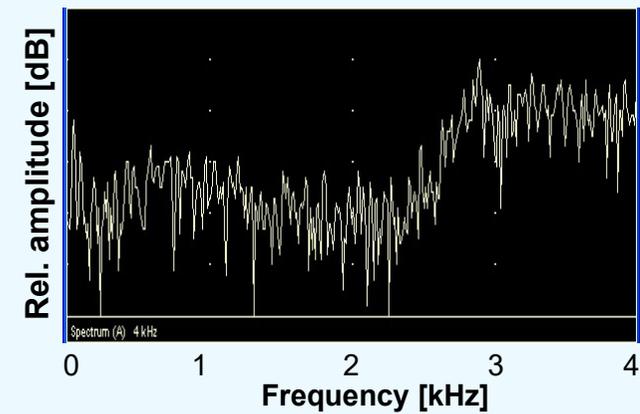
A1) Pure tones



A2) Complex tones



B) Noises



DEMONSTRACE
druhy zvuků, které vytváří člověk

VOCE VISTA

(shareware)



D.G. Miller

DEMONSTRATION
sound types created by human

VOCE VISTA

(software)



D.G. Miller

cca 1960



AKUSTIKA HLASU: TEORIE ZDROJE A FILTRU

Gunnar Fant, Švédsko (1960)

2005



Gunnar M. Fant. *Acoustic theory of speech production*, the Hague: Mouton, 1960.

Hlas – zvuk tvořený vlivem kmitání hlasivek, který je dále upraven rezonancemi v dutinách vokálního traktu

cca 1960



ACOUSTIC VOICE PRODUCTION: SOURCE – FILTER THEORY

Gunnar Fant, Sweden (1960)

2005



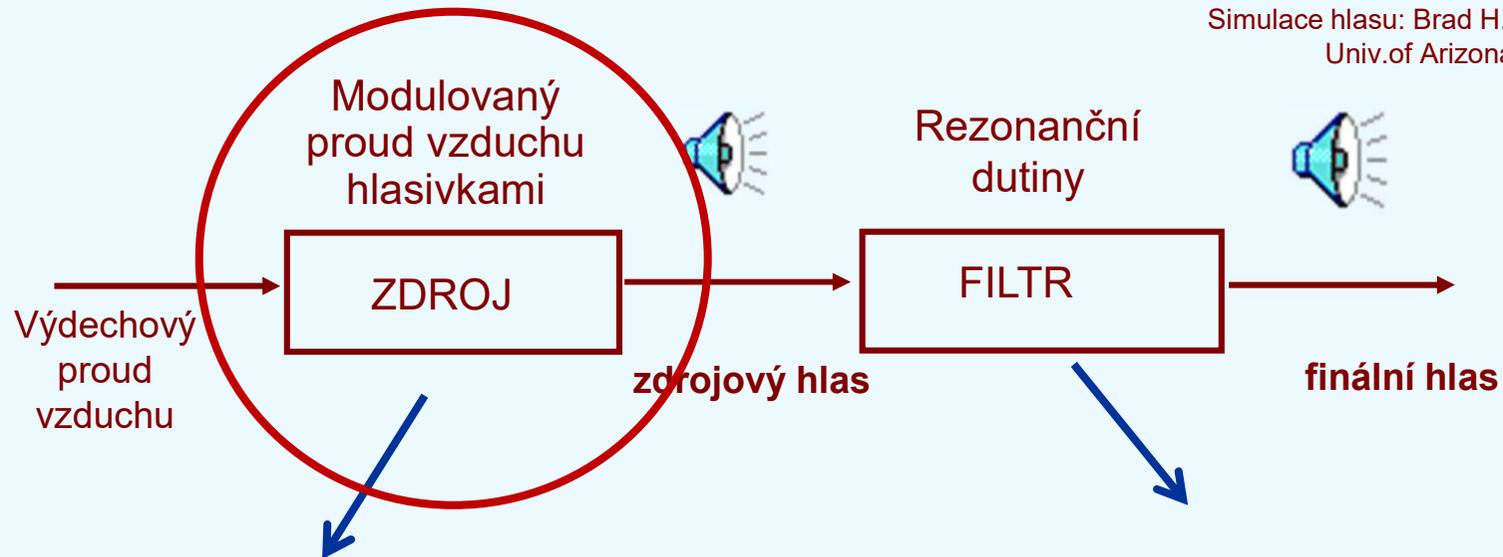
Gunnar M. Fant. *Acoustic theory of speech production*, the Hague: Mouton, 1960.

Voice – sound created by air flow which is modulated by vocal fold oscillations and then further modified by resonances of the vocal tract cavities.

TEORIE ZDROJE A FILTRU



Simulace hlasu: Brad H. Story,
Univ. of Arizona, USA



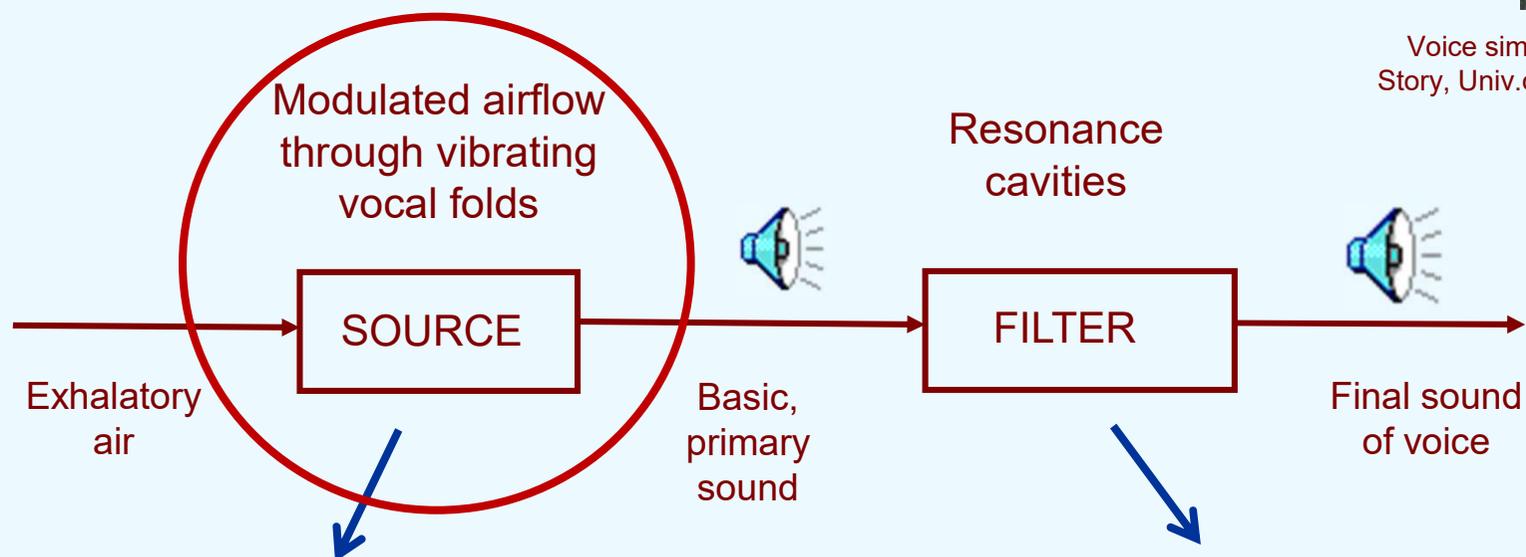
- Frekvence (výška tónu)
- Základní intenzita (hlasitost)
- Délka fonace
- Primární kvalita hlasu (dyšnost, hrubost, chraptavost,...)
- Primární barva hlasu

- Samohlásky + souhlásky
- Konečná intenzita (hlasitost)
- Konečná kvalita hlasu (konečná barva, „rezonance“, pěvecký formant,...)

SOURCE-FILTER THEORY



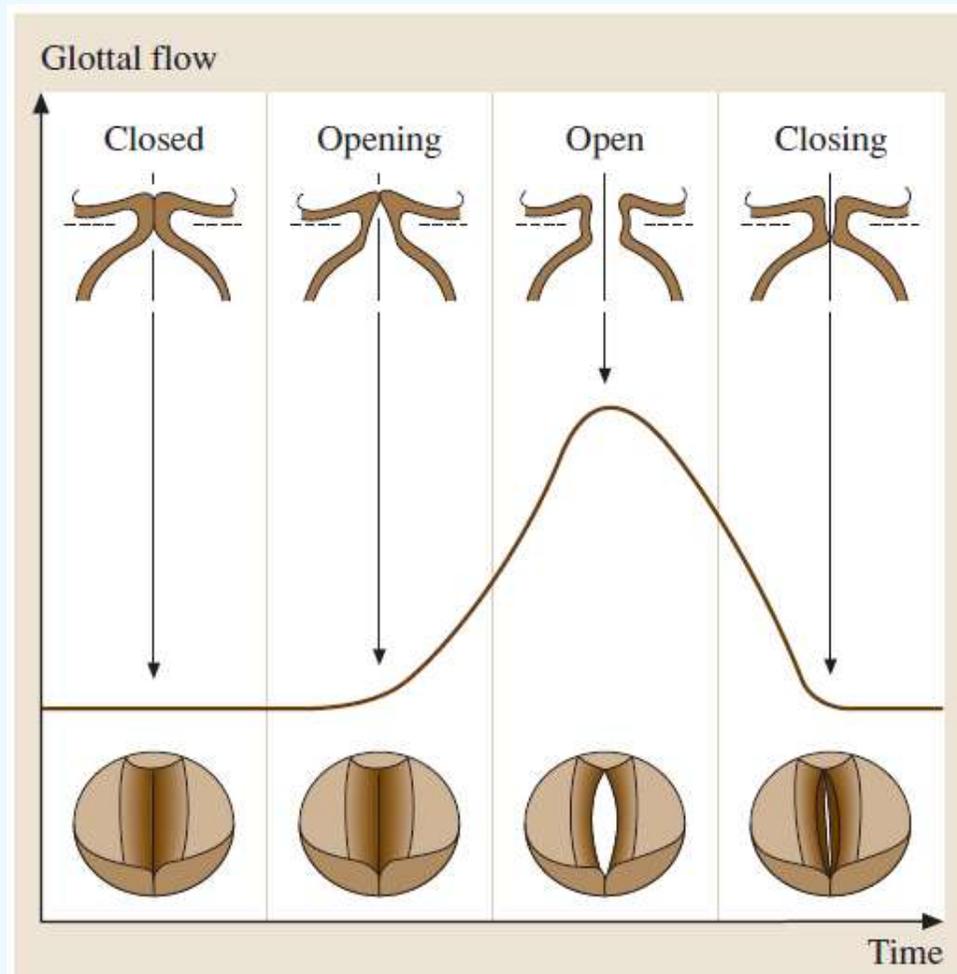
Voice simulation: Brad H. Story, Univ. of Arizona, USA



- Fundamental frequency (pitch)
- Primary intensity (loudness)
- Duration of phonation
- Primary voice quality (breathiness, hoarseness,...)
- Primary voice timbre

- Vowels + consonants
- Final intensity (loudness)
- Secondary voice quality (resonance, ring, singer's formant,...)

Zdroj hlasu: průchod vzduchu přes glottis („flow glottogram“)



Vztah mezi množstvím vzduchu procházejícím přes glottis (uprostřed), konfigurací glottis v koronálním řezu v jednotlivých fázích cyklu (nahore) a laryngoskopickou konfigurací glottis (dole).

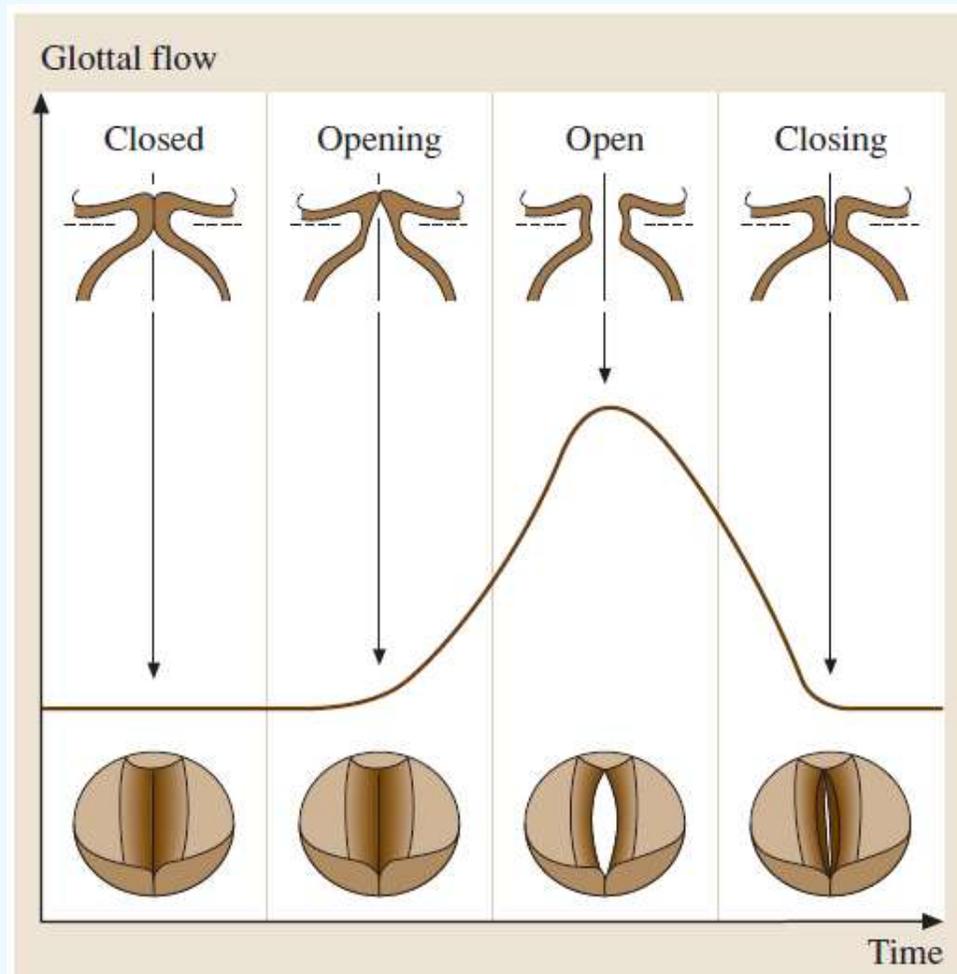
Průměrné množství vzduchu se zvyšuje když se hlasivky otvírají a glottis se zvětšuje.

Průměrné množství se zmenšuje když se hlasivky uzavírají a glottis se zmenšuje.

Když jsou hlasivky uzavřeny, žádný vzduch neprochází.

Modulace proudu vzduchu otvíráním a zavíráním hlasivek vytváří zvuk - zdrojový hlas.

Voice source: glottal airflow („flow glottogram“)



Relationship between the glottal airflow (middle), glottal configuration in coronal sections in the different phases of vibration cycle (top) and laryngoscopically seen glottal configuration (bottom).

The airflow increases when vocal folds are opening and glottis enlarges.

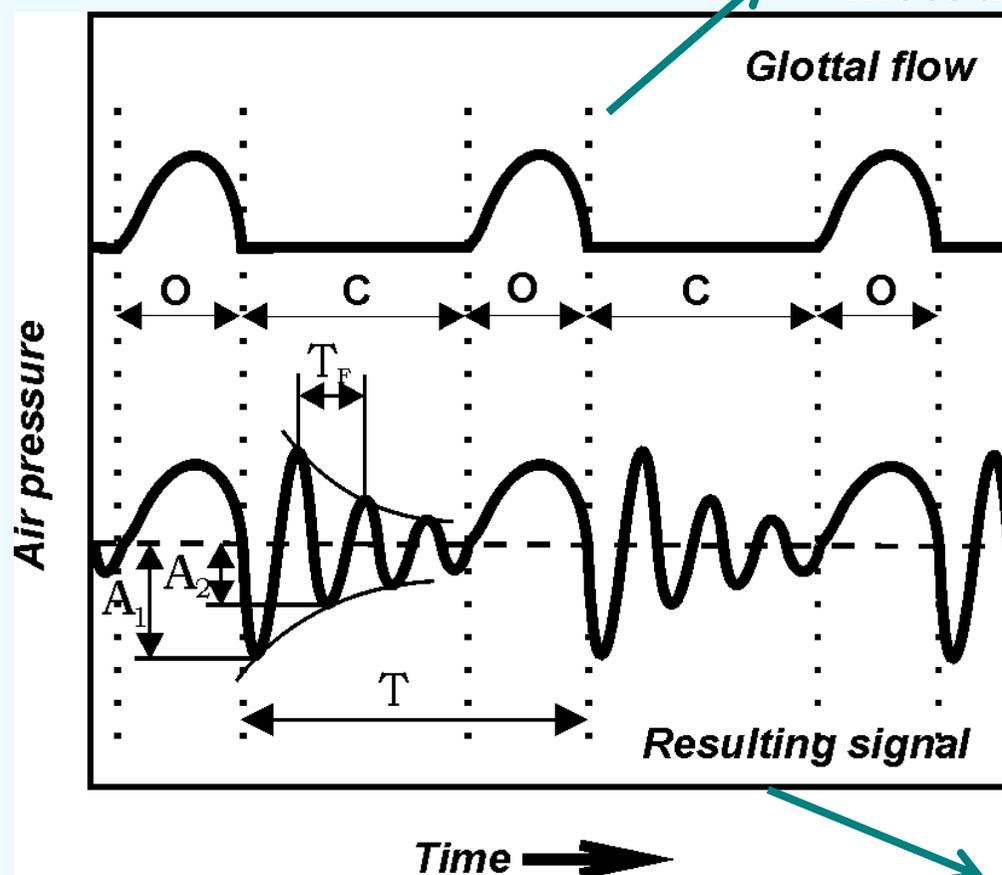
The airflow decreases when vocal folds are closing and glottis gets smaller.

When glottis is closed, there is no glottal airflow.

Modulation of the airflow due to the vocal folds opening and closing creates the primary basic sound of voice.

Dva stupně tvoření lidského hlasu (teorie zdroje a filtru)

Nelze přímo měřit, lze získat tzv. metodou inverzní filtrace



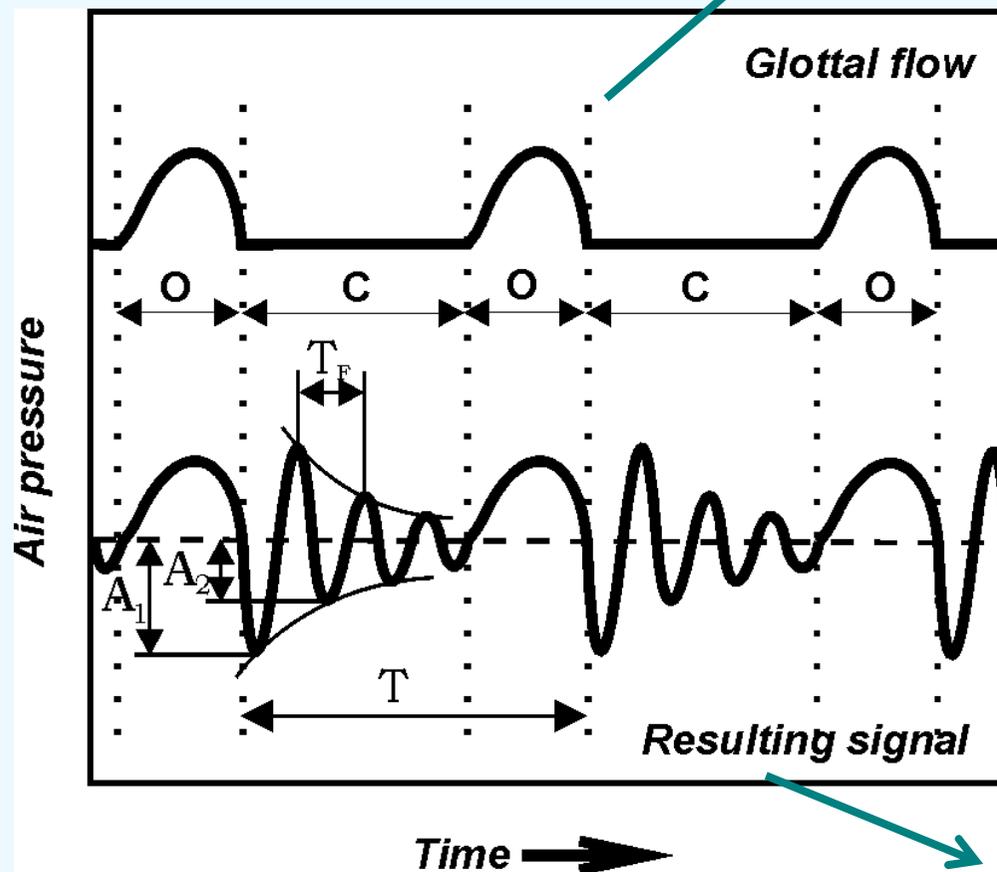
Zdrojový zvuk

Finální zvuk =
zdrojový zvuk +
přidané
rezonance dutin
vokálního traktu

Snímán mikrofónem

TWO STEPS OF VOICE PRODUCTION (source – filter theory)

Not directly measurable, could be obtained by Inverse filtering method



Voice source

*Final voice =
voice source +
resonances of
the vocal tract
cavities*

picked up by a microphone

DEMONSTRACE hlas

VOCE VISTA

(speciální software pro sledování hlasu)



D.G. Miller

DEMONSTRATION voice

VOCE VISTA

(special software for voice monitoring)



D.G. Miller

FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLASU A ŘEČI

UCHO FUNGUJE JAKO FREKVENČNÍ
ANALYZÁTOR

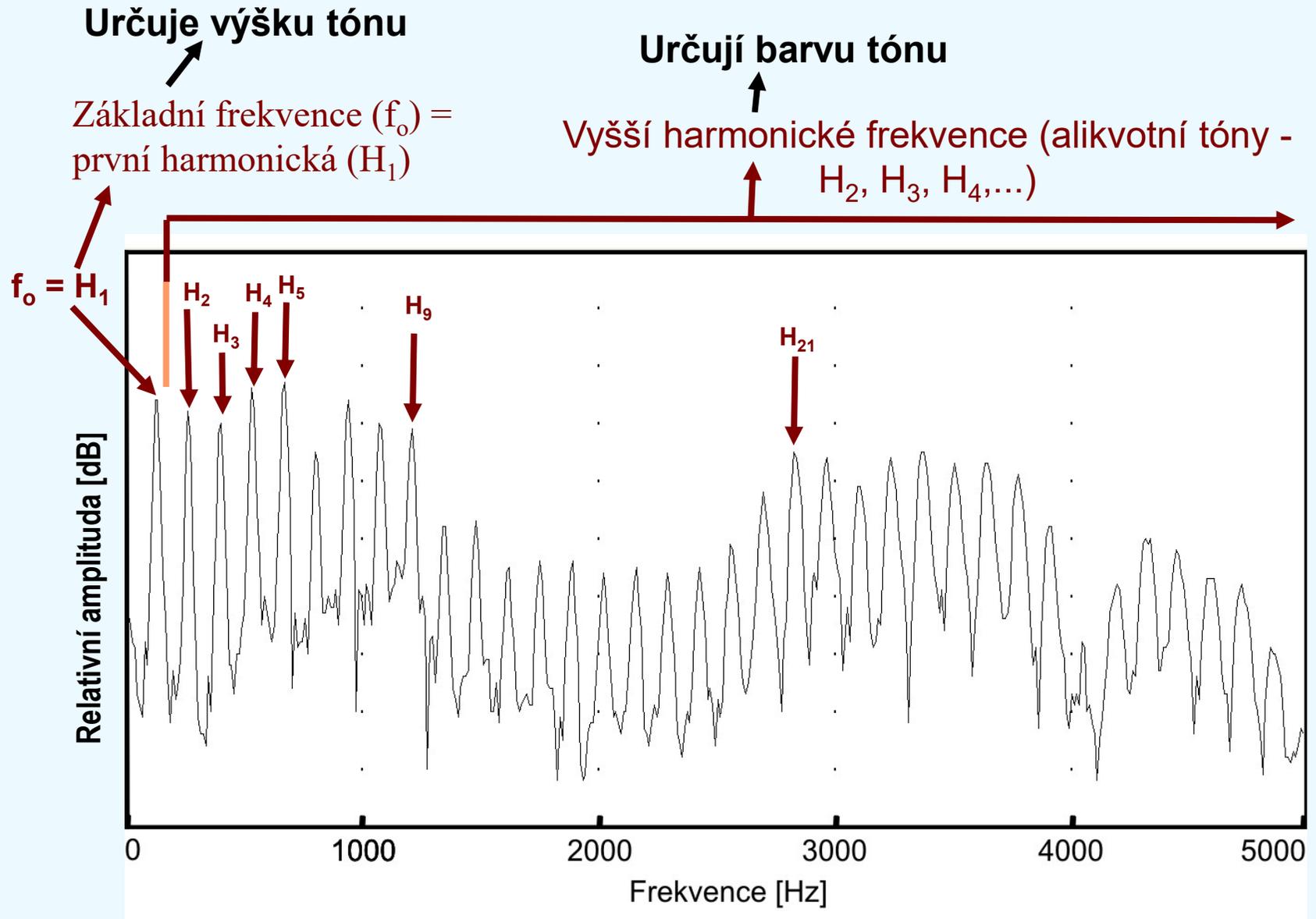
Průběh změn tlaku vzduchu při hlasu lze
alternativně zobrazit ve formě frekvenčního spektra

FREQUENCY SPECTRUM OF VOICE AND SPEECH

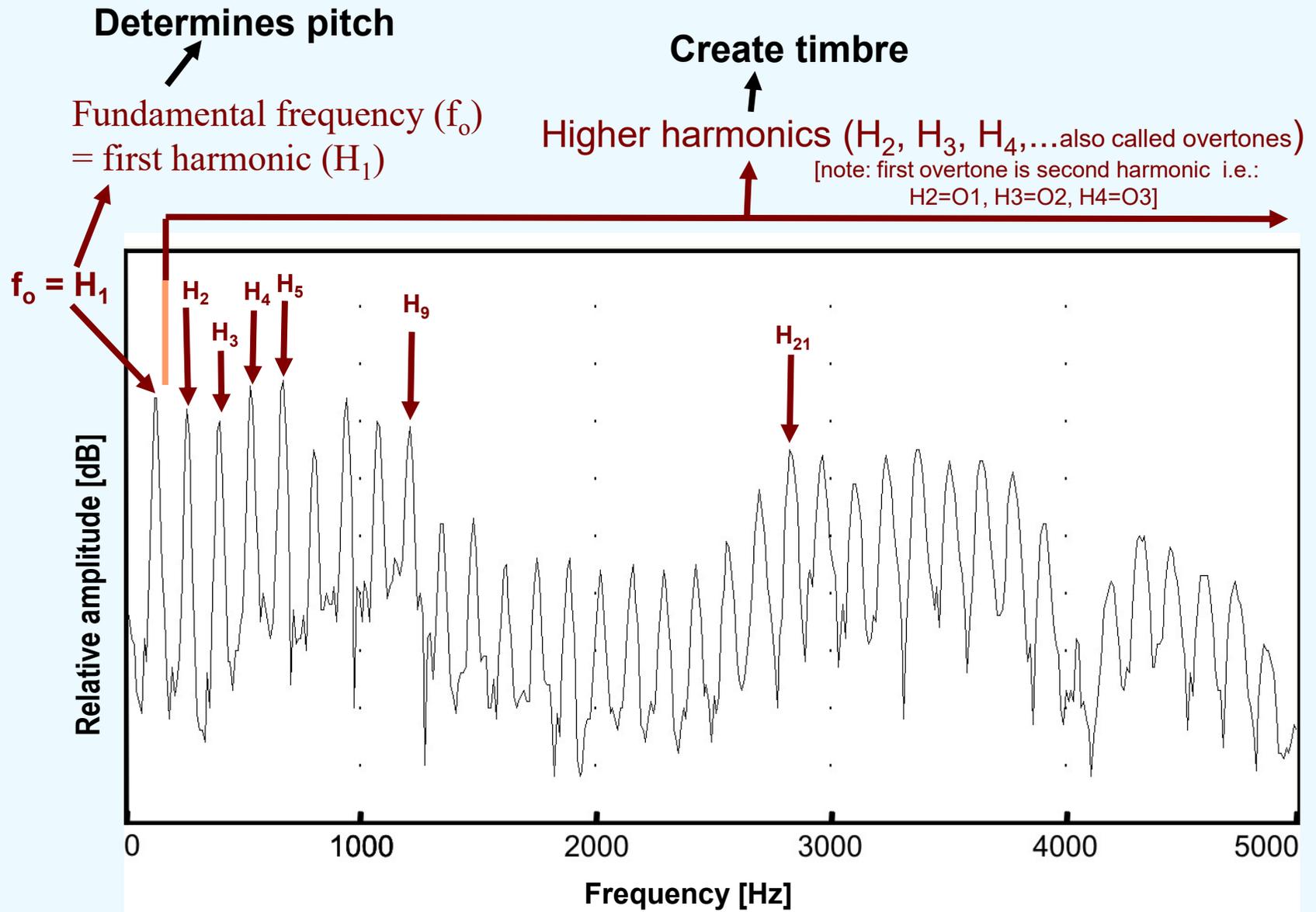
EAR WORKS AS A SPECTRAL ANALYSER

The acoustic waveform can alternatively be displayed as a frequency spectrum

Frekvenční spektrum hlasu

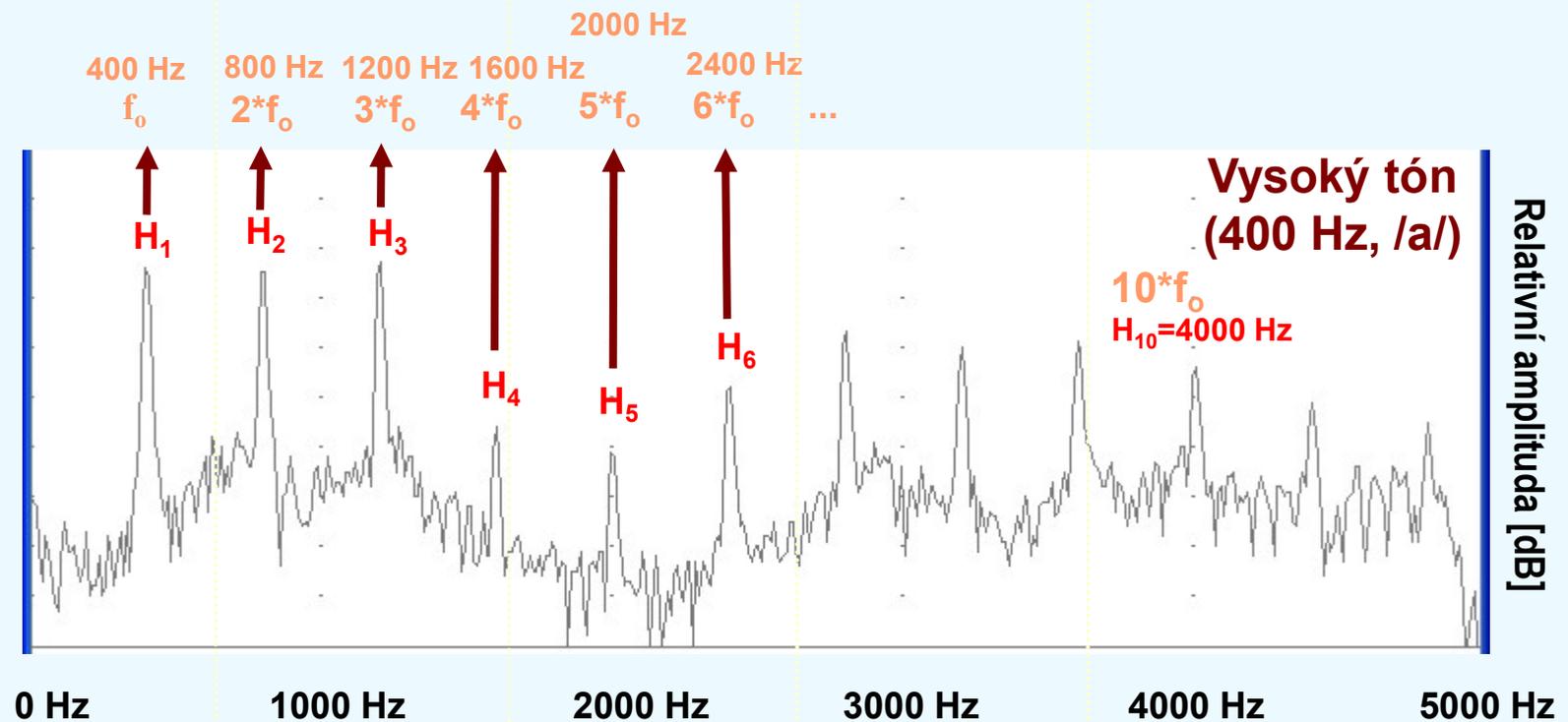


Frequency spectrum of voice



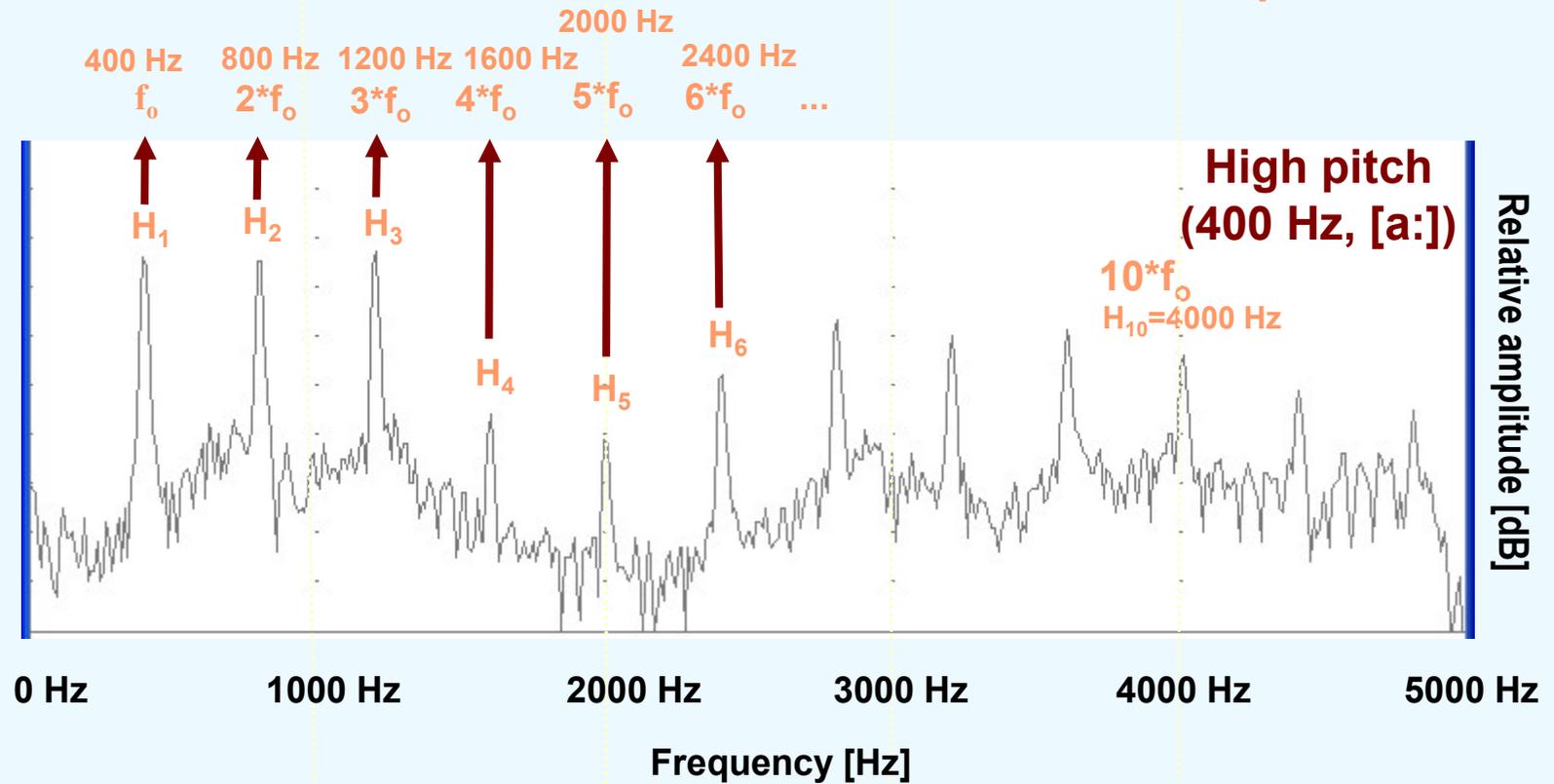
Frekvenční spektrum hlasu: harmonické frekvence

Frekvence harmonických tónů jsou celistvými násobky frekvence f_0 !

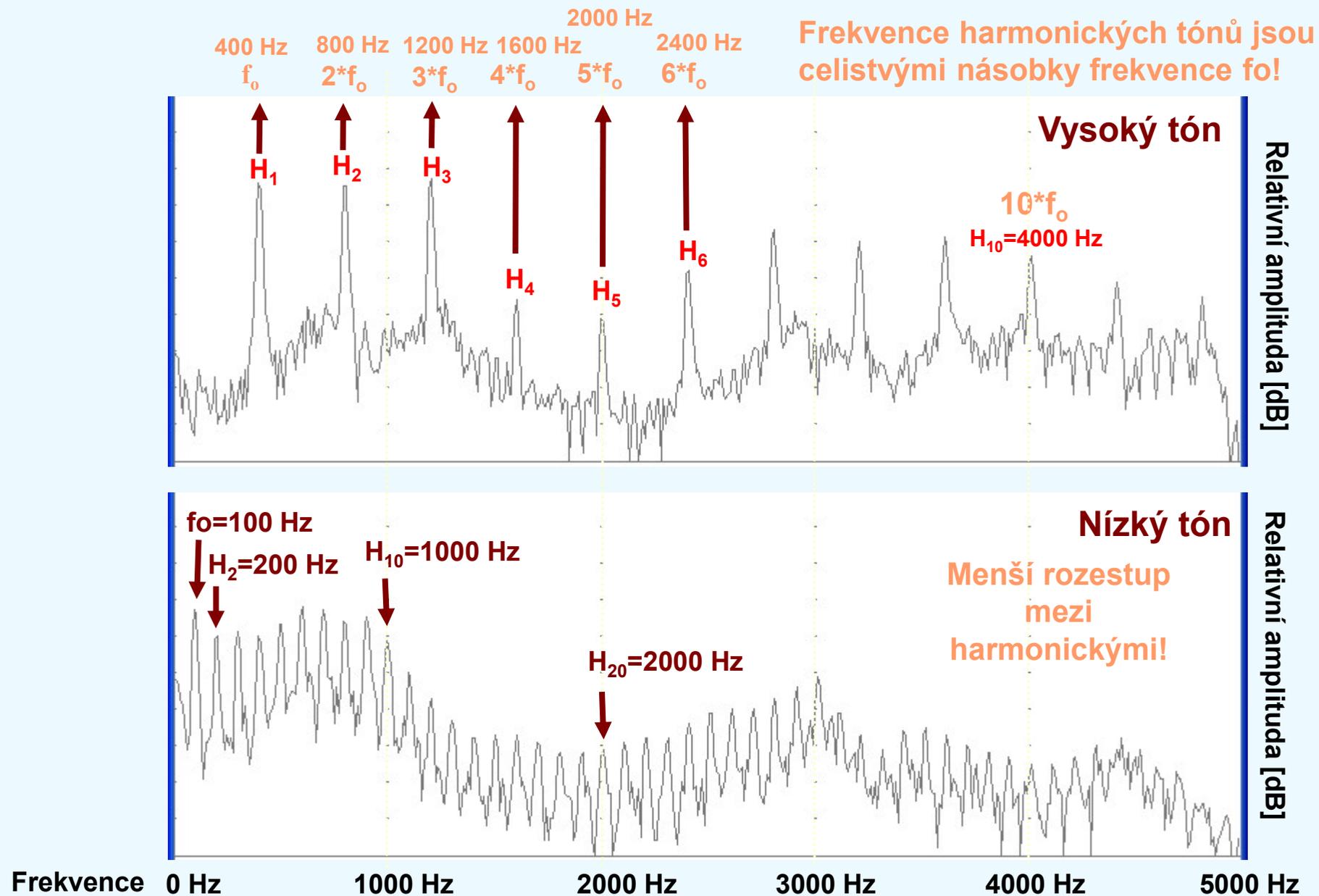


Frekvency spectrum of voice: harmonic frequencies

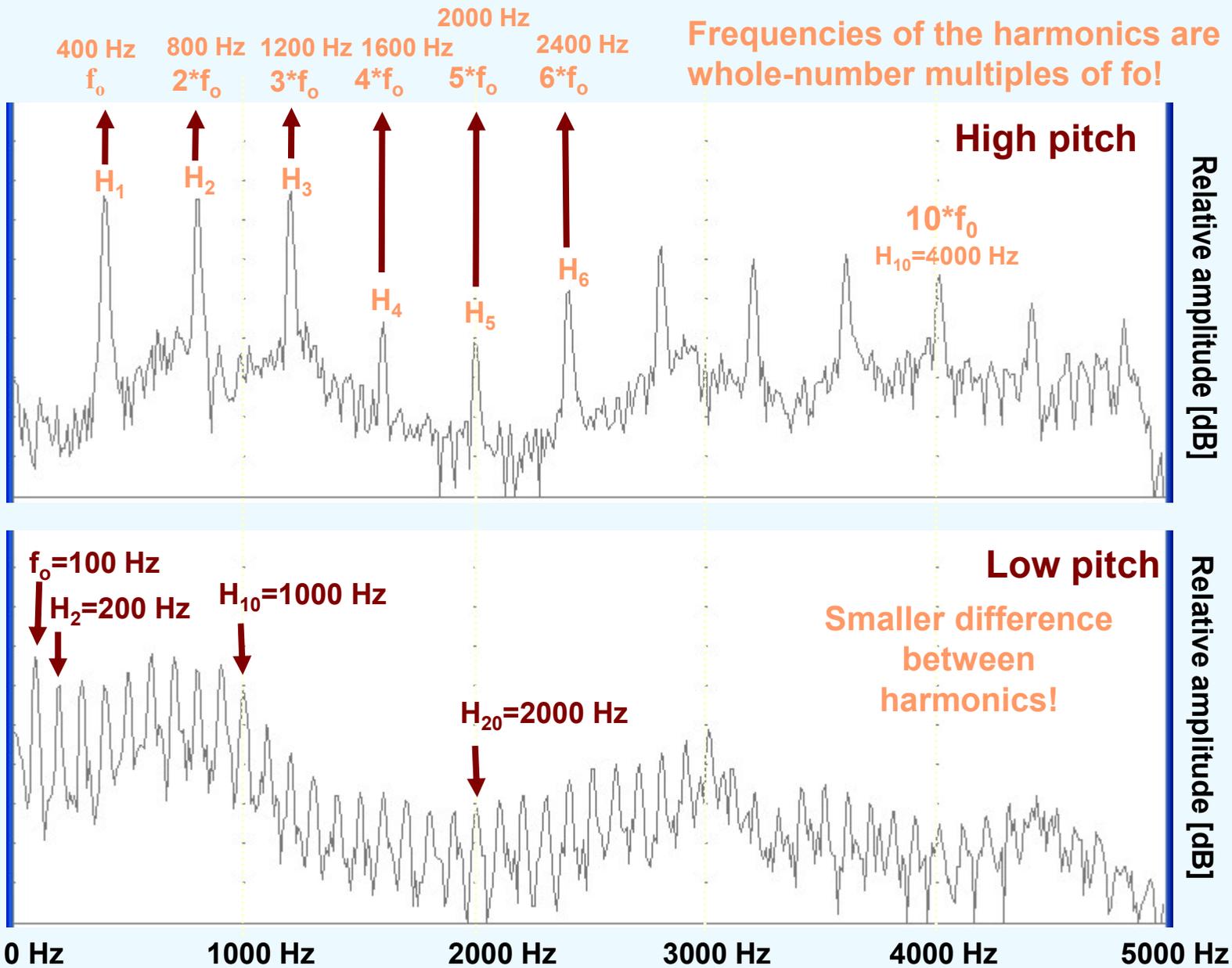
Frequencies of the harmonics are whole-number multiples of f_0 !



Frekvenční spektrum hlasu: různá výška tónu



Frequency spectrum of voice: different pitches



DEMONSTRACE
frekvenční spektrum hlasu
základní frekvence a barva tónu

VOCE VISTA

(shareware)



D.G. Miller

DEMONSTRATION
frequency spectrum of voice
fundamental frequency and voice timbre

VOCE VISTA

(software)



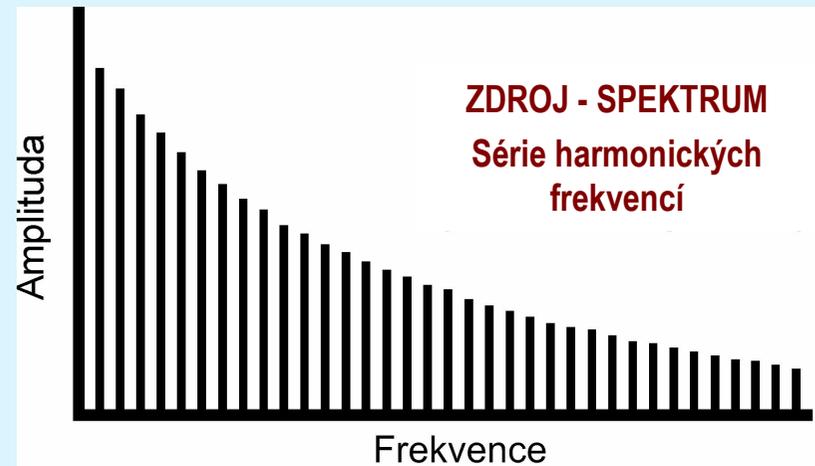
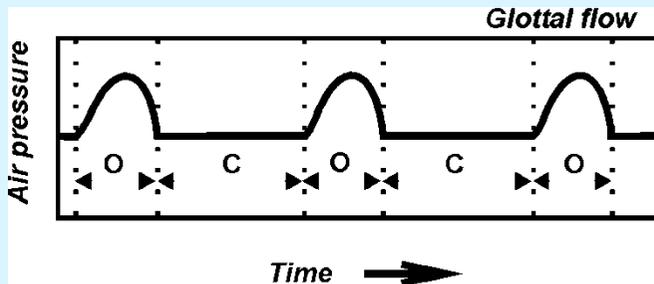
D.G. Miller

JAK VZNIKÁ FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLASU?

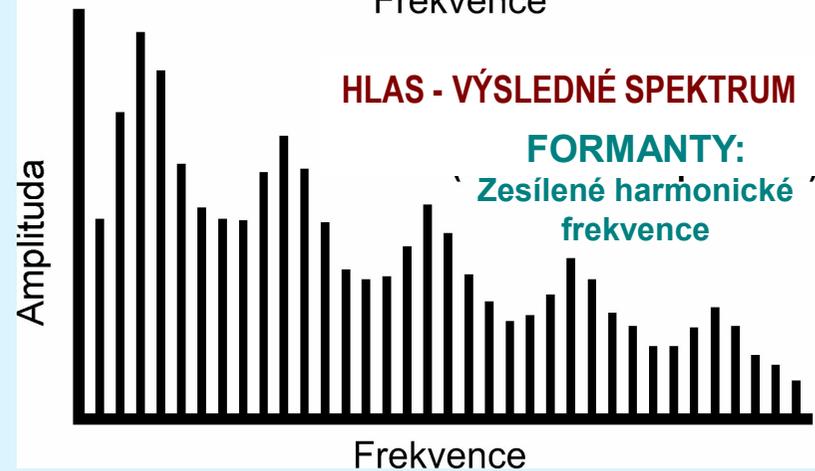
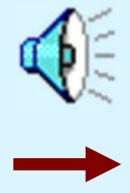
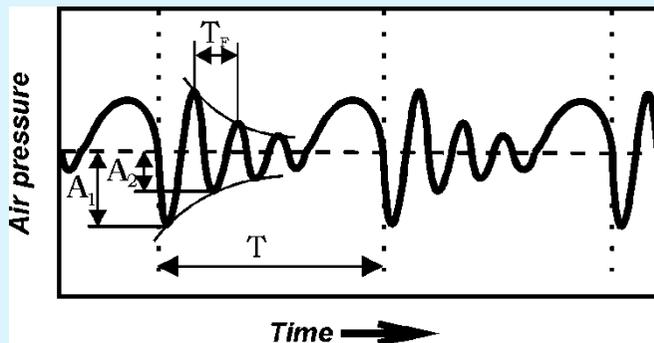
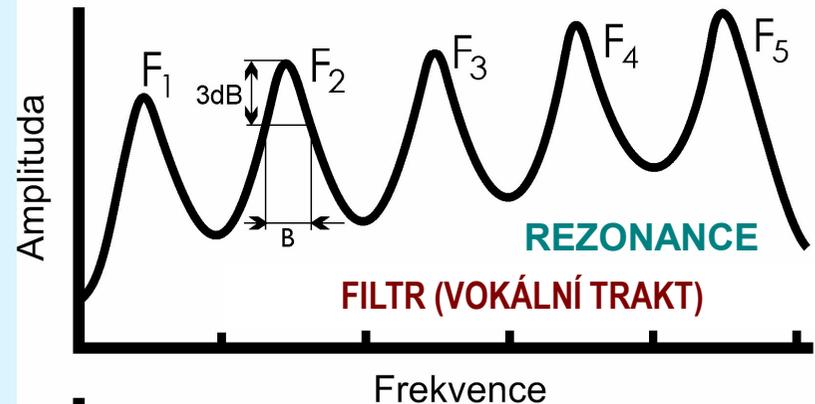
TEORIE ZDROJE A FILTRU

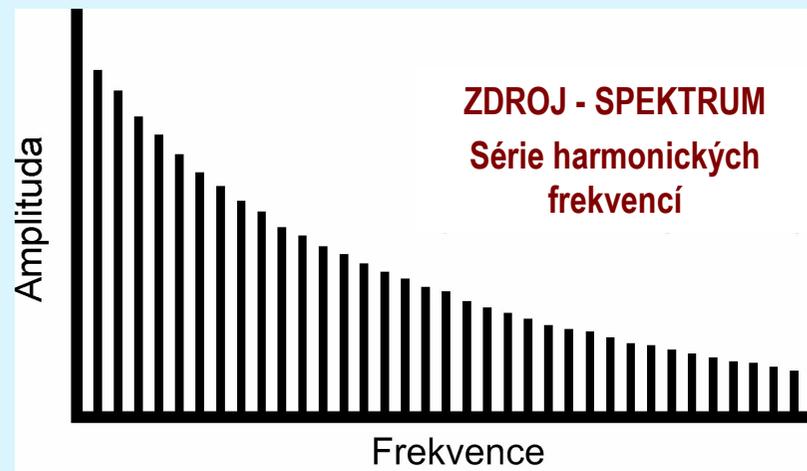
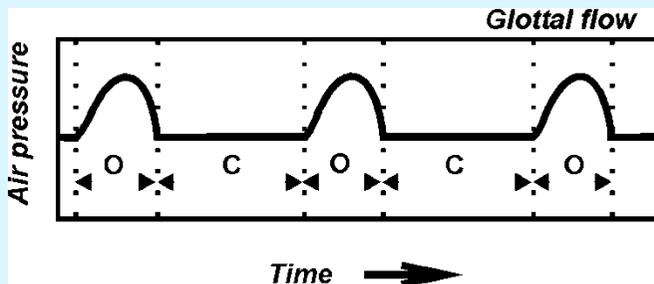
HOW DOES THE FREQUENCY SPECTRUM OF VOICE ORIGINATE?

SOURCE-FILTER THEORY



TEORIE ZDROJE A FILTRU

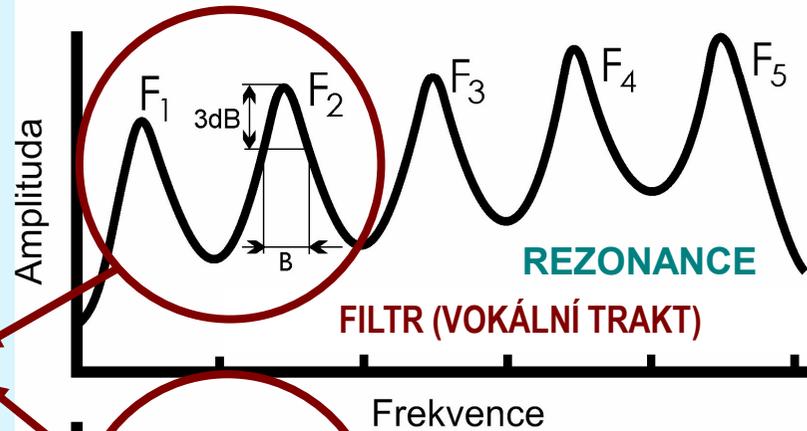




ZDROJ - SPEKTRUM
Série harmonických frekvencí

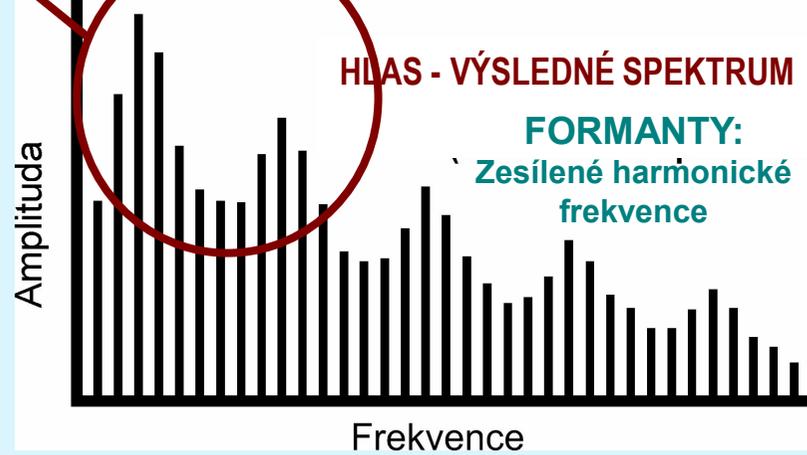
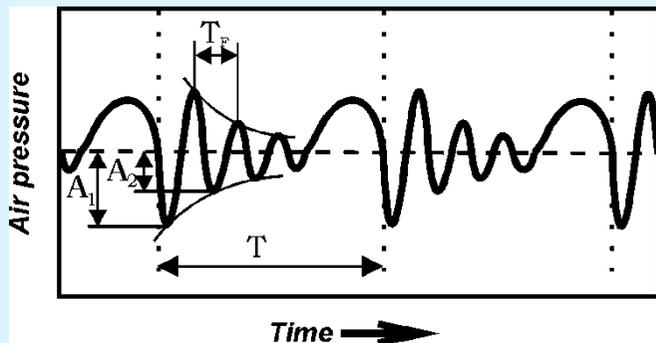
**TEORIE
ZDROJE A
FILTRU**

**SAMO-
HLÁSKY**



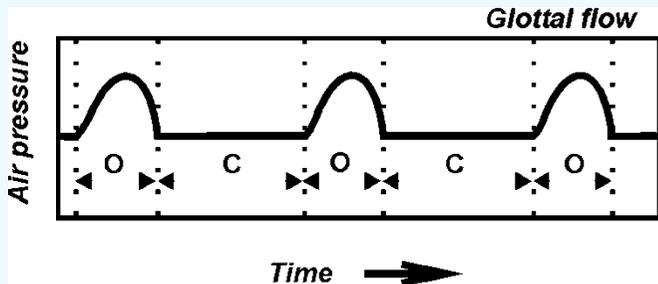
REZONANCE

FILTR (VOKÁLNÍ TRAKT)

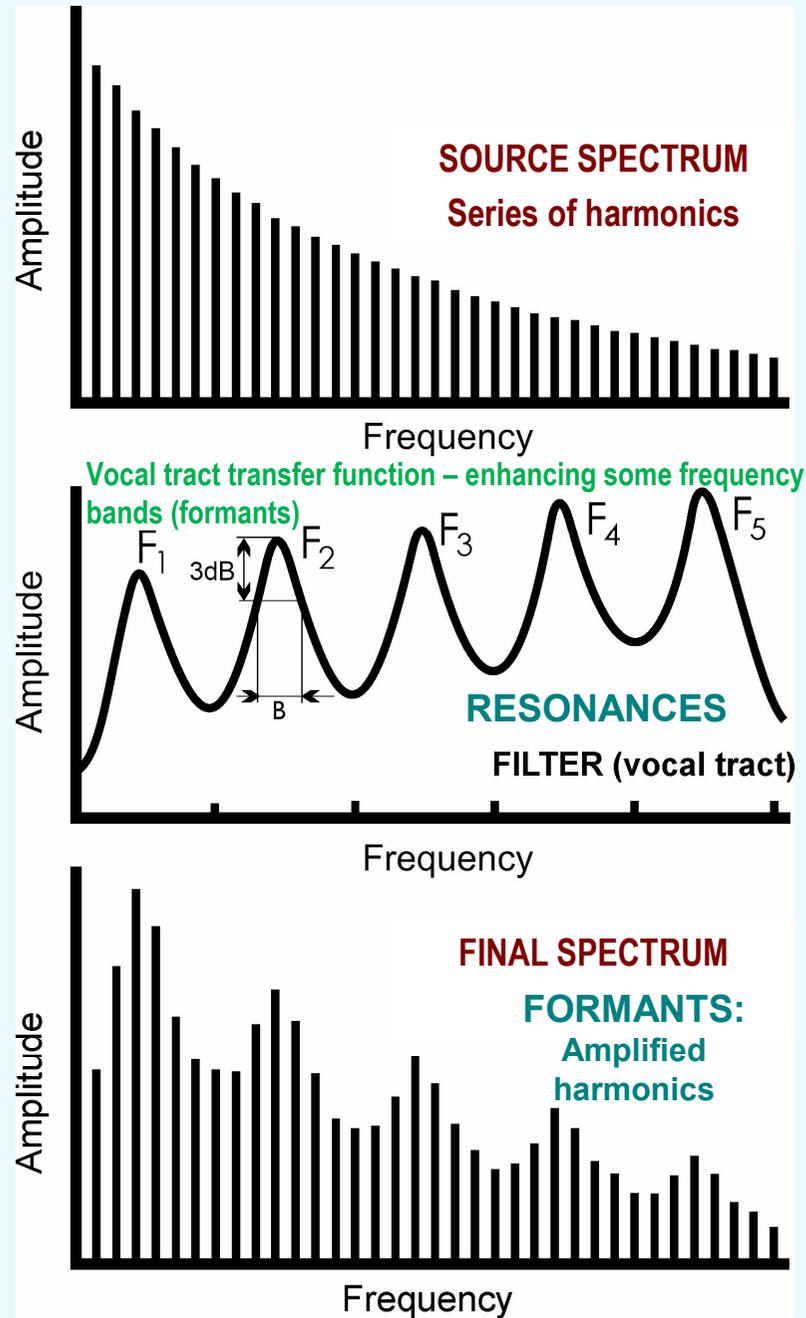
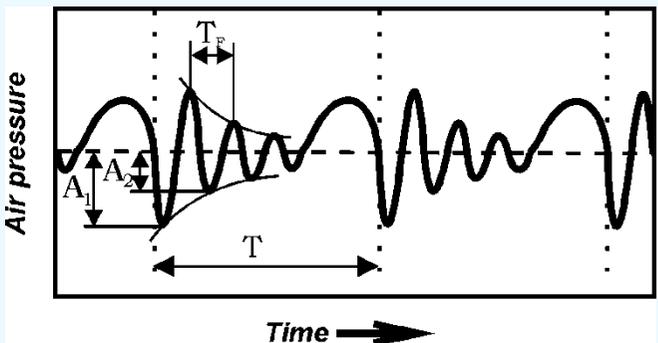


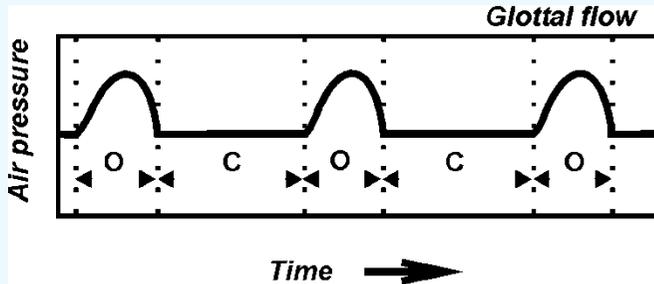
HLAS - VÝSLEDNÉ SPEKTRUM

FORMANTY:
Zesílené harmonické frekvence



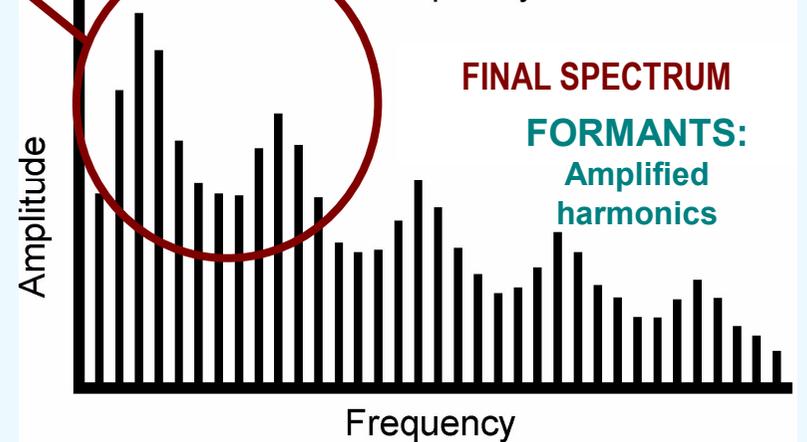
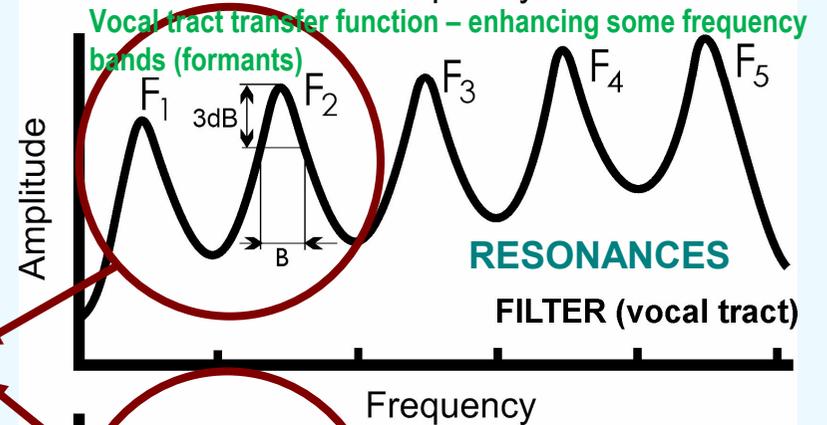
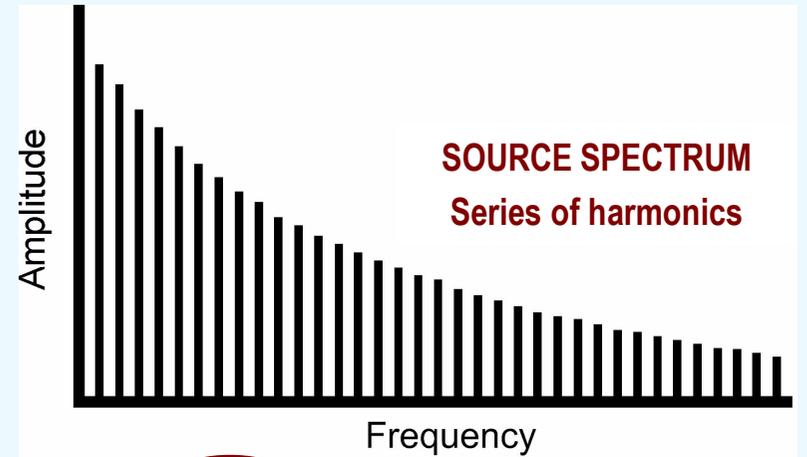
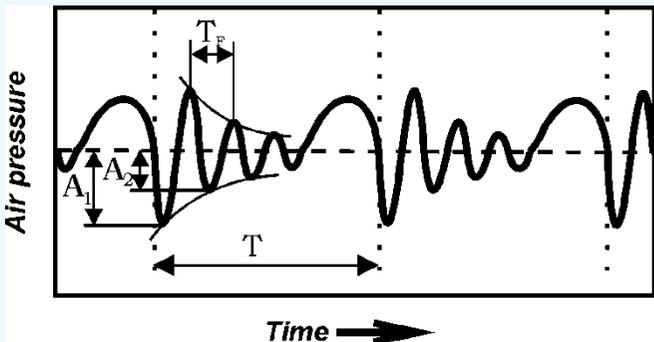
SOURCE - FILTER THEORY





SOURCE - FILTER THEORY

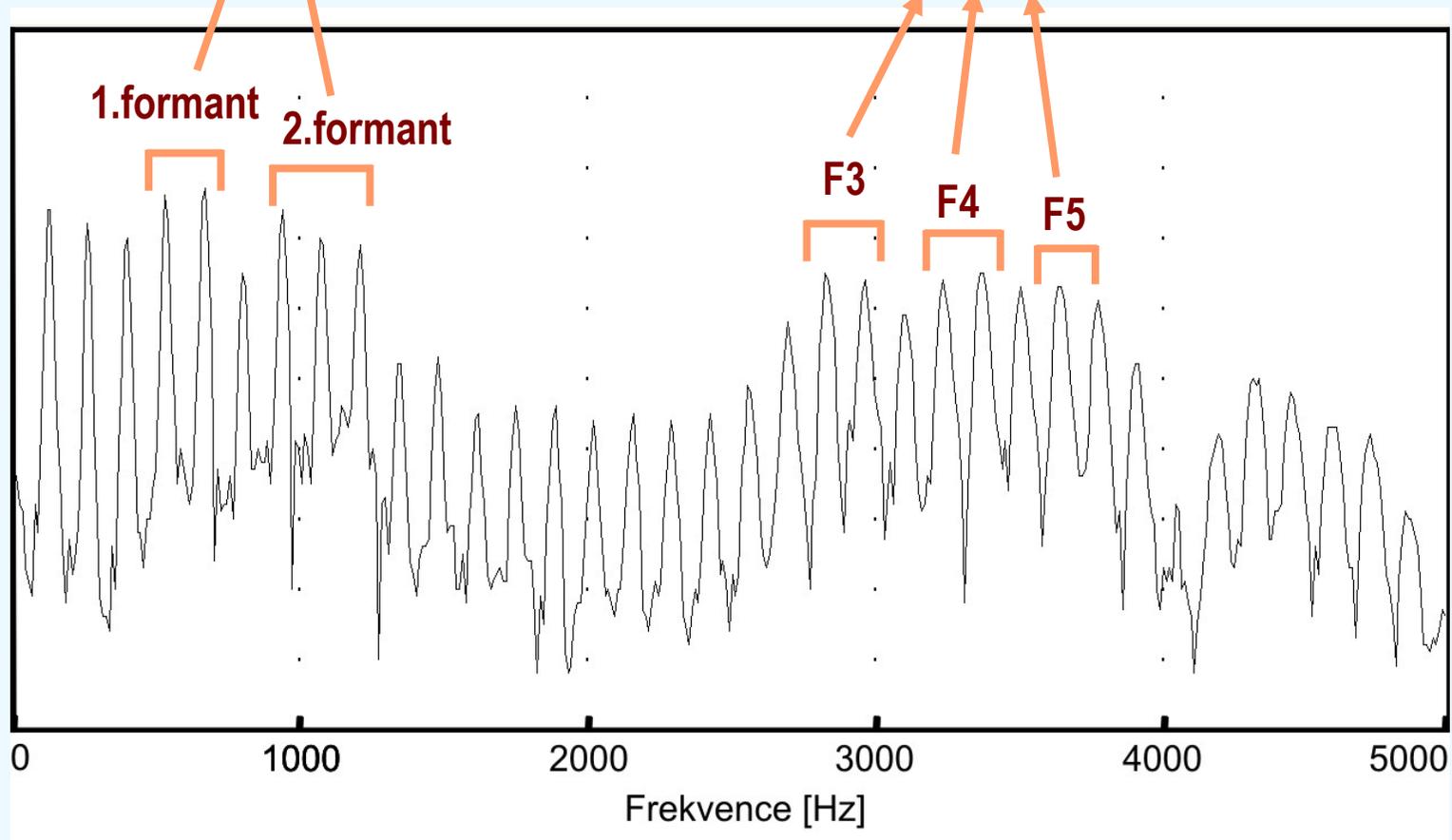
VOWELS



Frekvenční spektrum hlasu - formanty

Určují
samohlásku

Vyšší formanty:
podílejí se na individuální
barvě hlasu

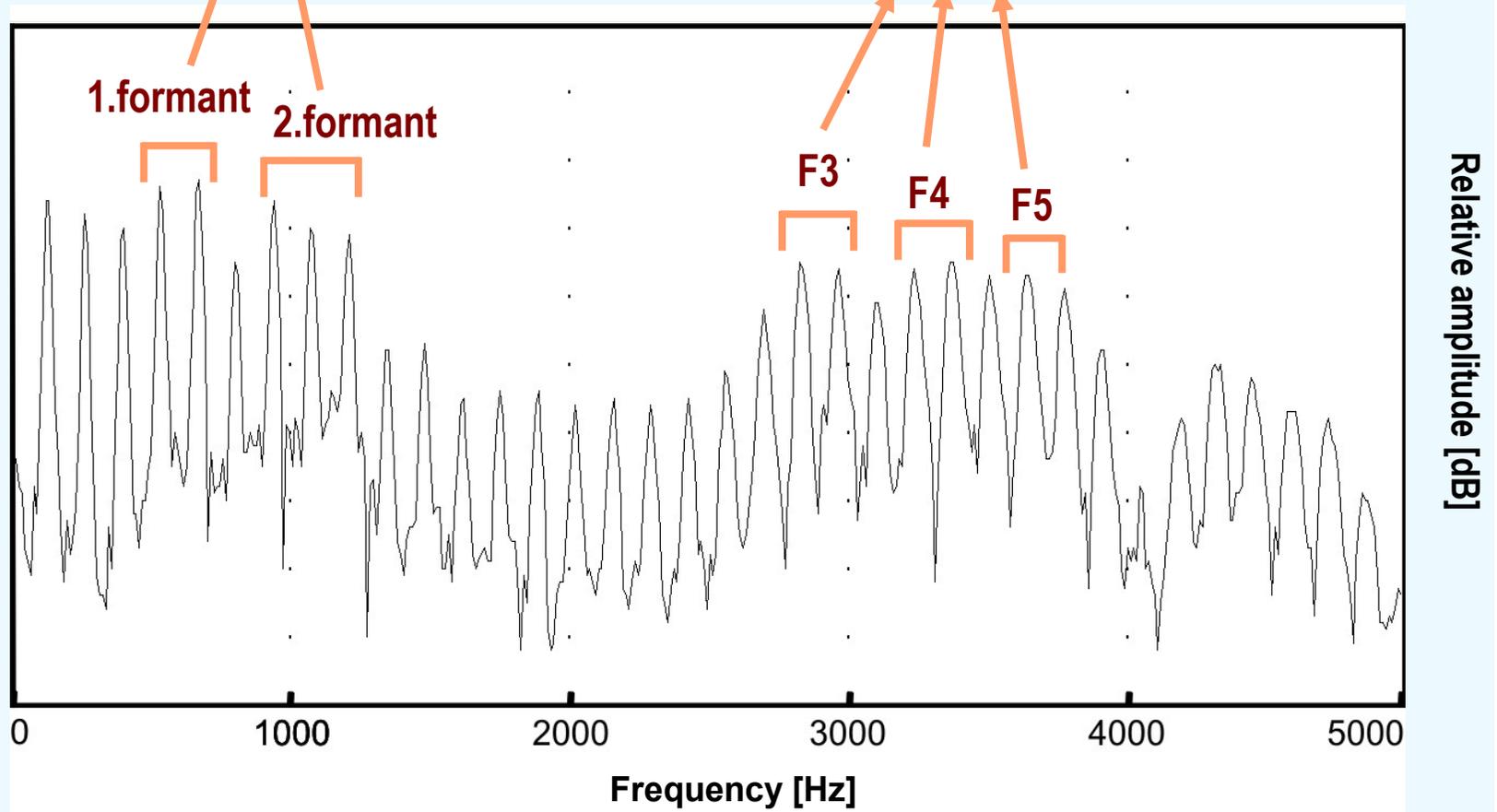


Relativní amplituda [dB]

Frequency spectrum of voice - formants

Determine the vowel

Higher formants:
contribute to an individual voice timbre



DEMONSTRACE

frekvenční spektrum hlasu – formanty a samohlásky

VOCE VISTA

(software)



D.G. Miller

DEMONSTRATION
frequency spectrum of voice
formants and vowels

VOCE VISTA

(software)

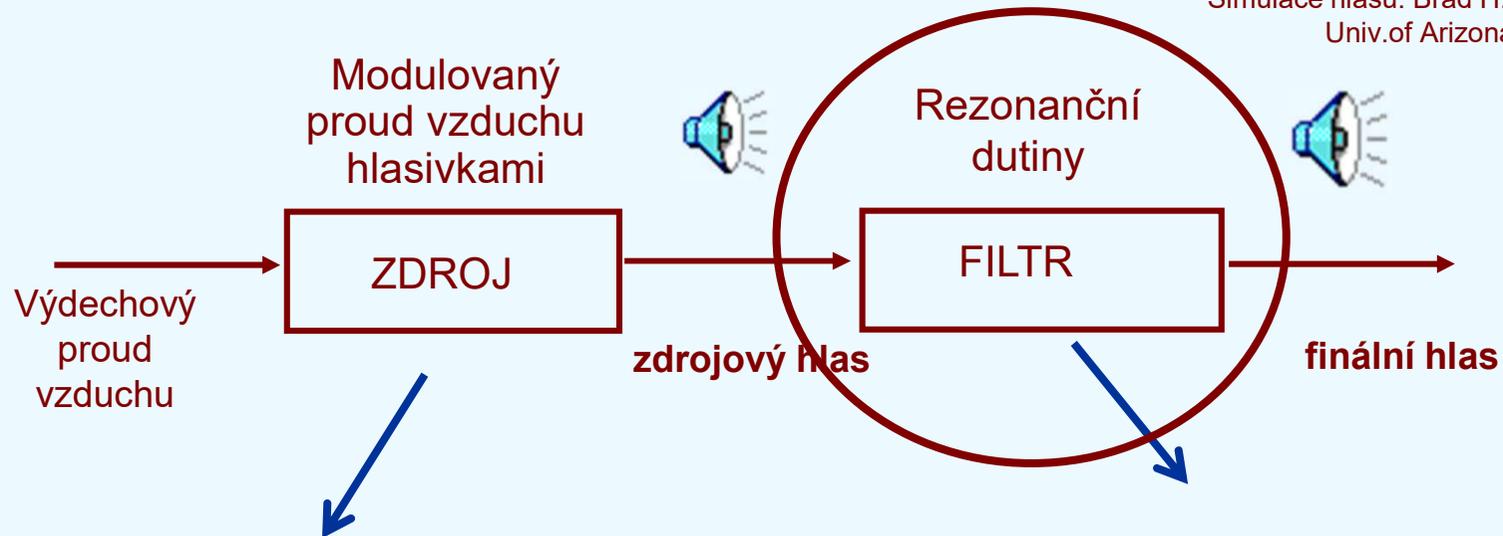


D.G. Miller

TEORIE ZDROJE A FILTRU



Simulace hlasu: Brad H. Story,
Univ. of Arizona, USA



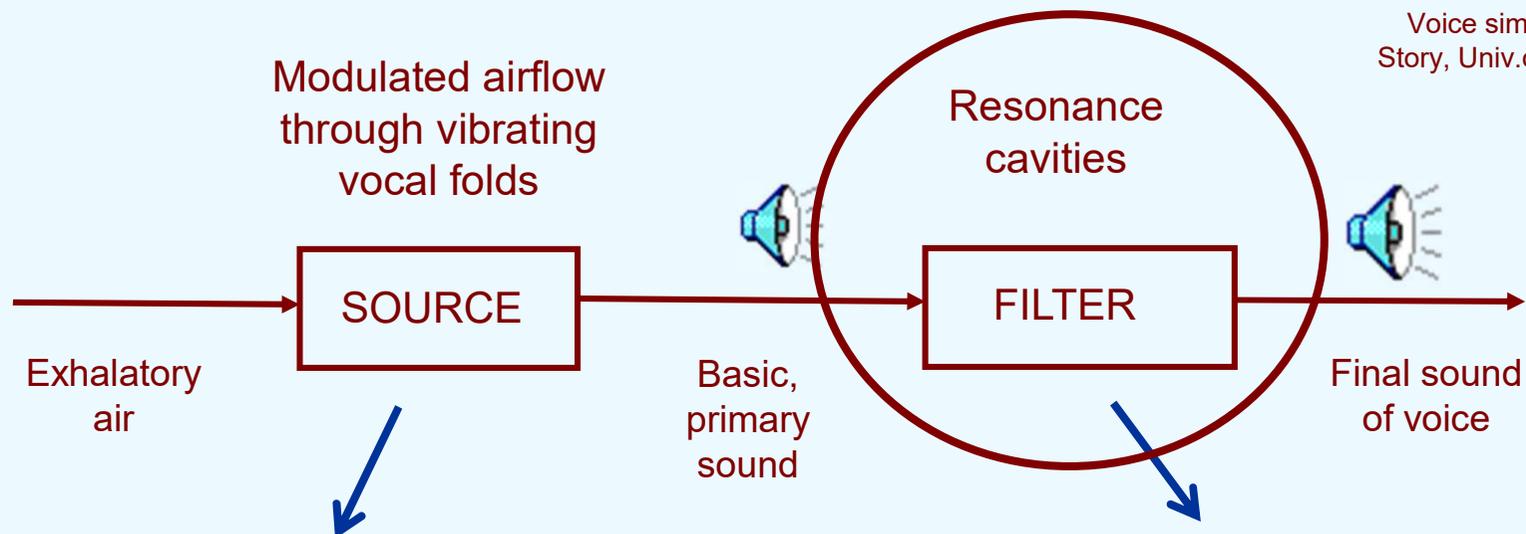
- Frekvence (výška tónu)
- Základní intenzita (hlasitost)
- Délka fonace
- Primární kvalita hlasu (dyšnost, hrubost, chraplavost,...)
- Primární barva hlasu

- Samohlásky + souhlásky
- Konečná intenzita (hlasitost)
- Konečná kvalita hlasu (konečná barva, „rezonance“, pěvecký formant,...)

SOURCE-FILTER THEORY



Voice simulation: Brad H. Story, Univ. of Arizona, USA



- Fundamental frequency (pitch)
- Primary intensity (loudness)
- Duration of phonation
- Primary voice quality (breathiness, hoarseness,...)
- Primary voice timbre
- Vowels + consonants
- Final intensity (loudness)
- Secondary voice quality (resonance, ring, singer's formant,...)

FILTR: REZONANCE DUTIN

Každá dutina ve které se šíří zvuk má svou přirozenou akustickou rezonanci.

Vokální trakt lze nejjednodušeji vyjádřit v neutrální poloze – jako dutinu s konstantním průřezem a délkou cca 17,5 cm.

V neutrální poloze se vokální trakt chová jako tzv. čtvrtvlnný rezonátor – uzavřený v místě hlasivek a otevřený v místě rtů.

Pro rezonanční frekvence F_n pak platí:

$$F_n = (2n - 1) c / 4l$$

kde $(2n-1)$ jsou lichá čísla ($n=1,2,3$, atd), c je rychlost zvuku ve vlhkém vzduchu (cca 350 m/s) a l je délka vokálního traktu (0,175 m).

Pro nejnižší rezonance vychází:

$F_1=500$ Hz, $F_2=1500$ Hz, $F_3=2500$ Hz, atd.

Tyto rezonance odpovídají formantům pro tzv. neutrální samohlásku.

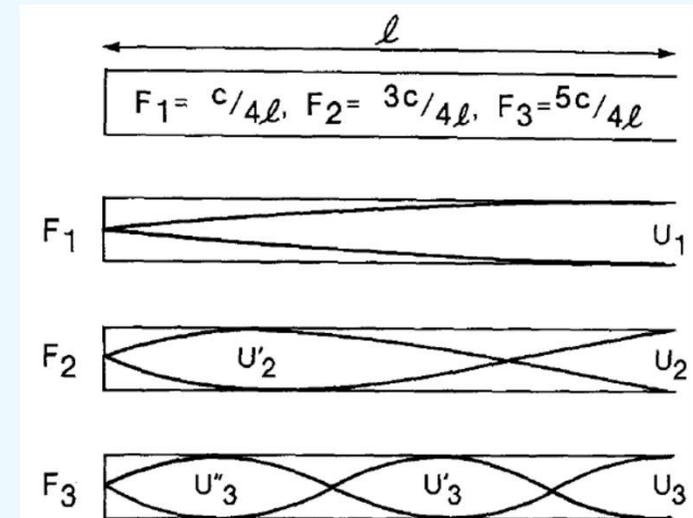


FIG. 5. Straight tube closed at one end (glottis) and open at the other (lips), showing stationary distribution of volume velocity for the first three formants, F_1 , F_2 , and F_3 . The resonances of the tube are given by the odd-quarter wavelength relationship (a tube of this configuration will resonate with maximal intensity to a sinusoid whose wavelength is four times the tube length).

R.D. Kent, J.Voice, 1993

FILTER: CAVITY RESONANCES

Every cavity propagating sound has its natural acoustic resonance frequency.

Vocal tract can be most simply expressed in its neutral configuration – as a cavity with a constant diameter and a length of c. 17,5 cm.

In the neutral configuration the vocal tract behaves as a quarter-length resonator – closed at the level of the vocal folds and opened at the lips.

For the resonance frequencies F_n then holds:

$$F_n = (2n - 1) c/4l$$

where $(2n-1)$ are odd numbers, c is speed of sound in humid air (c. 350 m/s) and l is the vocal tract length (0,175 m).

For the lowest resonances we get:

$$F_1=500 \text{ Hz}, F_2=1500 \text{ Hz}, F_3=2500 \text{ Hz}, \text{ etc.}$$

These resonances correspond to the formants for the “neutral vowel”.

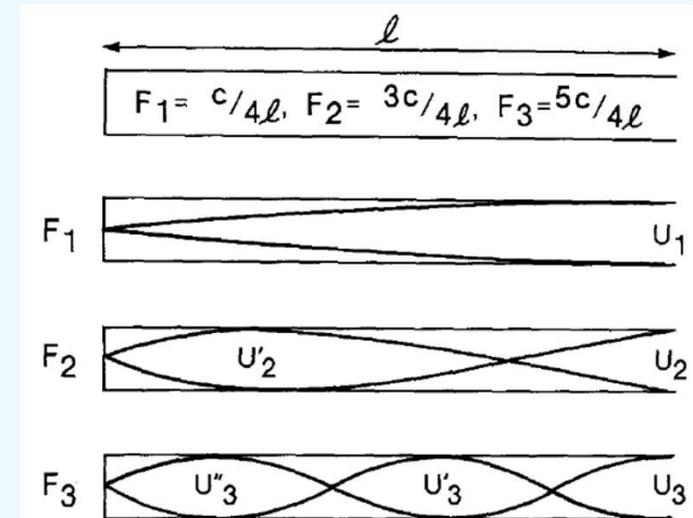


FIG. 5. Straight tube closed at one end (glottis) and open at the other (lips), showing stationary distribution of volume velocity for the first three formants, F_1 , F_2 , and F_3 . The resonances of the tube are given by the odd-quarter wavelength relationship (a tube of this configuration will resonate with maximal intensity to a sinusoid whose wavelength is four times the tube length).

R.D. Kent, J.Voice, 1993

FILTR: REZONANCE DUTIN – VZDUCH vs. HELIUM

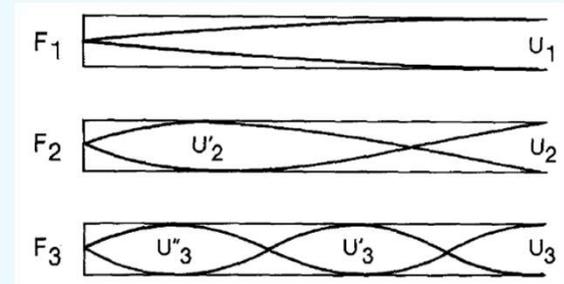
Rezonance dutin je jiná ve vzduchu a v heliu.

Dáno rozdílnou rychlostí zvuku:

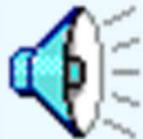
$c_{\text{air}} = 350 \text{ m/s}$ (vlhký vzduch, 37°C)

$c_{\text{He}} = 972 \text{ m/s}$

Jak to ovlivní rezonanční frekvence polouzavřené trubice o délce $l=17.5 \text{ cm}$?



$$F_n = (2n - 1) c / 4l$$



vzduch



helium

Jak to ovlivní výšku tónu hlasu?



vzduch



helium

Zvukové ukázky:

J. Wolfe (Univ. of New South Wales, Sydney, Australia)



Více informací viz http://phys.unsw.edu.au/phys_about/PHYSICS!/SPEECH_HELIUM/speech.html

FILTER: CAVITY RESONANCES – AIR vs. HELIUM

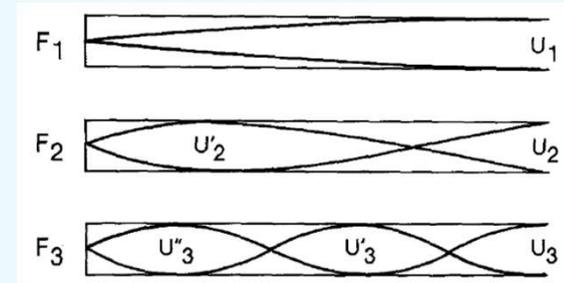
Cavity resonances are different in air and helium.

That is because of the differences of the speed of sound:

$c_{\text{air}} = 350 \text{ m/s}$ (moist air, 37°C)

$c_{\text{He}} = 972 \text{ m/s}$

How does this influence the resonance frequencies of the tube closed at one end with the length $l=17.5 \text{ cm}$?



$$F_n = (2n - 1) c / 4l$$



air



helium

How does it influence the fundamental frequency of voice?



Air



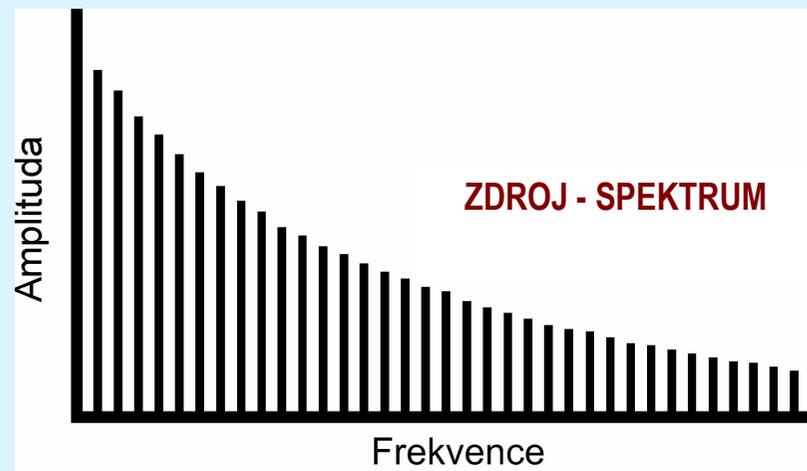
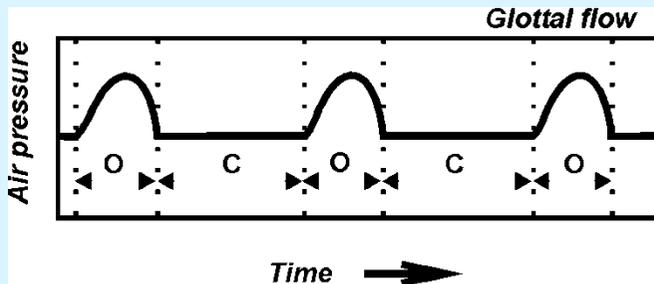
helium

Sound examples:

J. Wolfe (Univ. of New South Wales, Sydney, Australia)

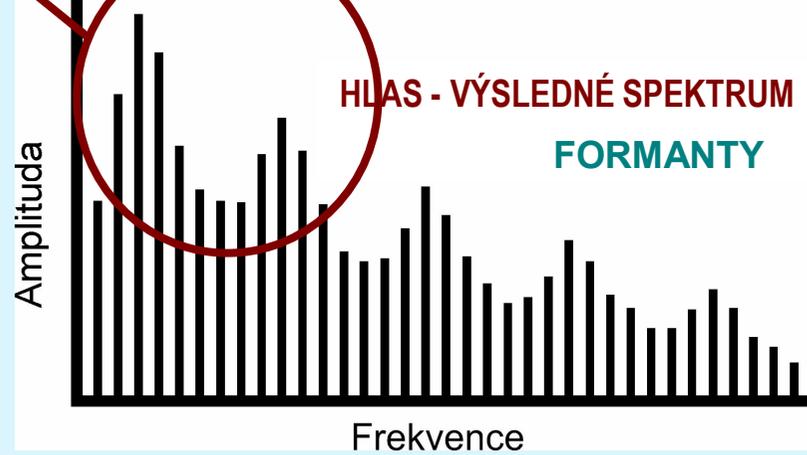
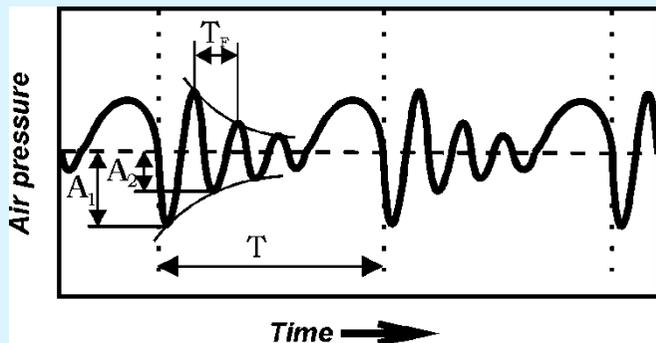
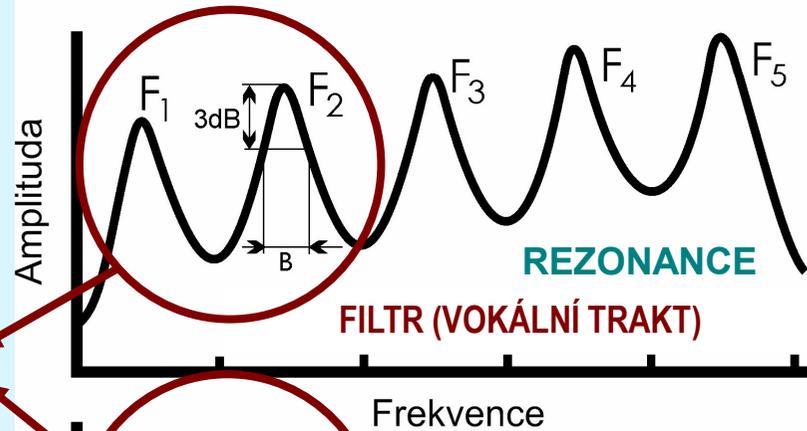


More information at http://phys.unsw.edu.au/phys_about/PHYSICS!/SPEECH_HELIUM/speech.html

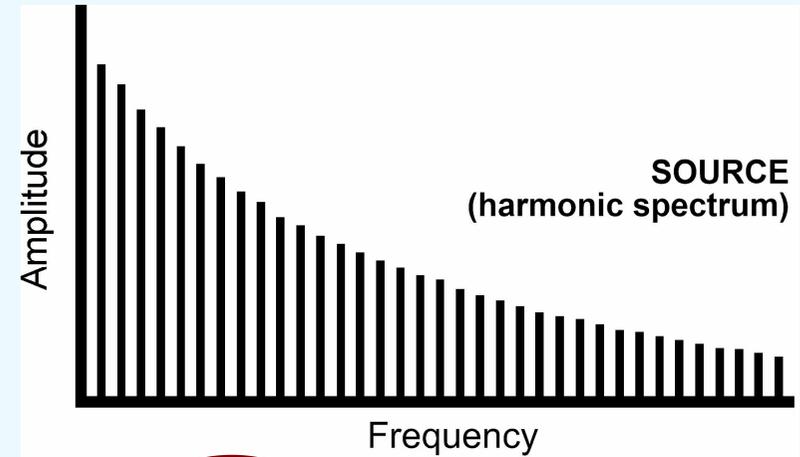
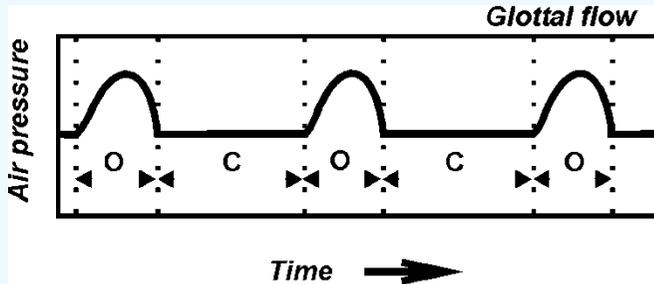


**TEORIE
ZDROJE A
FILTRU**

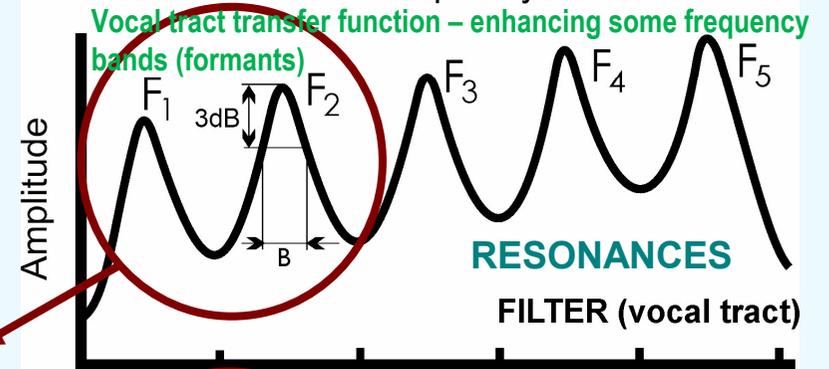
**SAMO-
HLÁSKY**



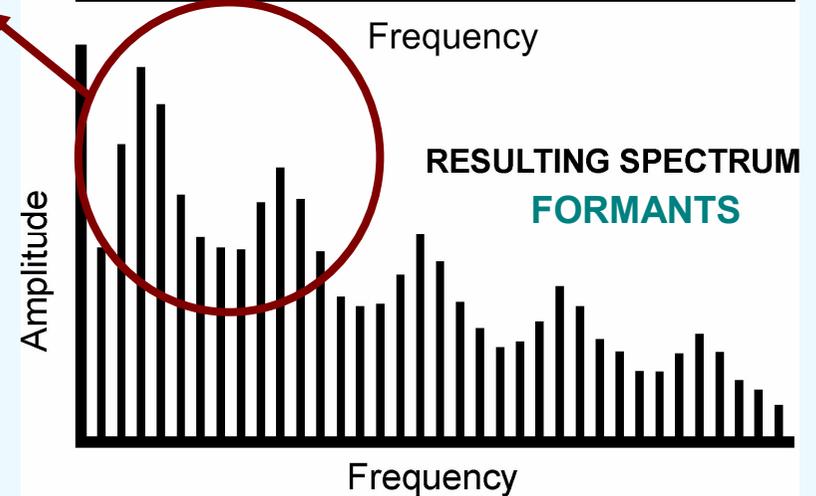
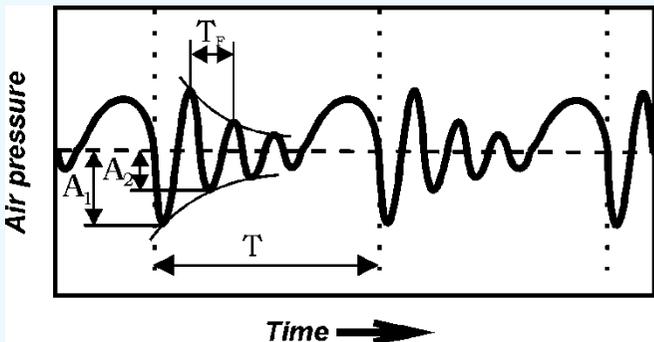
FORMANTY



SOURCE - FILTER THEORY



VOWELS



FORMANTY: VYBUZENÉ AKUSTICKÉ REZONANCE DUTIN VOKÁLNÍHO TRAKTU

Formant:

Koncentrace akustické energie kolem určité frekvence.

Je to charakteristický tón vokálního traktu, který se projeví jako vrchol / zesílení ve výsledném frekvenčním spektru hlasu.

Formanty vznikají díky akustickým rezonancím vokálního traktu, které zesilují harmonické frekvence zdrojového hlasu spadající do vybrané rezonanční oblasti. *(Ale frekvence formantu se nemusí přesně shodovat s rezonančními frekvencemi vokálního traktu, protože harmonické frekvence zdrojového hlasu mají různou intenzitu a mezi harmonickými frekvencemi je mezera, takže se rezonance nevybudí zcela přesně).*

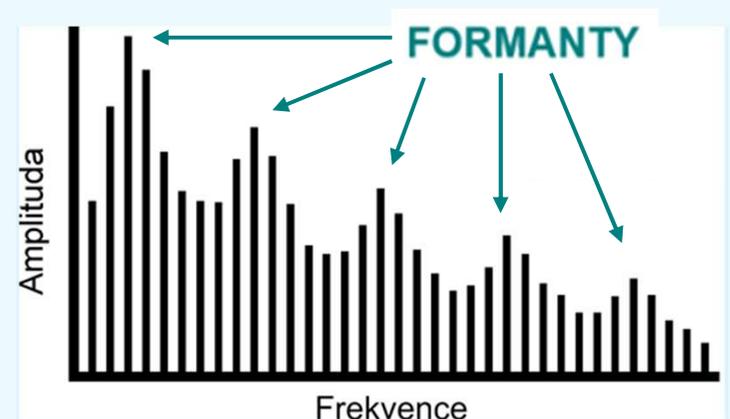
Nazývá se formantem, neboť formuje hlásku.

Formanty bývají značeny F_1 , F_2 , F_3 atd. (zatímco zákl. frekvence hlasu je značena f_0)

Samohlásky jsou určeny dvěma nejnižšími formanty - F_1 a F_2 .

Pokud se tyto dva formanty odstraní (odfiltrují), samohlásku není možno rozpoznat (C. Stumpf, 1926).

Pozn.: Kromě hlasu jsou formanty popisovány i u hudebních nástrojů.



FORMANTS: EXCITED ACOUSTIC RESONANCES OF THE VOCAL TRACT CAVITIES

Formant:

Concentration of acoustic energy around certain frequency.

Characteristic tone of the vocal tract which appears as a peak/enhancement in the final voice spectrum.

Formants arise due to acoustic resonances of the vocal tract, which amplify harmonic frequencies of the voice source that fall within the resonant band. *(However, the formant frequencies do not have to coincide exactly with the resonance frequencies of the vocal tract, because the harmonic frequencies of the voice source have different intensities and there are gaps between the harmonics, so the resonances are not excited exactly.)*

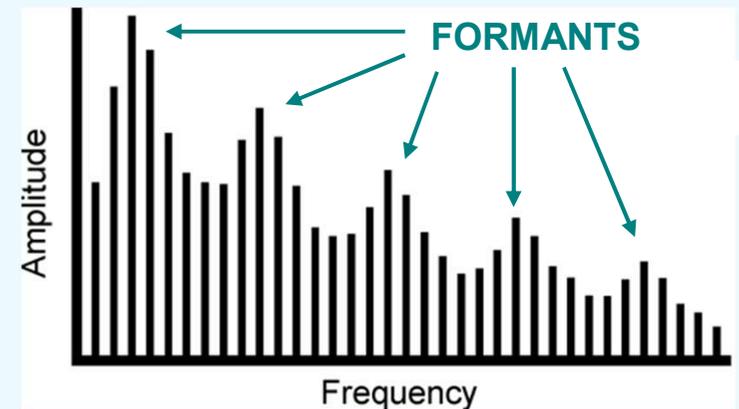
It is called “formant” because it forms vowels.

Formants are labeled as F_1 , F_2 , F_3 etc. (in contrast to the fundamental frequency of voice, which is labeled f_0)

Vowels are mainly determined by the two lowest formants - F_1 a F_2 .

When these two formants are filtered away, the vowels cannot be recognized any more (C. Stumpf, 1926).

Note.: Besides of voice, formants are recognized also in music instruments.



POLOHA FORMANTŮ U ČESKÝCH SAMOHLÁSEK

Formanty F1 a F2 :

Při změně samohlásky z [u] přes [o] na [a] oba dva formanty stoupají.

Při změně samohlásky z [a] přes [e] na [i] formant F1 klesá, zatímco F2 stoupá.

Přibližné hodnoty formantů F1 a F2 pro české samohlásky (Palková, 1994)

Hlásky	F1 pásmo	F2 pásmo
u,ú	300-500	600-1000
o,ó	500-700	850-1200
a,á	700-1100	1100-1500
e,é	480-700	1560-2100
i,í	300-500	2000-2800

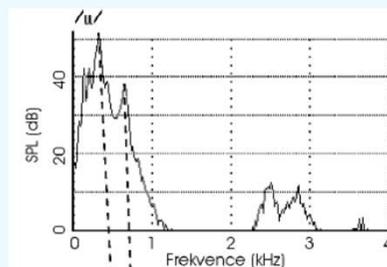
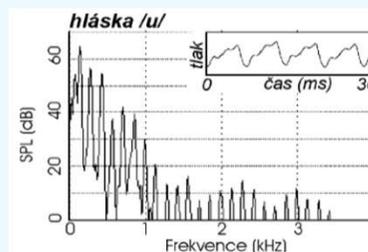
Přesnější nová měření, viz: Tykalová a kol. (2021). *Journal of Voice*, 35(6), 931.e921-931.e933.

Švec, 1996, Obr. 1.3 a 1.28:

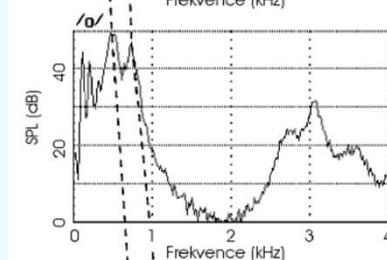
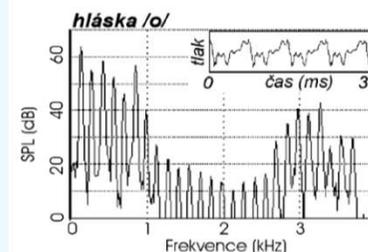
Spektrum normální fonace

Spektrum ingresivní fonace

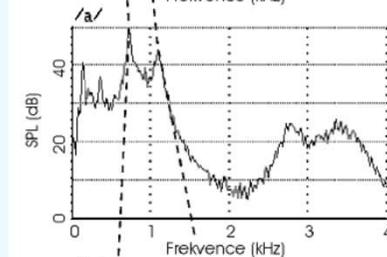
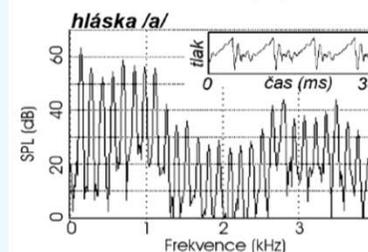
[u:]



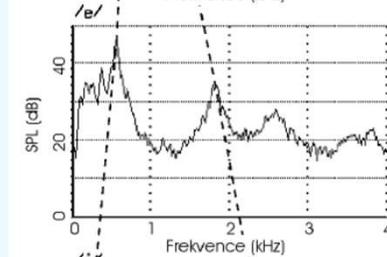
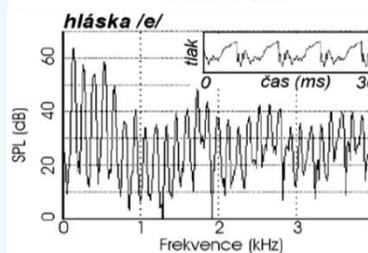
[o:]



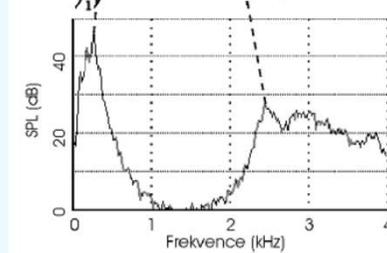
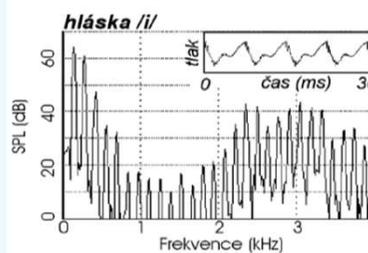
[a:]



[e:]



[i:]



FORMANT POSITIONS IN CZECH VOWELS [u:]

Formants F₁ and F₂:

When changing from the vowel [u] to [o] and then to [a], both the formants increase.

When changing from the vowel [a] through [e] to [i] formant F₁ decreases while F₂ increases.

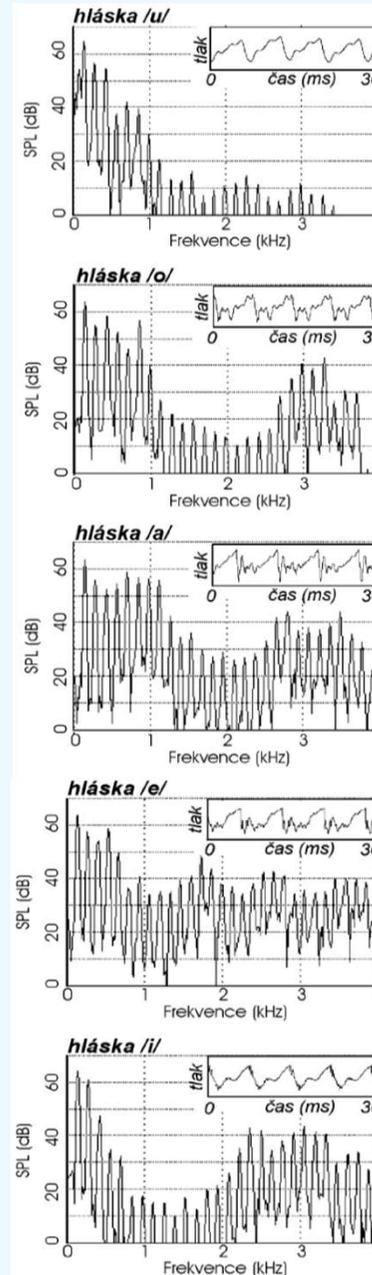
Approximate values of the formants F₁ and F₂ for the Czech vowels (Palková, 1994)

Vowel	F ₁ range	F ₂ range
u,ú	300-500	600-1000
o,ó	500-700	850-1200
a,á	700-1100	1100-1500
e,é	480-700	1560-2100
i,í	300-500	2000-2800

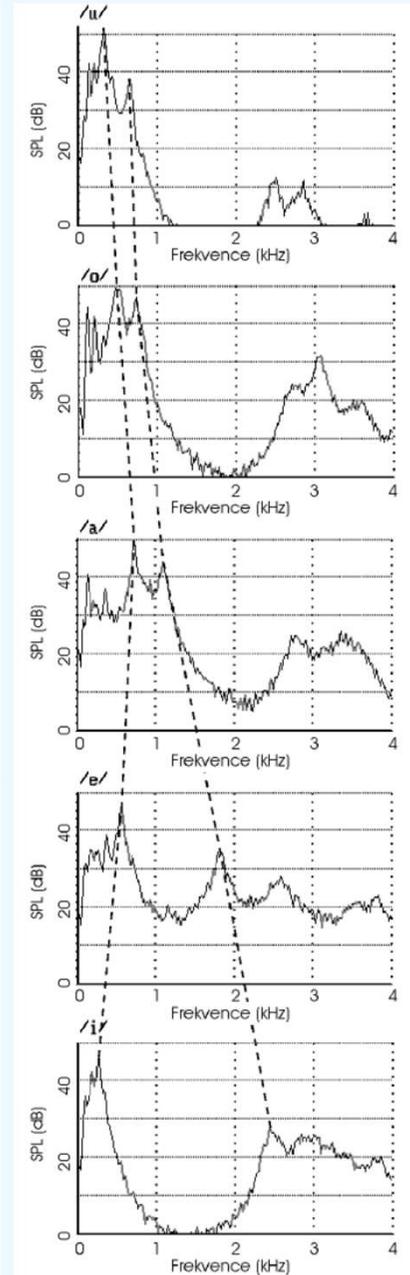
For new, more accurate measurements, see:
Tykalová et al. (2021). *Journal of Voice*,
35(6), 931.e921-931.e933.

Švec, 1996, Obr. 1.3 a 1.28:

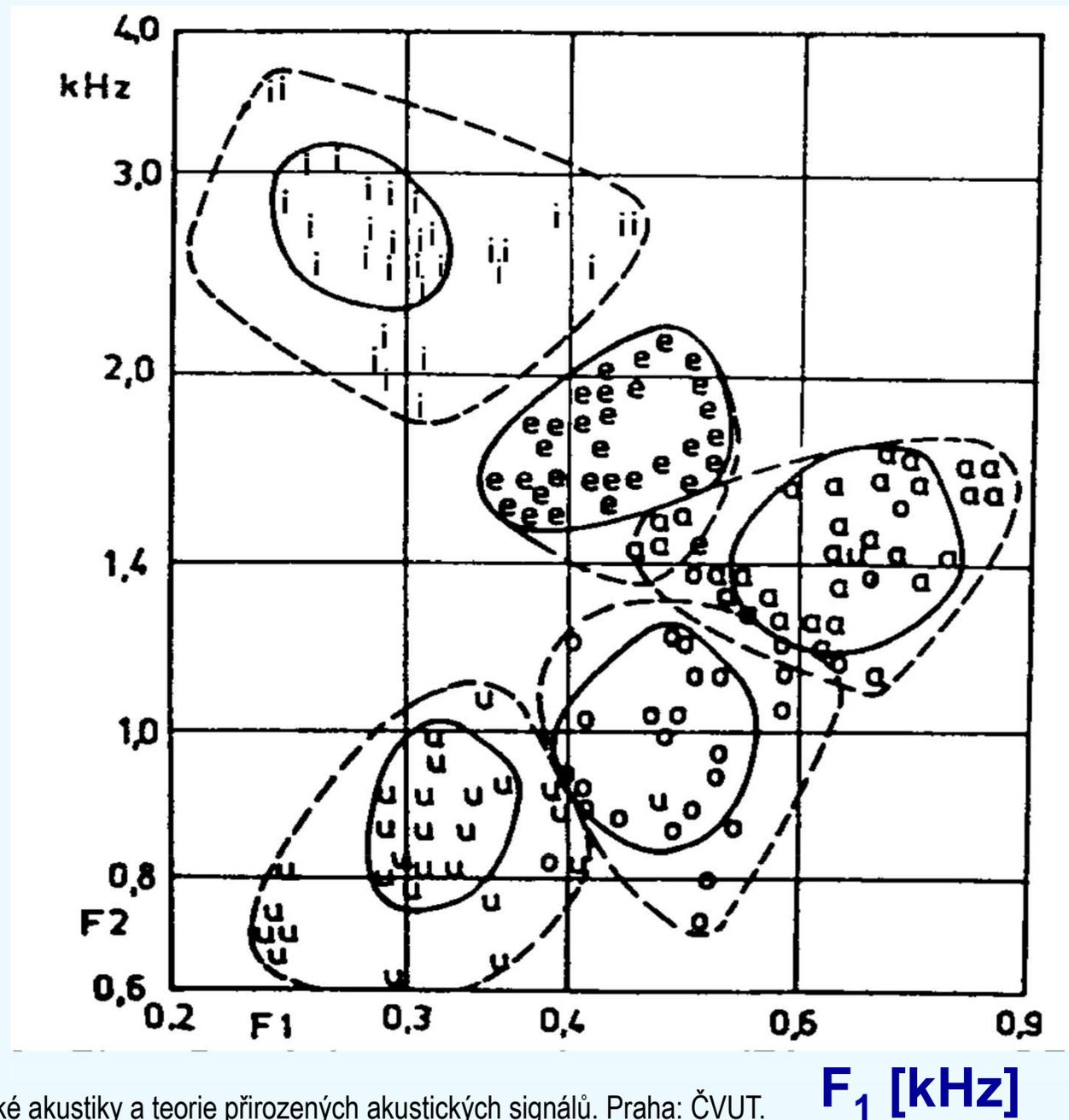
Spectrum of normal phonation



Spectrum of ingressive phonation

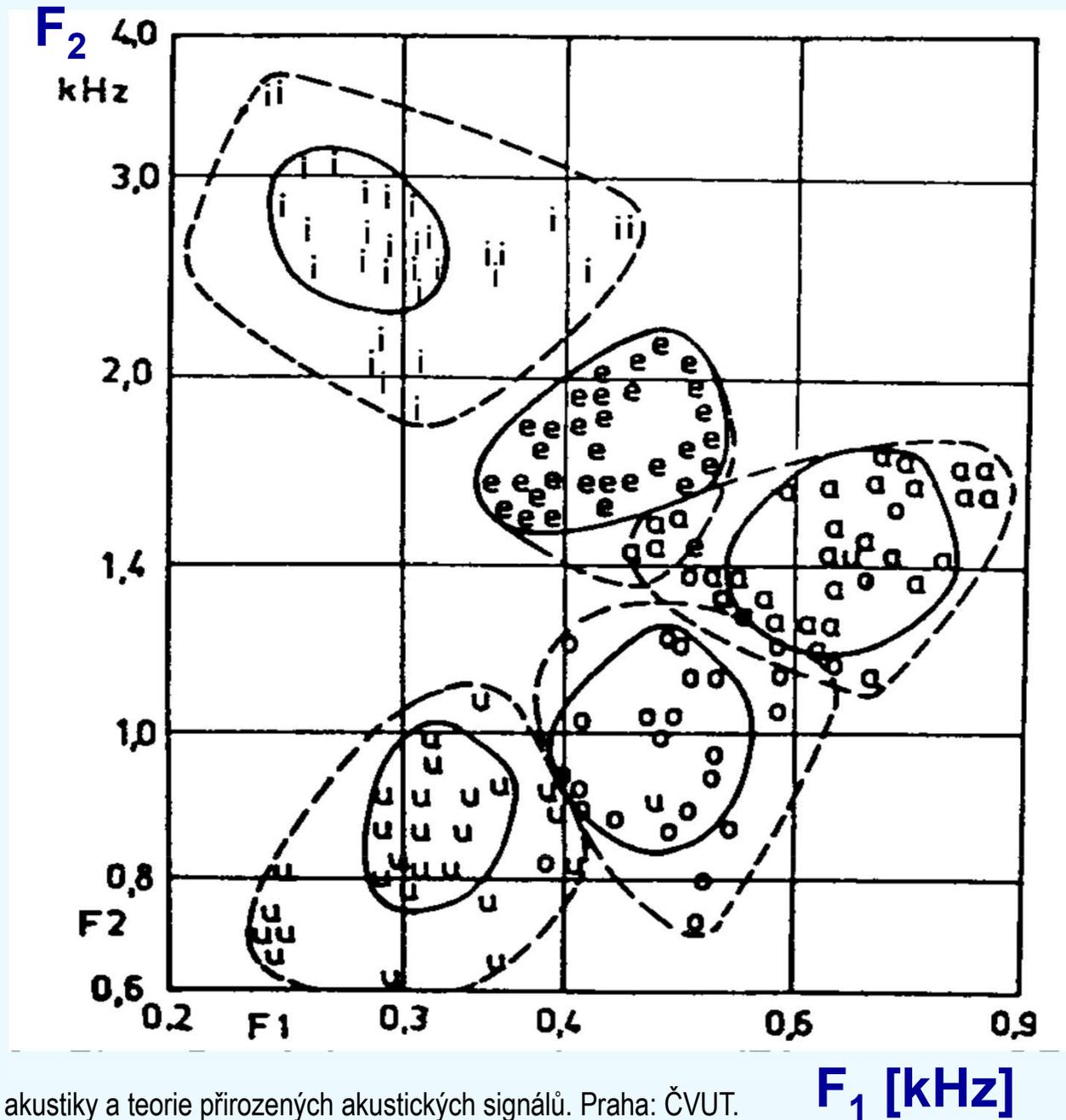


**Formantový
graf:
1. a 2. formant u
českých
samohlásek**



Merhaut (1972) Základy fyziologické akustiky a teorie přirozených akustických signálů. Praha: ČVUT.

1st and 2nd FORMANTS IN CZECH VOWELS



Merhaut (1972) Základy fyziologické akustiky a teorie přirozených akustických signálů. Praha: ČVUT.

Control Methods Used in a Study of the Vowels

GORDON E. PETERSON AND HAROLD L. BARNEY
Bell Telephone Laboratories, Inc., Murray Hill, New Jersey

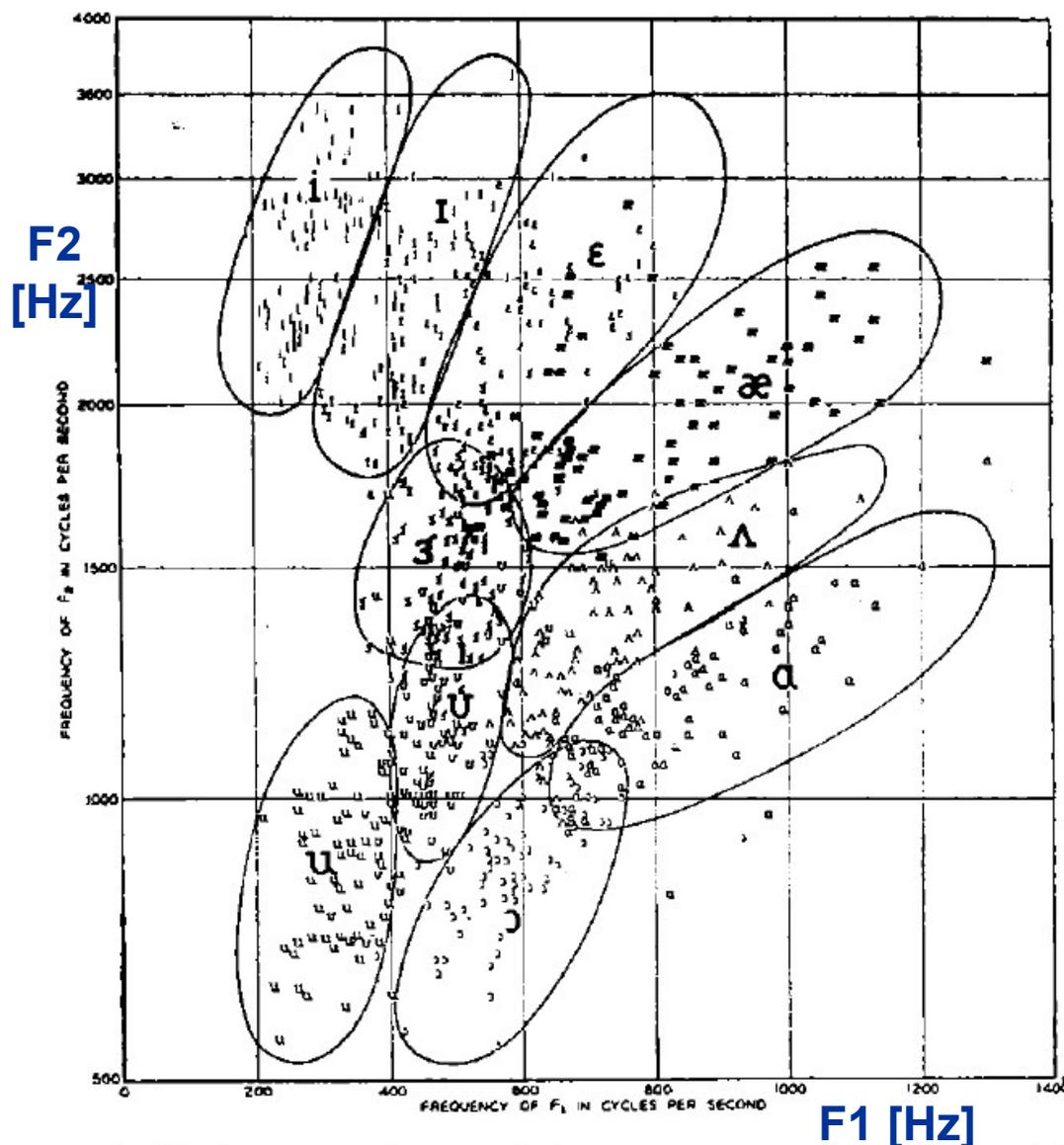


FIG. 8. Frequency of second formant *versus* frequency of first formant for ten vowels by 76 speakers.

THE JOURNAL OF
THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA

VOLUME 24, NUMBER 2

MARCH, 1952

1. a 2. FORMANT U ANGLICKÝCH SAMOHLÁSEK

Angličtina používá více
samohlásek než čeština.

Control Methods Used in a Study of the Vowels

GORDON E. PETERSON AND HAROLD L. BARNEY
Bell Telephone Laboratories, Inc., Murray Hill, New Jersey

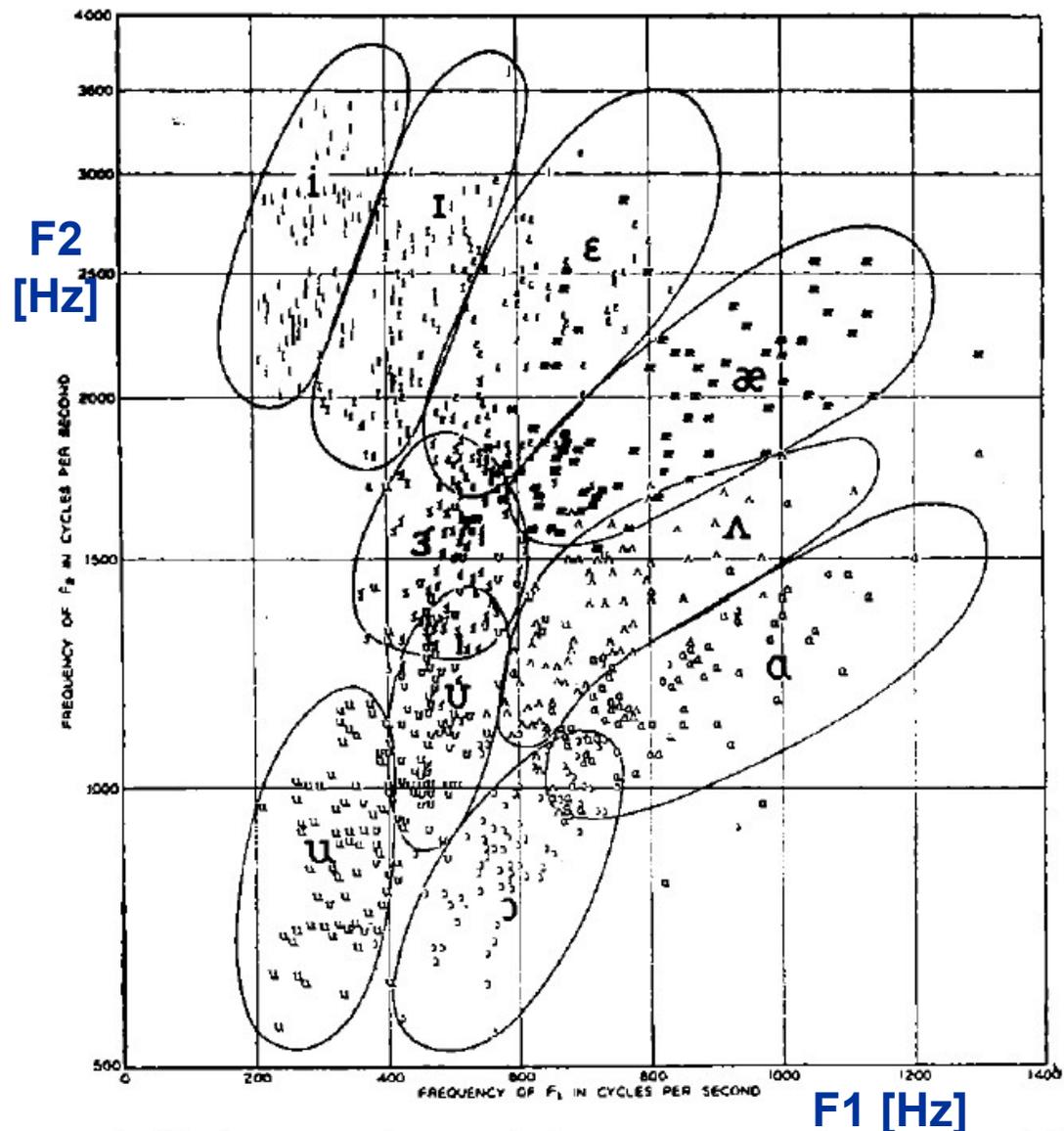


FIG. 8. Frequency of second formant *versus* frequency of first formant for ten vowels by 76 speakers.

THE JOURNAL OF
THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA

VOLUME 24, NUMBER 2

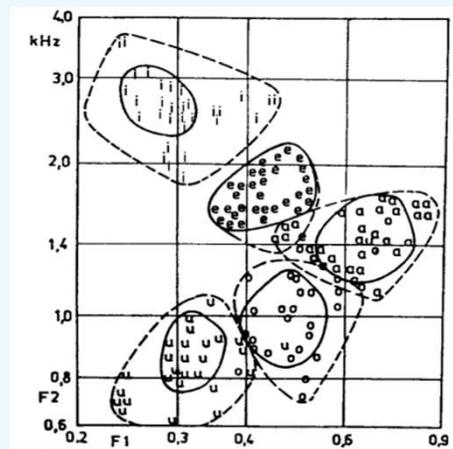
MARCH, 1952

1st and 2nd FORMANT IN ENGLISH VOWELS

English uses more vowels than
Czech

TVAR VOKÁLNÍHO TRAKTU U ČESKÝCH SAMOHLÁSEK

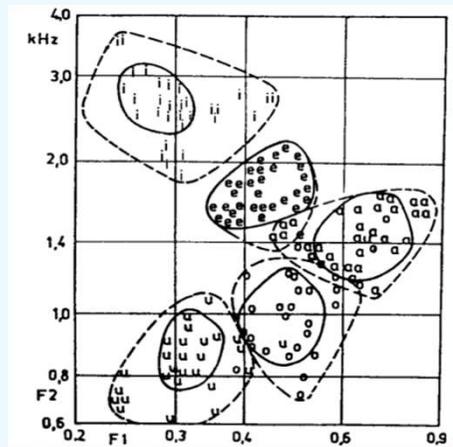
Obrázky z magnetické rezonance - Dedouch, Švec, Horáček, Kršek, Havlík & Vokřál (2003)



Dedouch K, Švec JG, Horáček J, Kršek P, Havlík R a Vokřál J. Akustická analýza mužského vokálního traktu pro české samohlásky. In: Sborník. 1. česko-slovenský foniatričtý kongres a XIV. celostátní foniatričtý dny Evy Sedláčkové, Brno, 11.-13. září 2003, Brno: Audio-Fon Centr, 2003.

VOCAL TRACT SHAPE IN CZECH VOWELS

Magnetic resonance imaging - Dedouch, Švec, Horáček, Kršek, Havlík & Vokřál (2003)

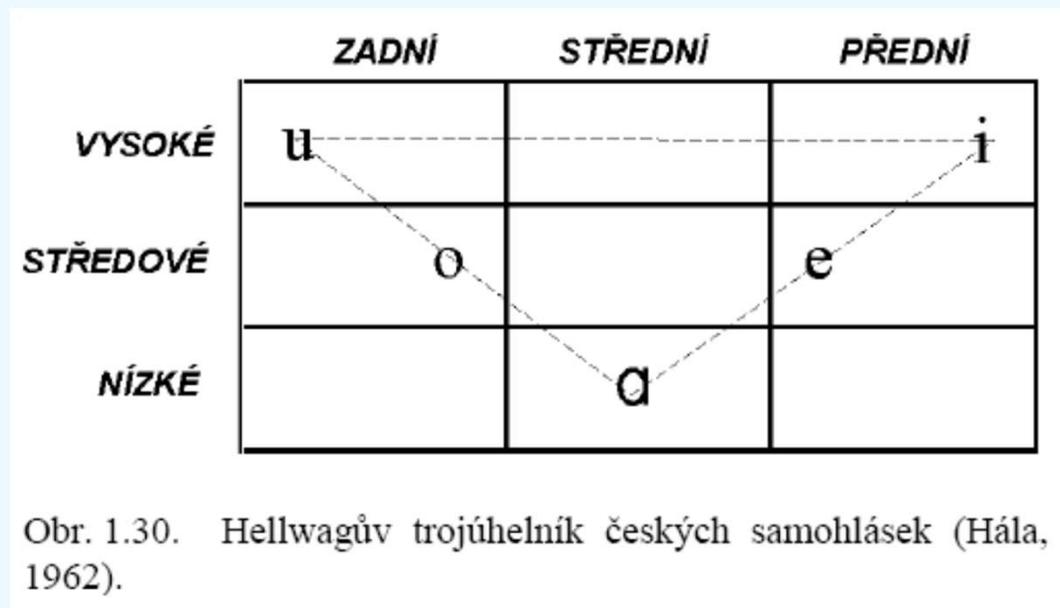


Dedouch K, Švec JG, Horáček J, Kršek P, Havlík R and Vokřál J. Akustická analýza mužského vokálního traktu pro české samohlásky. [Acoustic analysis of Czech vowels in a male vocal tract]. (in Czech). In: Sborník. 1. česko-slovenský foniatričtý kongres a XIV.celostátní foniatričtý dny Evy Sedláčkové, Brno, 11.-13. září 2003, Brno: Audio-Fon Centr, 2003.

VERTIKÁLNÍ A HORIZONTÁLNÍ POLOHA JAZYKA U ČESKÝCH SAMOHLÁSEK: „Hellwagův trojúhelník“

Horizontální poloha jazyka

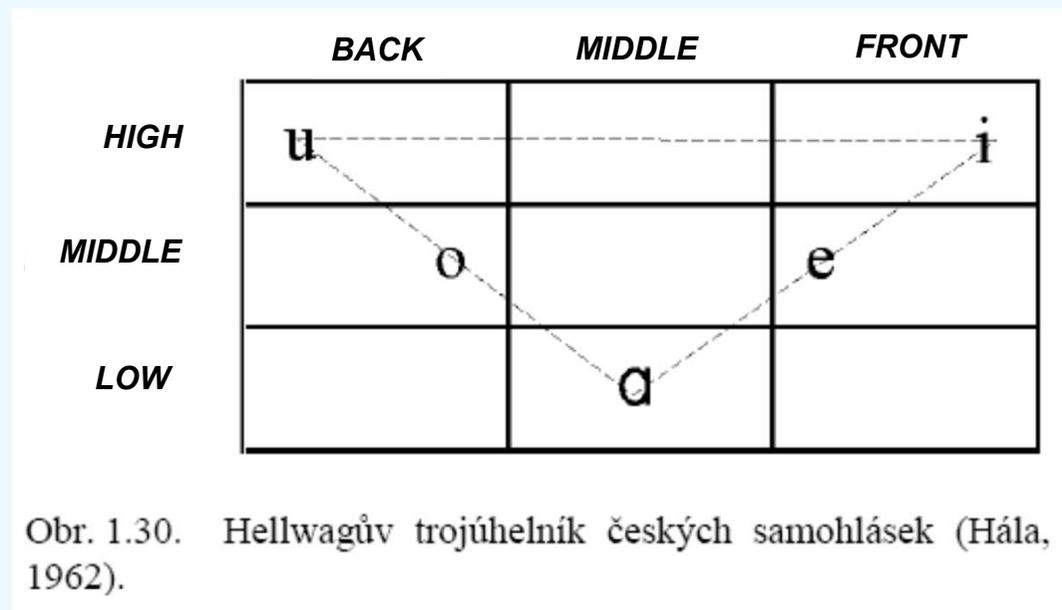
Vertikální poloha
jazyka /
rozevření čelistí



Horizontal and vertical position of the tongue in Czech vowels: "Hellwag Triangle"

Horizontal position of the tongue

Vertical position of the tongue / jaw opening



OBLASTI VÝZKUMU:

Modelování hlasu

Podrobnější pochopení mechanismů tvorby hlasu a řeči

Příklady: B.Story, University of Arizona, USA

RESEARCH AREAS:

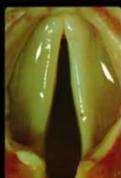
Voice modeling

A more detailed understanding of the mechanisms of voice
and speech production

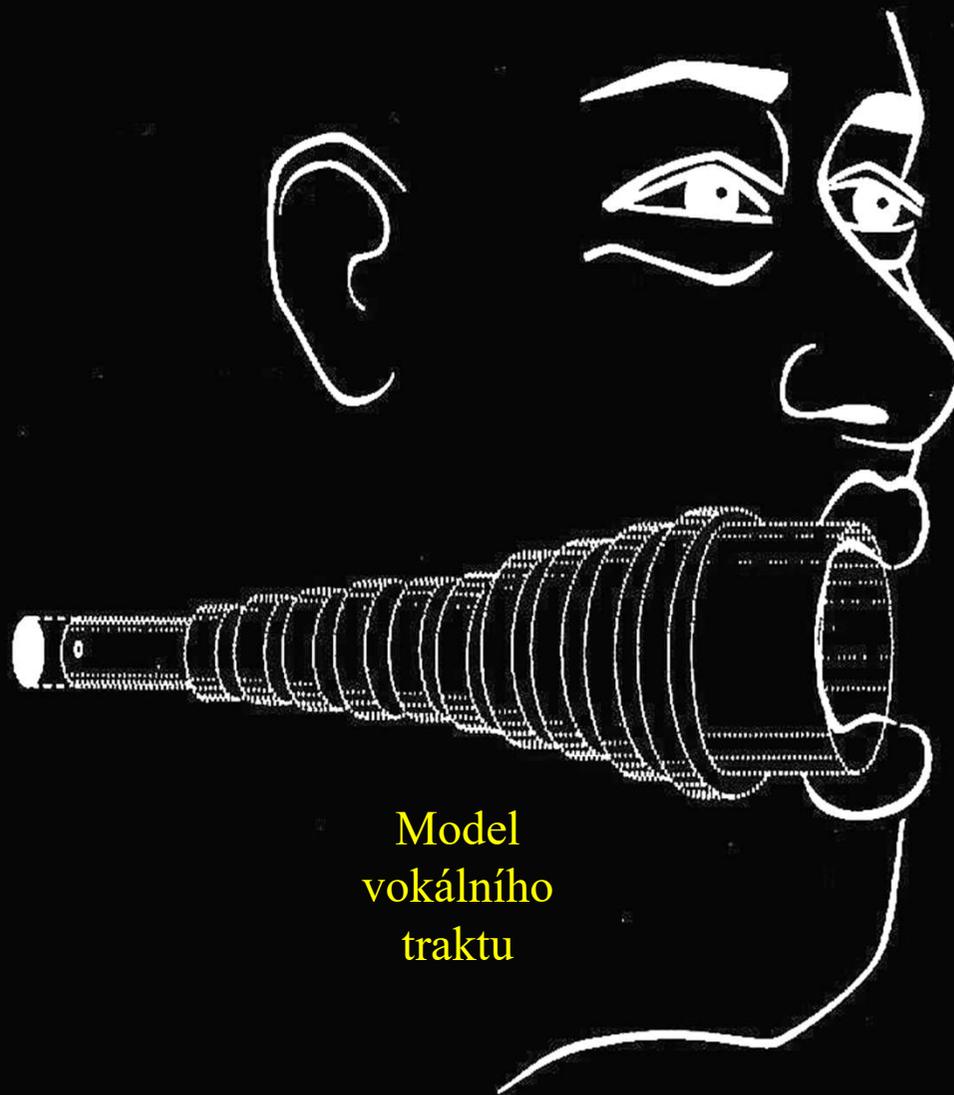
Examples: B.Story, University of Arizona, USA

Modelování hlasu

Hlasivky



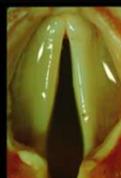
Model
vokálního
traktu



Slide by B.Story,
Ph.D. & I. Titze,
Ph.D.

Voice modeling

Vocal folds



Vocal tract model

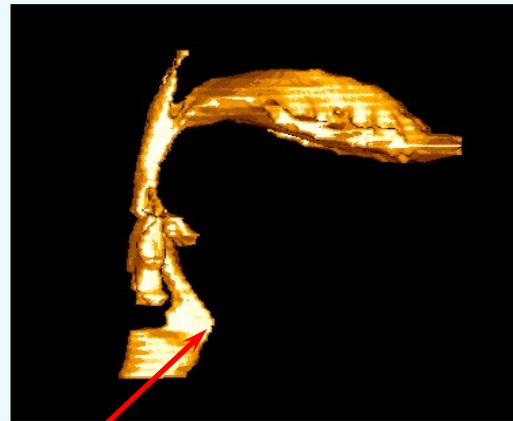


Slide by B.Story,
Ph.D. & I. Titze,
Ph.D.

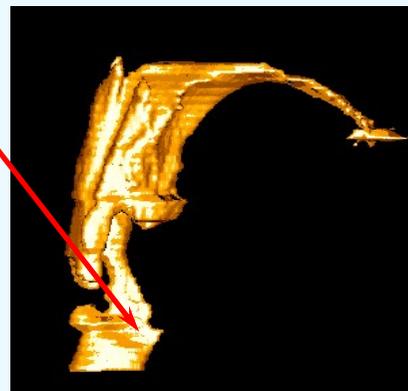
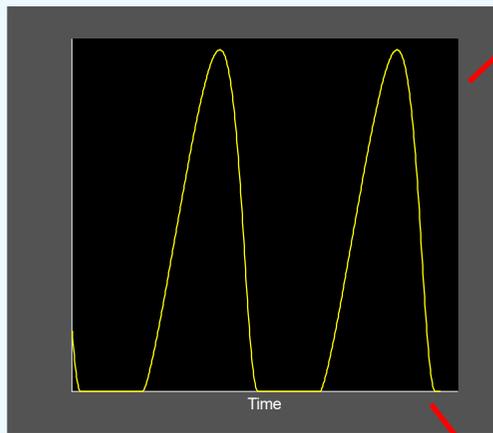
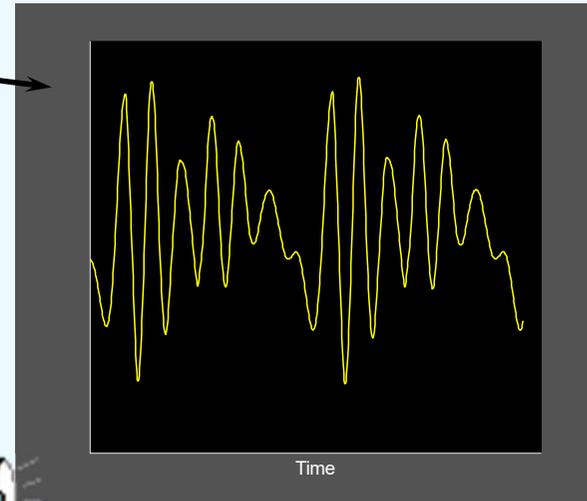
Vokální trakt z MRI

Akustický tlak u úst

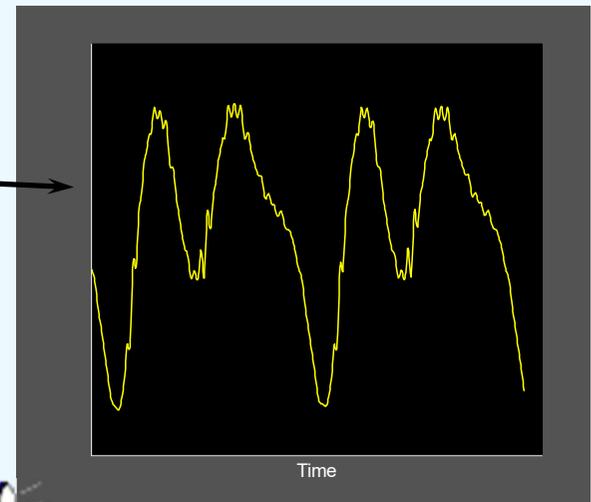
Vzduchové pulsy u hlasivek



[a]

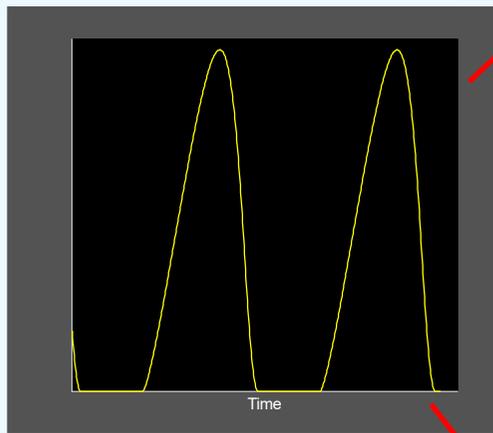


[i]

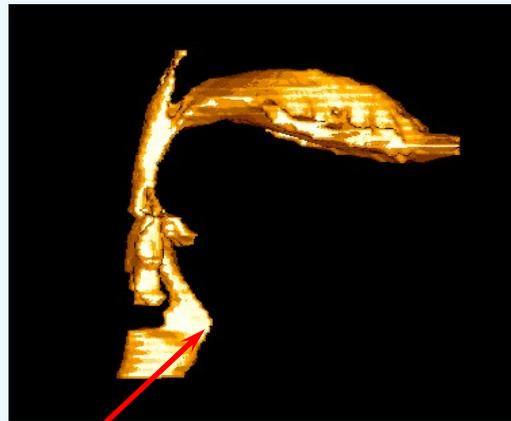


Slide by B.Story, Ph.D.

Voice source
signal - air
pulses above the
vocal folds

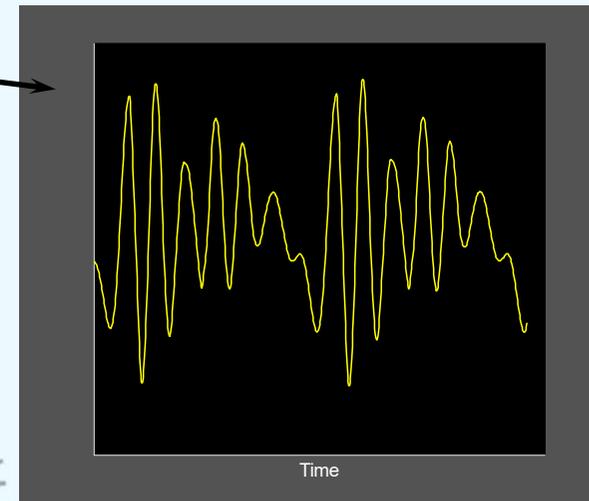


Vocal tract from MRI

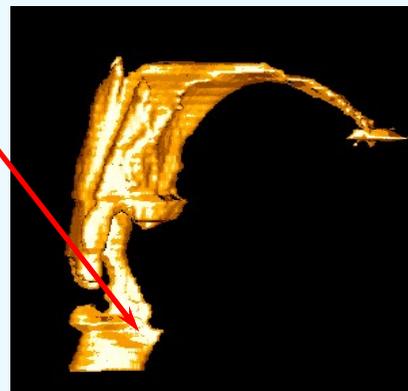


[a]

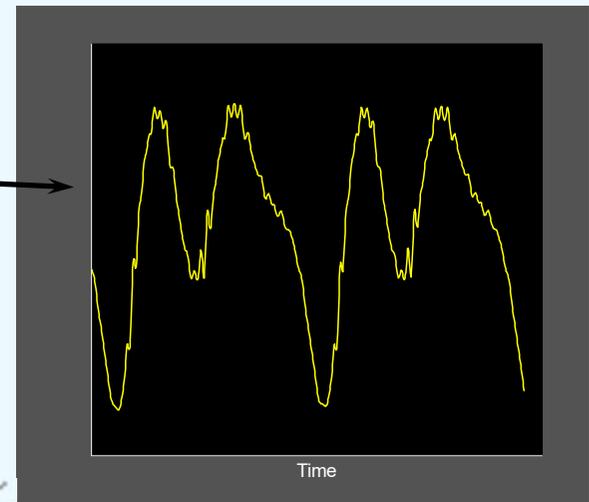
Acoustic pressure at the
mouth



Slide by B.Story, Ph.D.



[i]



Simulation of “I enjoy the simple life as long as there’s plenty of comfort”

Original recording: 

From the “old days” (back when we adjusted area functions by hand): 

Simulated version: 

Transform to longer vocal tract and lower F_0 : 

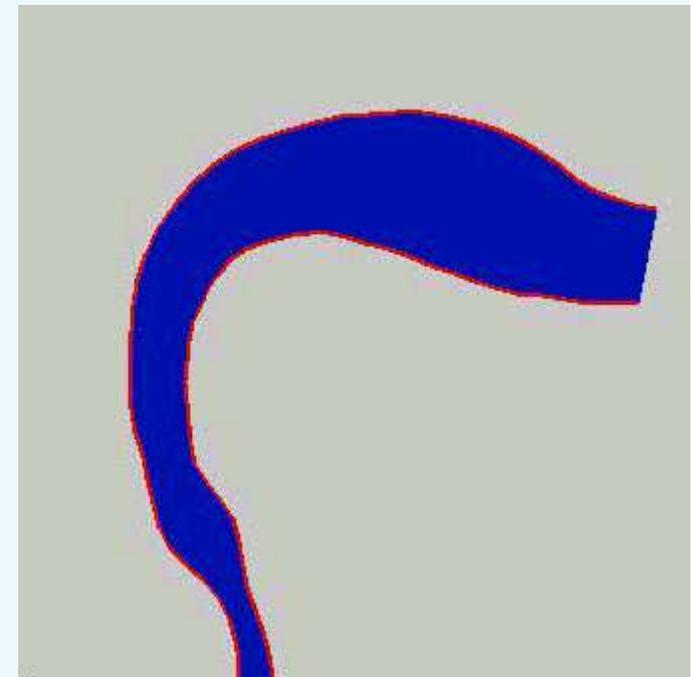
Transform to “twang”: 

Transform to “yawn”: 

Transform to shortened vocal tract and increased F_0 : 



Simplelife movie



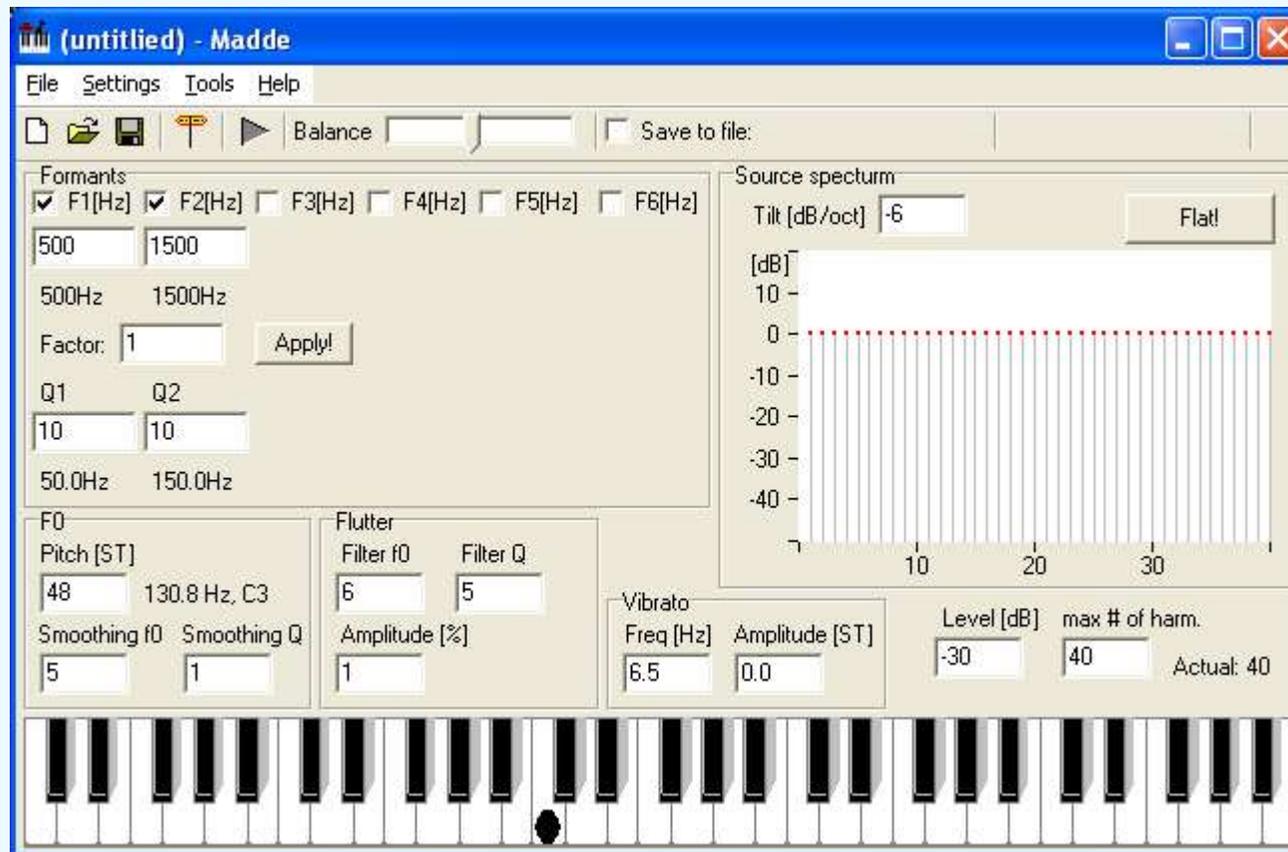
DEMONSTRACE

Akustická syntéza hlasu



Program Madde (S.Granqvist, KTH Stockholm, 2005)

S. Granqvist



Run Madde

Run
Real Time
Spectrum

<http://www.speech.kth.se/music/downloads/smptool/>

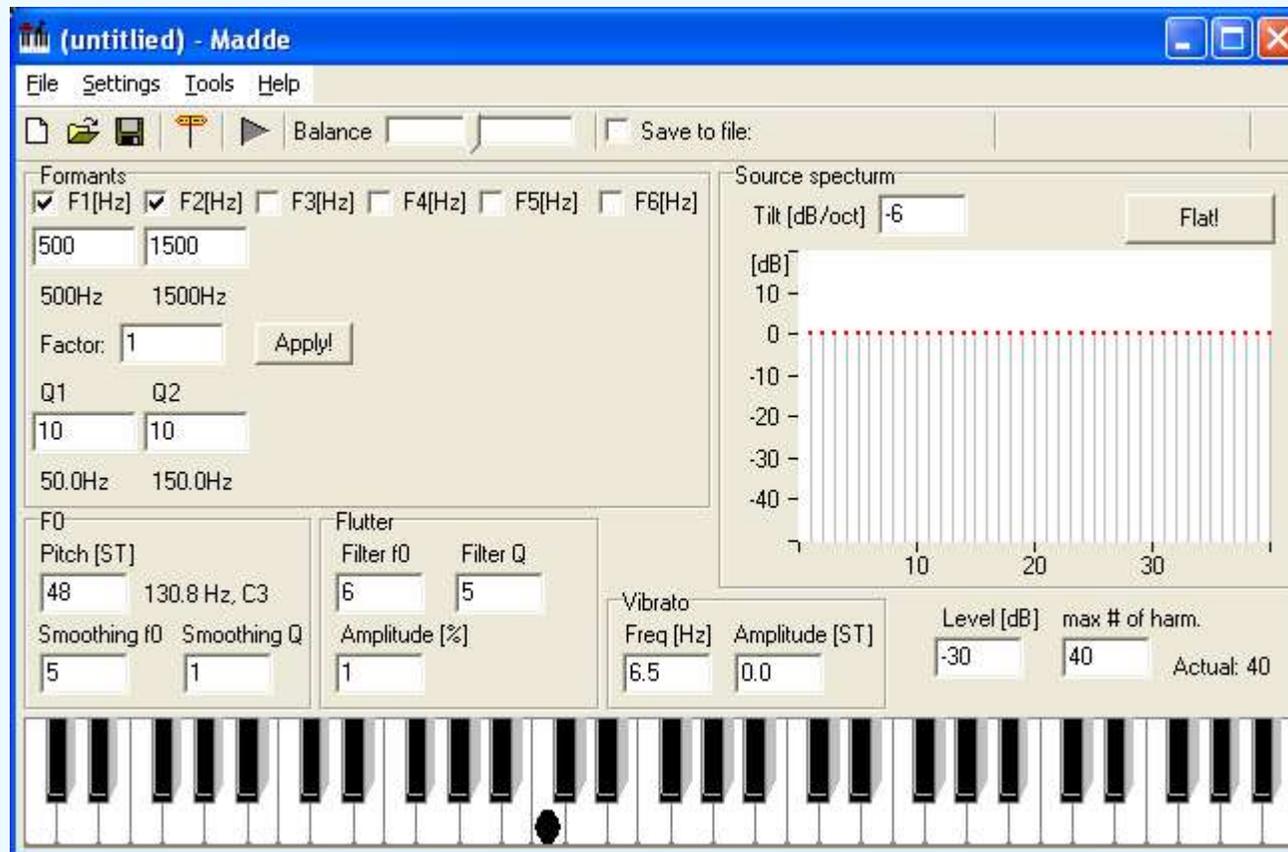
DEMONSTRATION

Acoustic voice synthesis



Program Madde (S.Granqvist, KTH Stockholm, 2005)

S. Granqvist



Run Madde

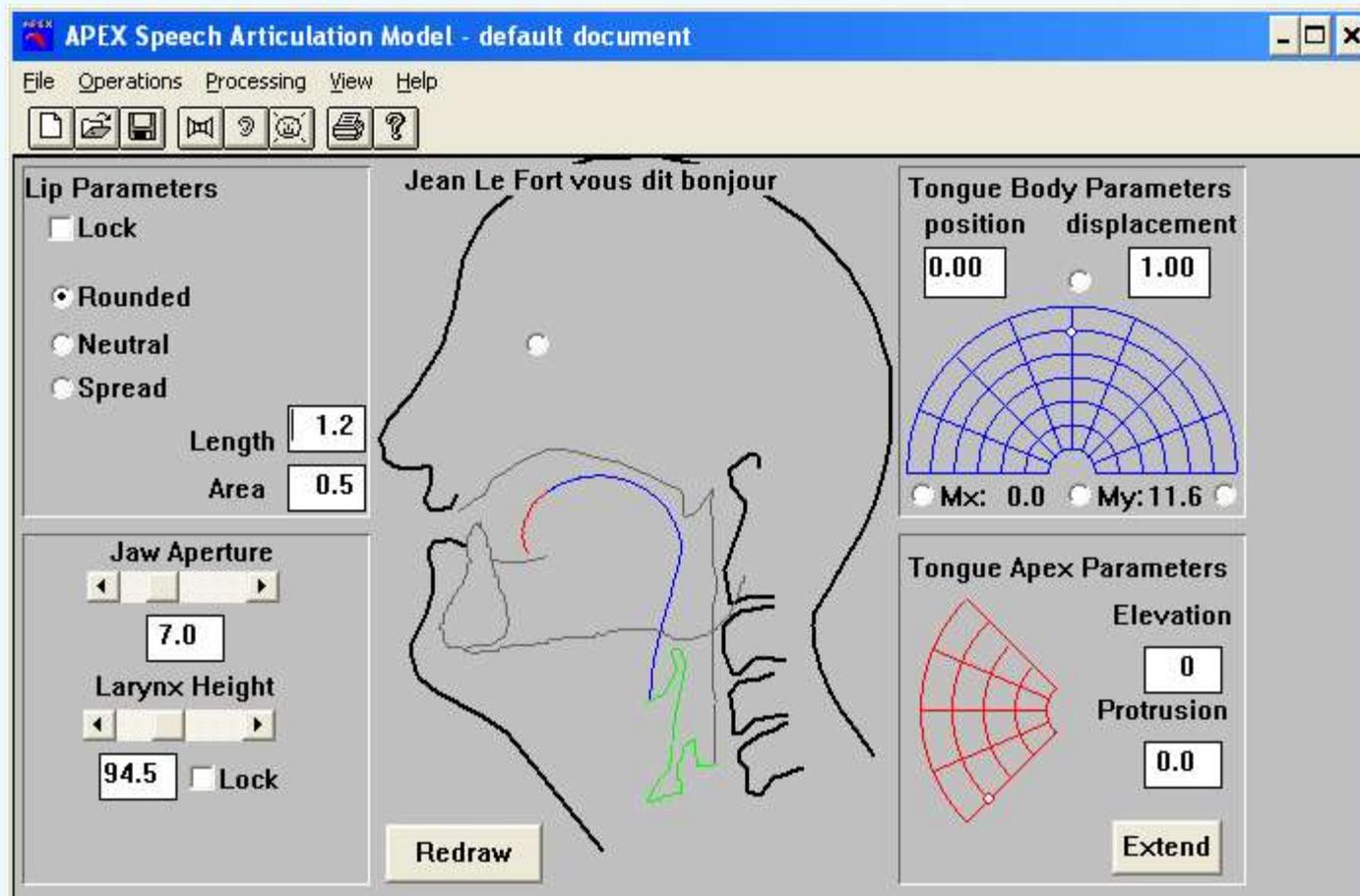
Run
Real Time
Spectrum

<http://www.speech.kth.se/music/downloads/smptool/>

DEMONSTRACE

Artikulační syntéza hlasu

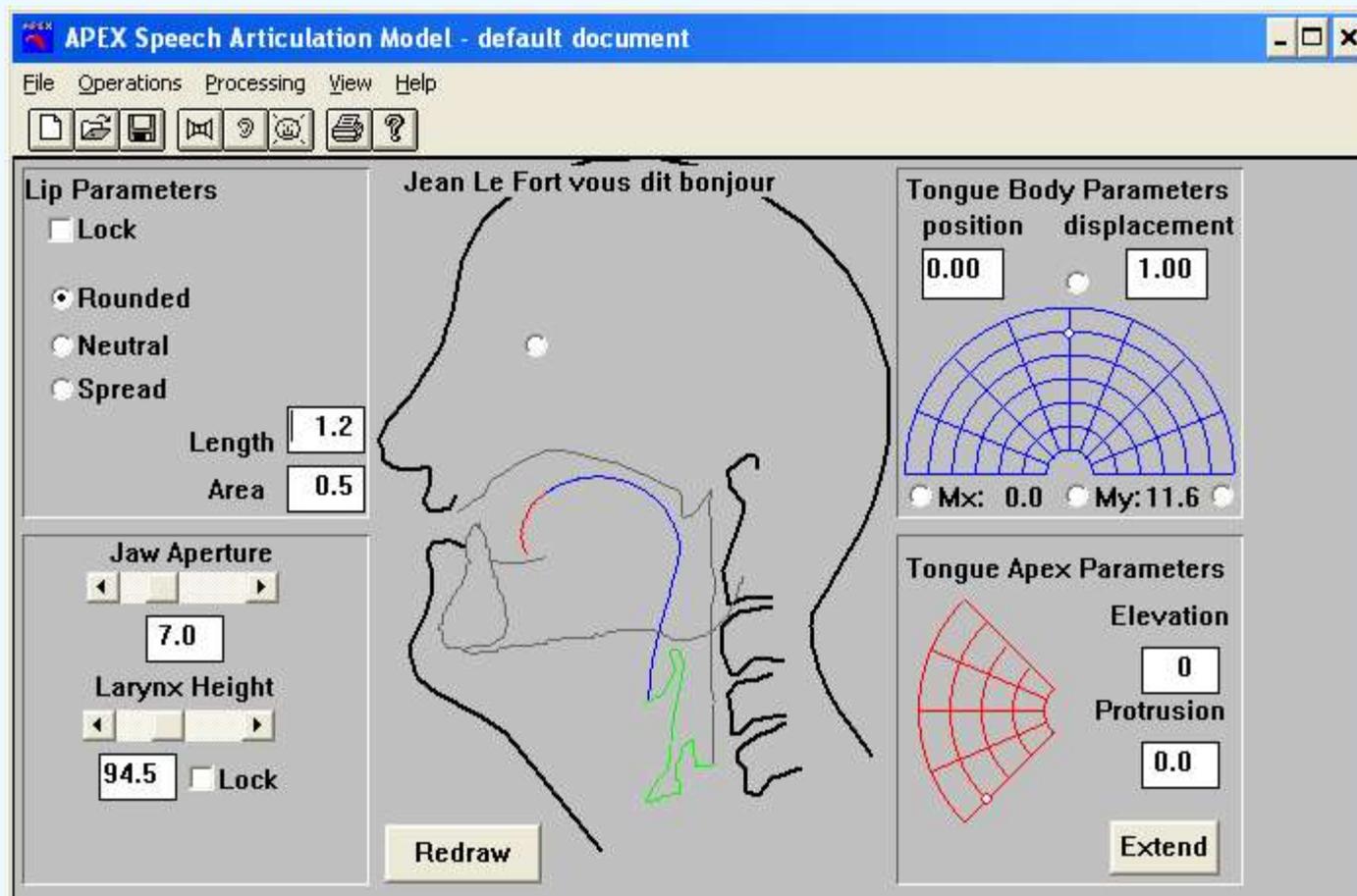
Program Apex (Lindblom, Liljenkrantz, Stark, Sundberg & Ternström, KTH Stockholm, 2005)



DEMONSTRATION

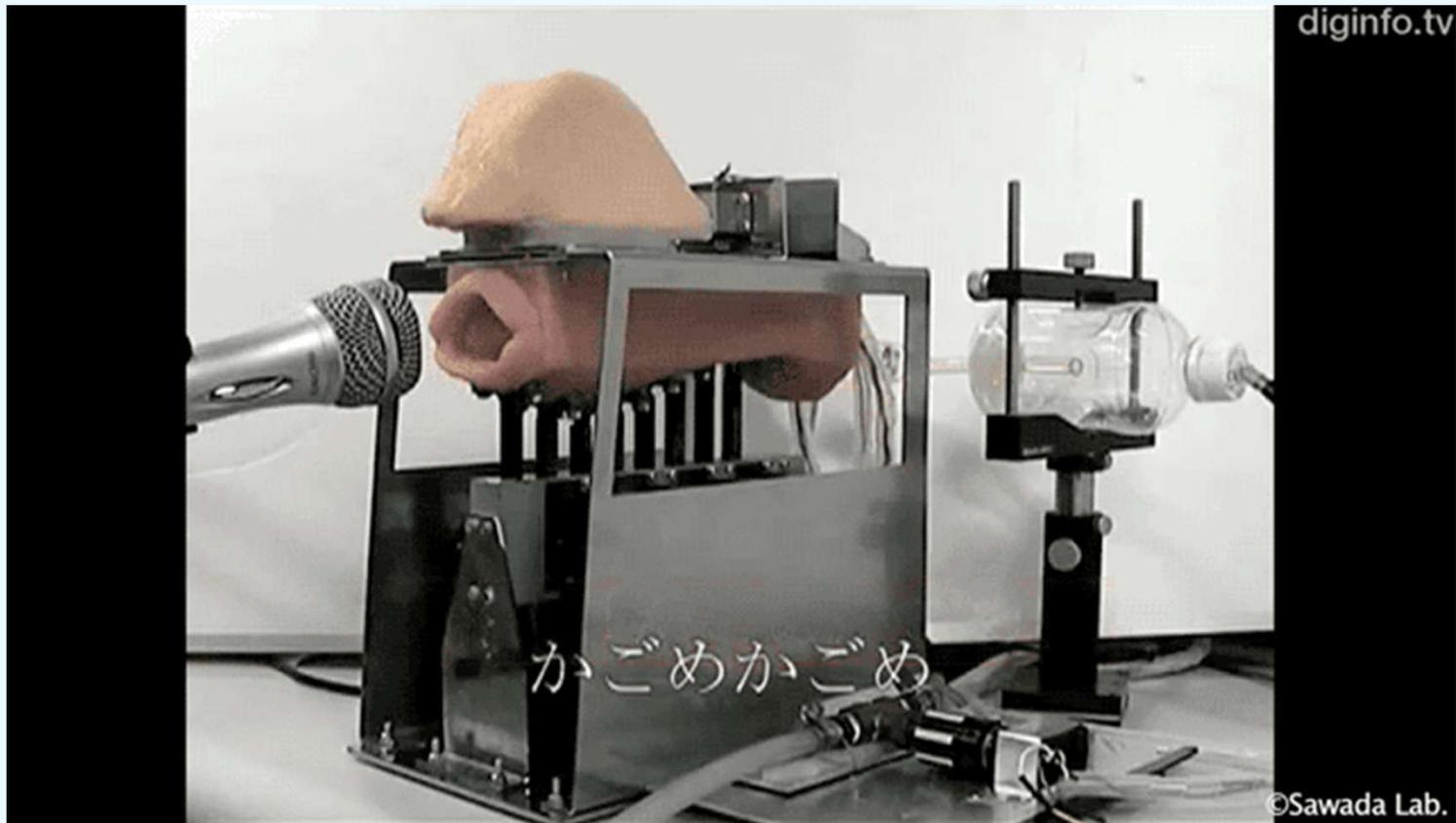
Speech articulation model

Program Apex (Lindblom, Liljenkrantz, Stark, Sundberg & Ternström, KTH Stockholm, 2005)



DEMONSTRACE / DEMONSTRATION

Mluvící a zpívající umělá ústa / Talking and singing robot mouth



http://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~sawada/index_e.html

DEMONSTRACE / DEMONSTRATION

**Mluvící a zpívající umělá ústa /
Talking and singing robot mouth**



<https://www.youtube.com/watch?v=HmSYnOvEueo>

KONEC DÍLU / END OF THE PART

Video o struktuře a funkci hrtanu

Jw. van den Berg, W. Vennard, D. Burger, and C. C. Shervanian.

Voice production. The vibrating larynx. (Instructional film),
University of Groningen, 1960.

Česká verze, překlad Prof. RNDr. J. Pešák, CSc. a Dagmar Flynt, M.A.

https://www.youtube.com/results?search_query=the+vibrating+larynx

Janwillem van den Berg
Groningen, Nizozemsko
cca 1975



Video about the structure and function of the larynx

Jw. van den Berg, W. Vennard, D. Burger, and C. C. Shervanian.

Voice production. The vibrating larynx. (Instructional film),
University of Groningen, 1960.

https://www.youtube.com/results?search_query=the+vibrating+larynx

Janwillem van den Berg
Groningen, the Netherlands
c. 1975

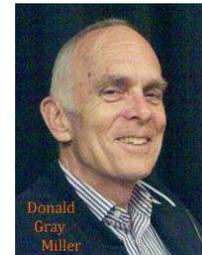


TEORIE KMITÁNÍ HLASIVEK

Jak dochází k rozkmitání hlasivek a vzniku hlasu?

V učebních textech bývají zavádějící informace – aktuální vysvětlení a přehled:

Integrative Insights into the Myoelastic-Aerodynamic Theory and Acoustics of Phonation. Scientific Tribute to Donald G. Miller



*Jan G. Švec, †Harm K. Schutte, ‡C. Julian Chen, and §Ingo R. Titze, *Olomouc, Czechia, †Groningen, the Netherlands, ‡New York, New York, and §Salt Lake City, Utah

Journal of Voice, Vol. 37, No. 3, pp. 305–313 (2023)

0892-1997

© 2021 The Voice Foundation. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2021.01.023>



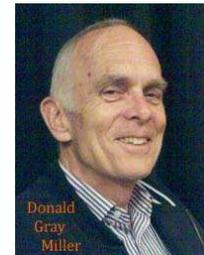
THEORIES OF VOCAL FOLD OSCILLATIONS

How do the vocal fold oscillations arise?

How is voice produced?

Older textbooks sometimes provide incorrect information – recent explanation and review:

Integrative Insights into the Myoelastic-Aerodynamic Theory and Acoustics of Phonation. Scientific Tribute to Donald G. Miller



*Jan G. Švec, †Harm K. Schutte, ‡C. Julian Chen, and §Ingo R. Titze, *Olomouc, Czechia, †Groningen, the Netherlands, ‡New York, New York, and §Salt Lake City, Utah

Journal of Voice, Vol. 37, No. 3, pp. 305–313 (2023)

0892-1997

© 2021 The Voice Foundation. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2021.01.023>



MYOELASTICKO-AERODYNAMICKÁ TEORIE KMITÁNÍ HLASIVEK



JAN G. ŠVEC

Katedra experimentální fyziky, Př.F. UPOL

Hlasové a sluchové centrum Praha

MYOELASTIC-AERODYNAMIC THEORY OF VOCAL FOLD OSCILLATION



JAN G. ŠVEC

Dept. Experimental Physics, Faculty of Science, Palacký University,
OLOMOUC, CZECH REPUBLIC

Voice and Hearing Centre Prague, PRAGUE, CZECH REPUBLIC

TEORIE KMITÁNÍ HLASIVEK

MYOELASTICKO-AERODYNAMICKÁ TEORIE (MEAD)

(van den Berg 1958, Titze, 1980, 2006)

Základní platná teorie pro člověka, savce a ptáky.

- ▣ Frekvence kmitání hlasivek je primárně určena ELASTICKÝMI parametry hlasivek (analogie – kmitání struny nebo pružiny)
- ▣ Elasticitu (a frekvenci kmitání) hlasivek lze měnit pomocí svalů (MYOELASTICKÁ část teorie)
- ▣ Energie pro kmitání je dodávána AERODYNAMICKOU cestou (vzduch z plic).
- ▣ Kmity hlasivek jsou **samobuzené** – vzniknou automaticky při konstantním průtoku vzduchu

Alternativní teorie

NEUROCHRONAXNÍ TEORIE (Husson 1950-57)

Kmity hlasivek vznikají díky periodickým kontrakcím hlasivkového svalu.

Teorie byla vyvrácena van den Bergem a pozdějšími výzkumy.

Ukazuje se ale jako platná pro předení koček - Sissom et al, J. Zoology, 1991).



TEORIE STLAČENÝCH BUBLIN (Mišun 2003-12) – kontroverzní teorie, nebere v úvahu měření in-vivo

THEORIES OF VOCAL FOLD OSCILLATIONS

MYOELASTIC-AERODYNAMIC THEORY (MEAD)

(van den Berg 1958, Titze, 1980, 2006)

Basic, valid theory – it holds for humans, mammals, birds,...

- Frequency of the oscillations primarily determined by ELASTIC parameters of the vocal folds (analogy – vibration of a string: stiffer string -> higher f_0)
- Elasticity (and the oscillation frequency) of the VF can be changed using laryngeal muscles (MYOELASTIC part of MEAD)
- Energy for oscillations supplied by air flowing from the lungs (AERODYNAMIC part of MEAD).
- Vocal fold oscillations are **self-sustained**. – they emerge automatically when delivering steady airflow

Alternative theory:

NEUROCHRONAXIC THEORY (Husson 1950-57)

VF oscillations excited by periodic contractions of the intrinsic laryngeal muscles.

The theory may hold for cat purring (Sissom et al, J. Zoology, 1991)

Proved wrong for humans by van den Berg and later investigations.



TEORIE KMITÁNÍ HLASIVEK

MYOELASTICKO-AERODYNAMICKÁ TEORIE (MEAD)

(van den Berg 1958, Titze, 1980, 2006)

Základní platná teorie pro člověka, savce a ptáky.

- Kmity hlasivek jsou samobuzené. Energie pro kmitání je dodávána AERODYNAMICKOU cestou (vzduch z plic).
- Frekvence kmitání je primárně určena ELASTICKÝMI parametry hlasivek (analogie – kmitání struny nebo pružiny)
- Elasticitu (a frekvenci kmitání) hlasivek lze měnit pomocí svalů (MYOELASTICKÁ část teorie)

CHÁPÁNÍ TÉTO TEORIE SE OD ROKU 1958 ZMĚNILO

NOVÉ POZNATKY VŠAK NEJSOU ČASTO V UČEBNICÍCH ZOHLEDNĚNY

TEORIE KMITÁNÍ HLASIVEK

MYOELASTICKO-AERODYNAMICKÁ TEORIE (MEAD)

(van den Berg 1958, Titze, 1980, 2006)

Základní platná teorie pro člověka, savce a ptáky.

KLASICKÉ UČEBNICOVÉ VYSVĚTLENÍ KMITÁNÍ HLASIVEK PODLE MEAD

- ▣ Sevřené hlasivky zvýší tlak výdechového vzduchu pod hlasivkami
- ▣ Přetlak pod hlasivkami způsobí jejich rozevření
- ▣ Po rozevření tlak klesne a hlasivky se díky své elasticitě opět uzavřou
- ▣ Tento děj se stále opakuje

(viz např. <https://www.britannica.com/topic/speech-language/Theory-of-voice-production>)

Měření in-vivo toto vysvětlení nepodporují!

Paradox: Rozpor mezi běžnými učebnicemi a vědou

TEORIE VZNIKU HLASU

Hlasivky se neotevírají zvýšeným subglotickým tlakem

Neuzavírají se tehdy, když subglotický tlak klesne.

Jak ale tedy vlastně dochází k rozkmitání hlasivek??

TEORIE VZNIKU KMITÁNÍ HLASIVEK

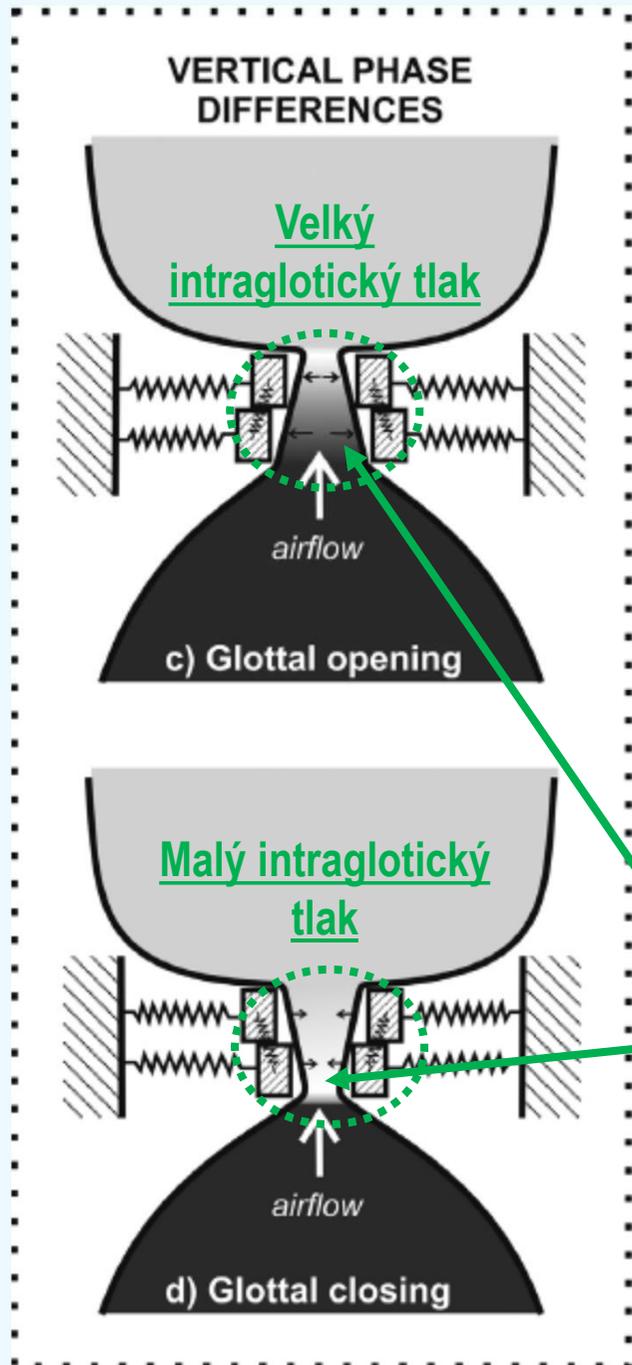
Jak to, že se hlasivky samy rozkmitají vlivem proudu vzduchu?

THEORY OF VOCAL FOLD OSCILLATIONS

How come the vocal folds start to self-oscillate
when exposed to airflow?

Švec, Schutte, Chen, Titze (2023). Integrative Insights into MEAD. *Journal of Voice* doi:10.1016/j.jvoice.2021.01.023

First described in Titze, I. R. (1988). The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds. *J. Acoust. Soc. Am.*, 83(4), 1536-1552.



Základní podmínka pro kmitání hlasivek:

Intraglotický tlak (tlak v glottis mezi hlasivkami) musí být větší při otevírání než při uzavírání glottis (push-pull effect)

Nejlépe to vznikne otevíráním a uzavíráním glottis odspodu nahoru (vertikální fázové rozdíly, „slizniční vlna“)

Konvergentní tvar při otevírání

Divergentní tvar při uzavírání

Nejužší část glottis – rozhraní - určuje dominanci sub- nebo supraglotického tlaku mezi hlasivkami

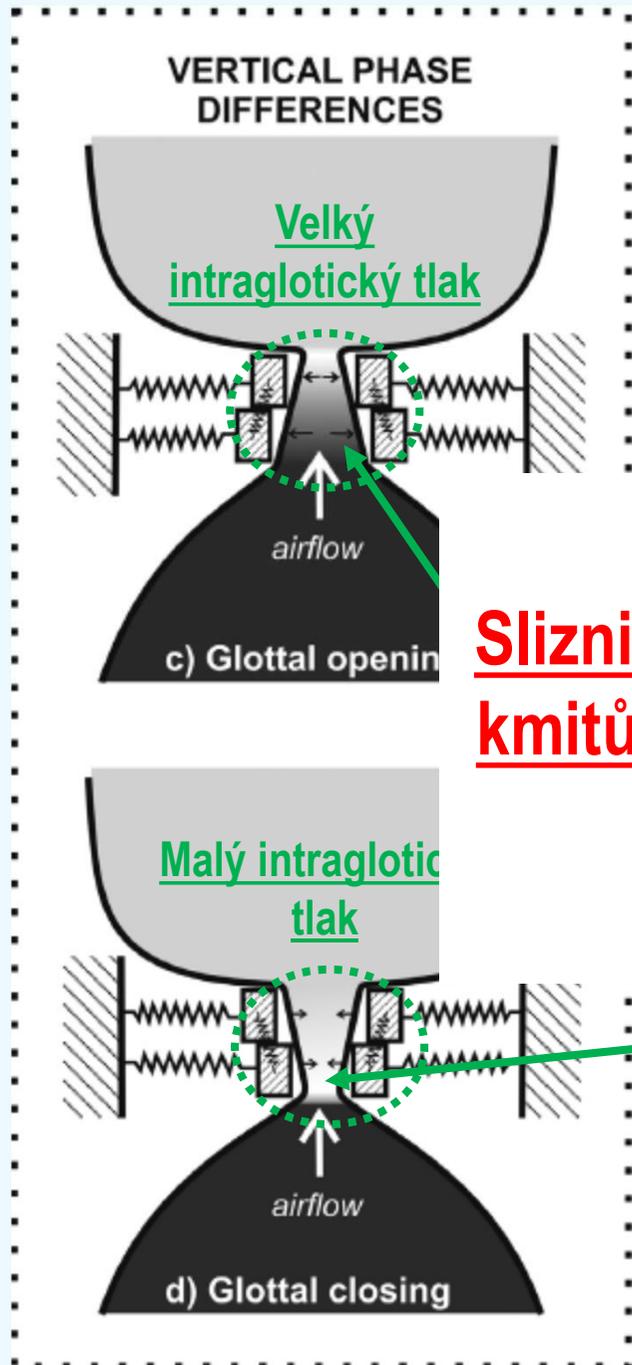
Zanedbán vliv subglotických a supraglotických oscilací tlaku (zvuk v dutinách nad a pod hlasivkami) – sekundární vliv na kmity hlasivek

Švec, Schutte, Chen, Titze (2023). Integrative Insights into MEAD. *Journal of Voice* doi:10.1016/j.jvoice.2021.01.023

First described in Titze, I. R. (1988). The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds. *J. Acoust. Soc. Am.*, 83(4), 1536-1552.



Základní podmínka pro kmitání hlasivek:



Slizniční vlny – jeden z nejdůležitějších rysů kmitů hlasivek sledovaných lékaři v klinické praxi

Divergentní tvar při uzavírání

Nejužší část glottis – rozhraní - určuje dominanci sub- nebo supraglottického tlaku mezi hlasivkami

Zanedbán vliv subglottických a supraglottických oscilací tlaku (zvuk v dutinách nad a pod hlasivkami) – sekundární vliv na kmity hlasivek



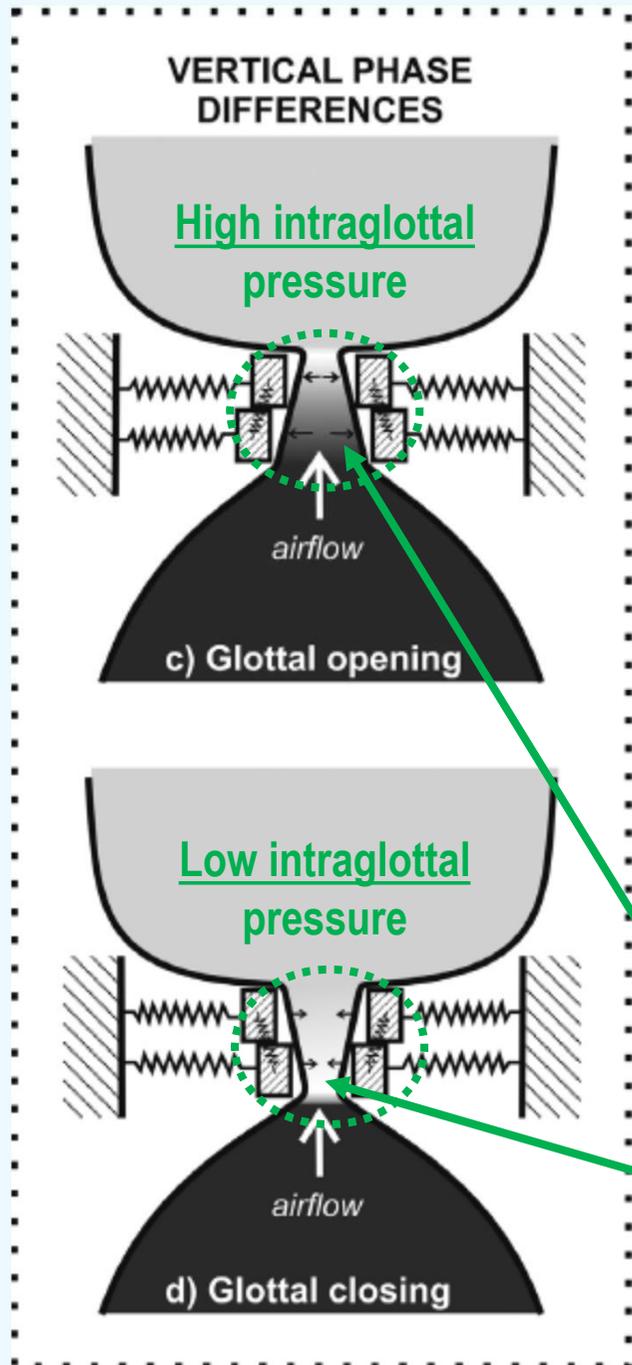
Titze, I. R. (1988). The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds. *J. Acoust. Soc. Am*, 83(4), 1536-1552.

Basic condition for VF self-oscillations:

Intraglottal pressure (in glottis, between the vocal folds) must be greater when opening than when closing (**push-pull effect**)

Can be achieved by:

- 1) Opening the glottis from below to top (vertical phase differences, „mucosal wave“)
- 2) Delaying the glottal flow due to vocal tract inertance



Titze, I. R. (1988). The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds. *J. Acoust. Soc. Am*, 83(4), 1536-1552.

Basic condition for VF self-oscillations:

Intraglottal pressure (in glottis, between the vocal folds) must be greater when opening than when closing (**push-pull effect**)

Can best be achieved by:

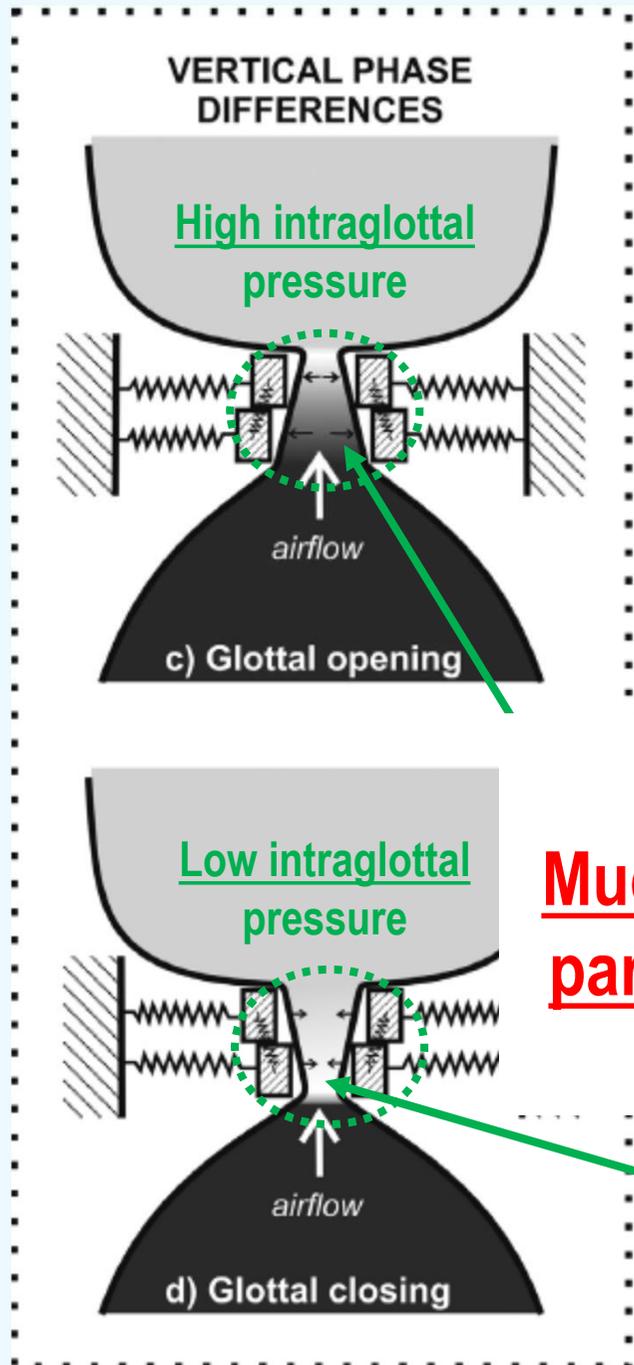
Opening the glottis from below to top (vertical phase differences, „mucosal wave“)

Narrowest part of glottis – changes influence of sub- and supraglottal pressures inside glottis

Opening – Convergent glottis – subglottal pressure dominant (higher pressure on average – PUSH GLOTTIS APART)

Closing – Divergent glottis – supraglottal pressure dominant (lower pressure on average – PULL GLOTTIS TOGETHER)

Neglects subglottal and supraglottal pressure oscillations – secondary influence on VF vibrations



Titze, I. R. (1988). The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds. *J. Acoust. Soc. Am*, 83(4), 1536-1552.

Basic condition for VF self-oscillations:

Intraglottal pressure (in glottis, between the vocal folds) must be greater when opening than when closing (**push-pull effect**)

Mucosal waves – one of the most important parameters evaluated on the vocal folds by laryngologists in clinical practice

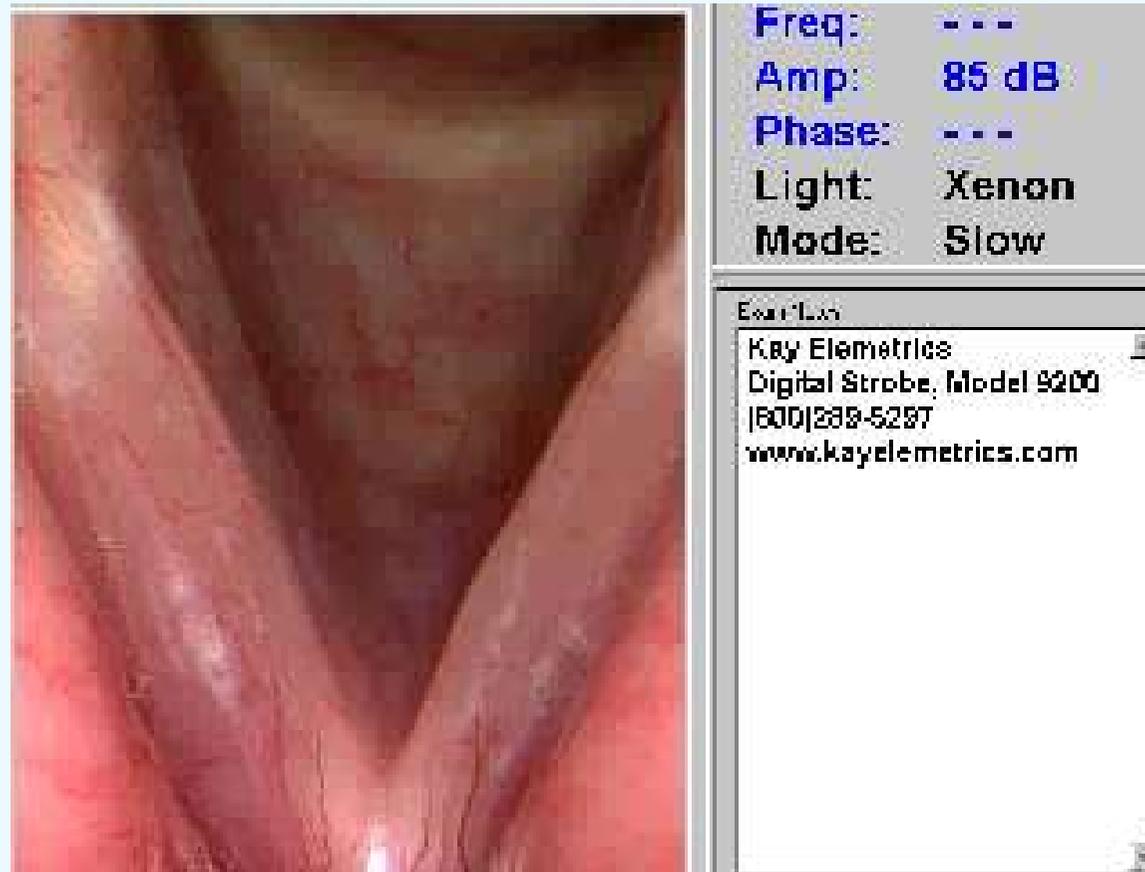
(higher pressure on average – PUSH GLOTTIS APART)

Closing – Divergent glottis – supraglottal pressure dominant (lower pressure on average – PULL GLOTTIS TOGETHER)

Neglects subglottal and supraglottal pressure oscillations – secondary influence on VF vibrations

Vizualization: LARYNGOSTROBOSCOPY

Notice the vertical phase differences and the propagation of the waves laterally on the upper vocal fold surface



Kay Elemetrics Demo examples on Stroboscope

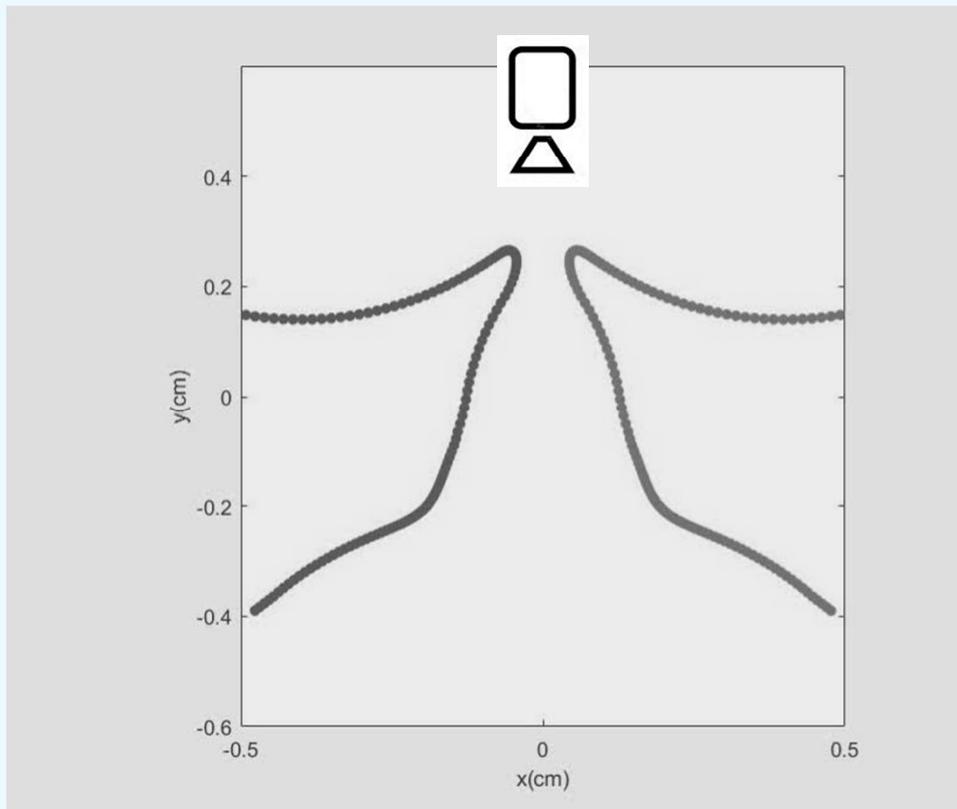


MUCOSAL WAVE MODEL:



Kumar & Švec (2019):

Waves travelling around the vocal fold surface upwards and then laterally.



Kumar SP and Svec JG. Kinematic model for simulating mucosal wave phenomena on vocal folds. Biomed Signal Process Control 49: 328-337, 2019.



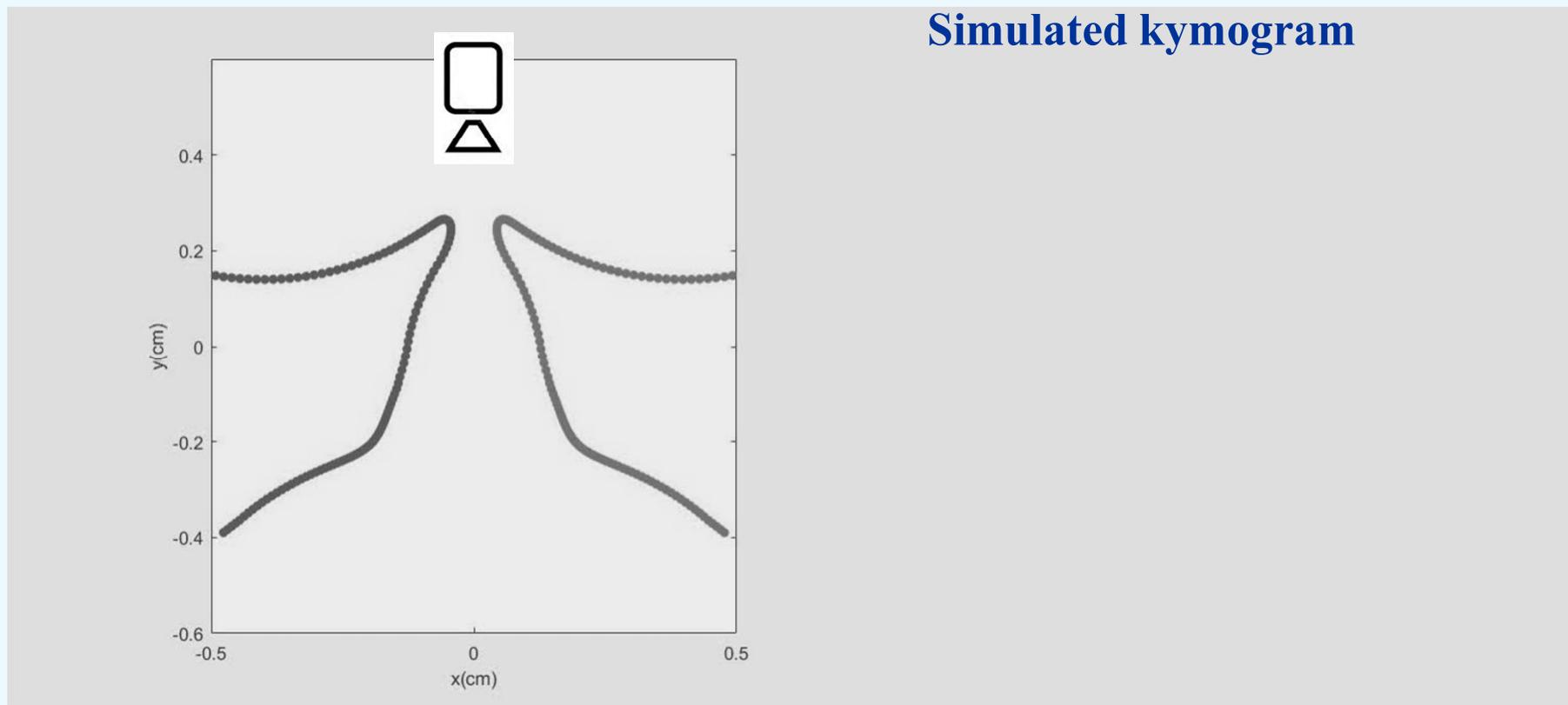
MUCOSAL WAVE MODEL:



Kumar & Švec (2019):

Waves travelling around the vocal fold surface upwards and then laterally.

Simulation of vocal fold kymograms



Kumar SP and Svec JG. Kinematic model for simulating mucosal wave phenomena on vocal folds. Biomed Signal Process Control 49: 328-337, 2019.



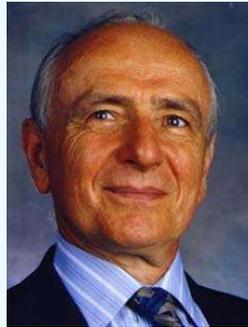
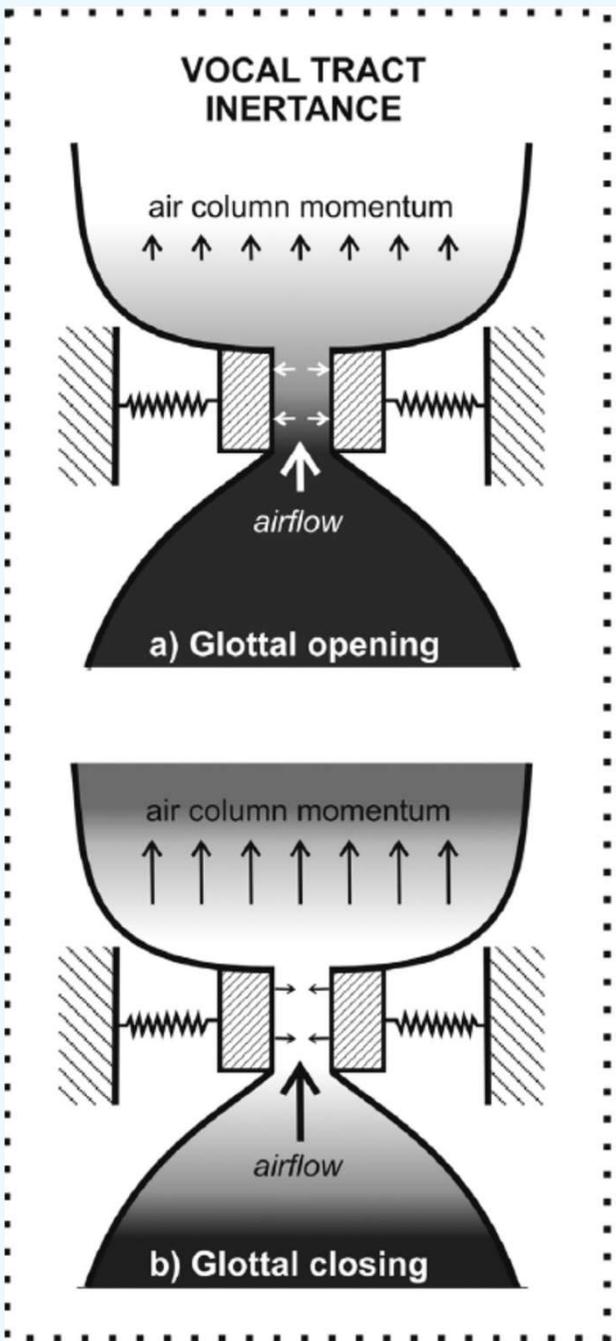
Titze, I. R. (1988). The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds. *J. Acoust. Soc. Am*, 83(4), 1536-1552.

Basic condition for VF self-oscillations:

Intraglottal pressure (in glottis, between the vocal folds) must be greater when opening than when closing (**push-pull effect**)

Can be achieved by:

- 1) Opening the glottis from below to top (vertical phase differences, ..mucosal wave “)
- 2) Delaying the glottal flow due to vocal tract inertance



**Rothenberg, M., & Zahorian, S. (1977).
Nonlinear Inverse Filtering Technique for
Estimating Glottal-Area Waveform. *J. Acoust.
Soc. Am.*, 61(4), 1063-1071.**

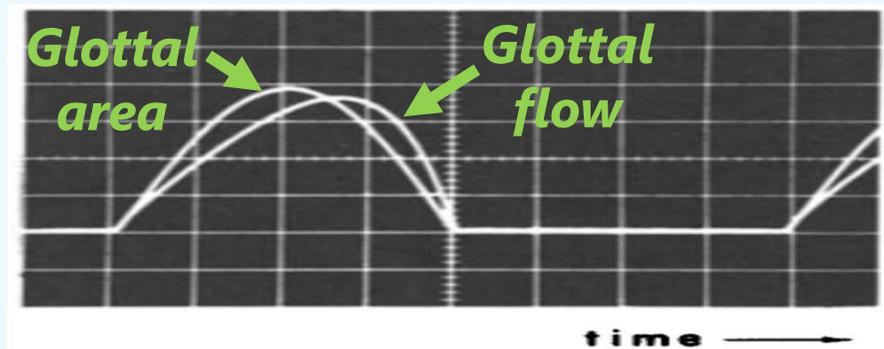
2) Push-Pull Due To Vocal Tract Inertance:

Mass of air in vocal tract delays the glottal flow behind glottal area

Glottal airflow starts more slowly and ends more abruptly than than glottal area – „waveform skewing“, large MFDR – **stronger sound excitation**

Also causes the intraglottal pressure to be larger during opening than during closing – **push-pull effect**

Works well when f_o is below F_1 – otherwise causes problems



MEAD SHRUTÍ – SOUČASNÉ ZNALOSTI

- 1) Glotis se otevírá zdola, protože subglotický tlak je vyšší než supraglotický tlak
- 2) Glotis získává konvergentní tvar
- 3) Konvergentní glotis způsobuje vysoký intraglotický tlak, který tlačí hlasivky od sebe (push effect)
- 4) Elasticita hlasivek obrací pohyb z otevírání na zavírání (čím jsou hlasivky tužší, tím dříve se pohyb obrátí a tím vyšší je f_0 – základní frekvence)
- 5) Glotis získává divergentní tvar
- 6) Divergentní glotis snižuje intraglotický tlak, což podpoří uzavírání glotis (pull effect)
- 7) Elasticita tkání obrací pohyb hlasivek zpět k otevírání
- 8=1) Glotis se opět otevírá zdola a cyklus se opakuje

Modulace průtoku vzduchu štěrbinou glotis v důsledku kmitání hlasivek působí jako zdroj zvuku

Excitované rezonance subglotického a supraglotického traktu mohou měnit push-pull efekt působící na hlasivky, čímž ovlivňují amplitudu a frekvenci jejich kmitání (nelineární hlasové děje).

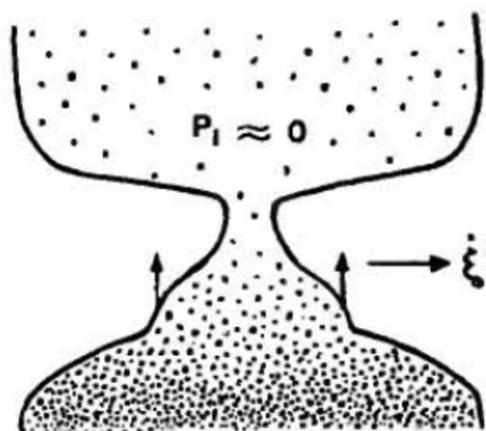
MEAD SUMMARY – CURRENT KNOWLEDGE

- 1) Glottis opens from below due to subglottal pressure being higher than supraglottal pressure
- 2) Glottis takes convergent shape
- 3) Convergent glottis causes large intraglottal pressure - pushing vocal folds apart (push effect)
- 4) Vocal fold elasticity reverses the opening to closing (the stiffer the folds the sooner the closing and the higher the f_0)
- 5) Glottis takes divergent shape
- 6) Divergent glottis lowers intraglottal pressure – pulling vocal folds together (pull effect)
- 7) Tissue elasticity reverses the vocal fold movement to opening
- 8=1) Glottis opens from below and the cycle repeats

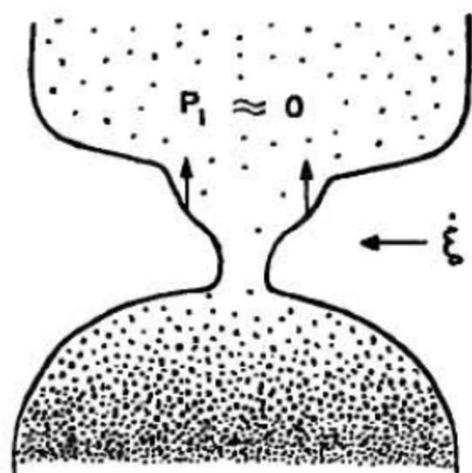
Glottal airflow modulation due to VF oscillations acts as the sound source

Excited subglottal and supraglottal resonances can alter the push-pull effect on the vocal folds – influence on vocal fold vibration amplitude and frequency (nonlinear voice phenomena)

Titze, I. R. (1988). The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds. *J. Acoust. Soc. Am*, 83(4), 1536-1552.



(a) GLOTTAL OPENING



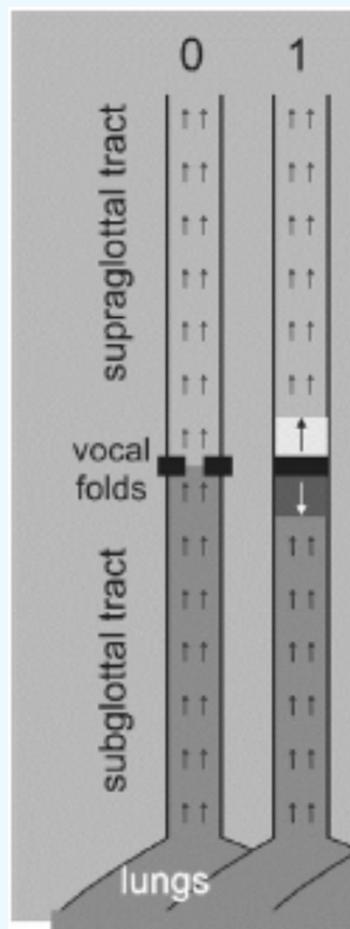
(b) GLOTTAL CLOSING

Vertical phase differences (delayed motion of the upper margin behind the lower margin, mucosal wave)

Convergent shape during glottal opening – increases the influence of subglottal pressure pushing the vocal folds away

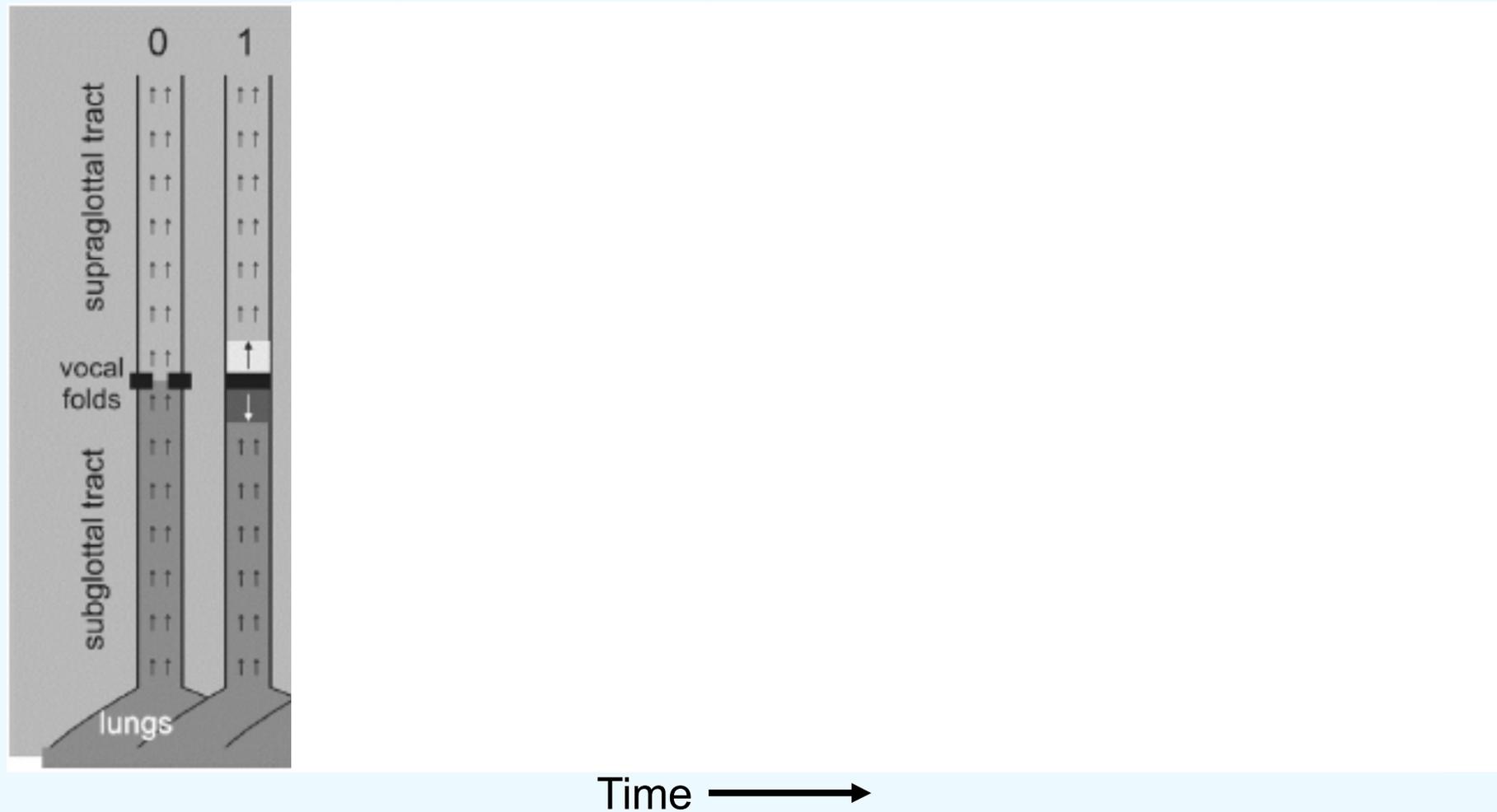
Divergent shape during glottal closing – decreases the influence of subglottal pressure – allows the vocal folds to close

EXCITACE AKUSTICKÝCH REZONANCÍ POD A NAD HLASIVKAMI UZAVŘENÍM GLOTIS – VZNIK HLASU



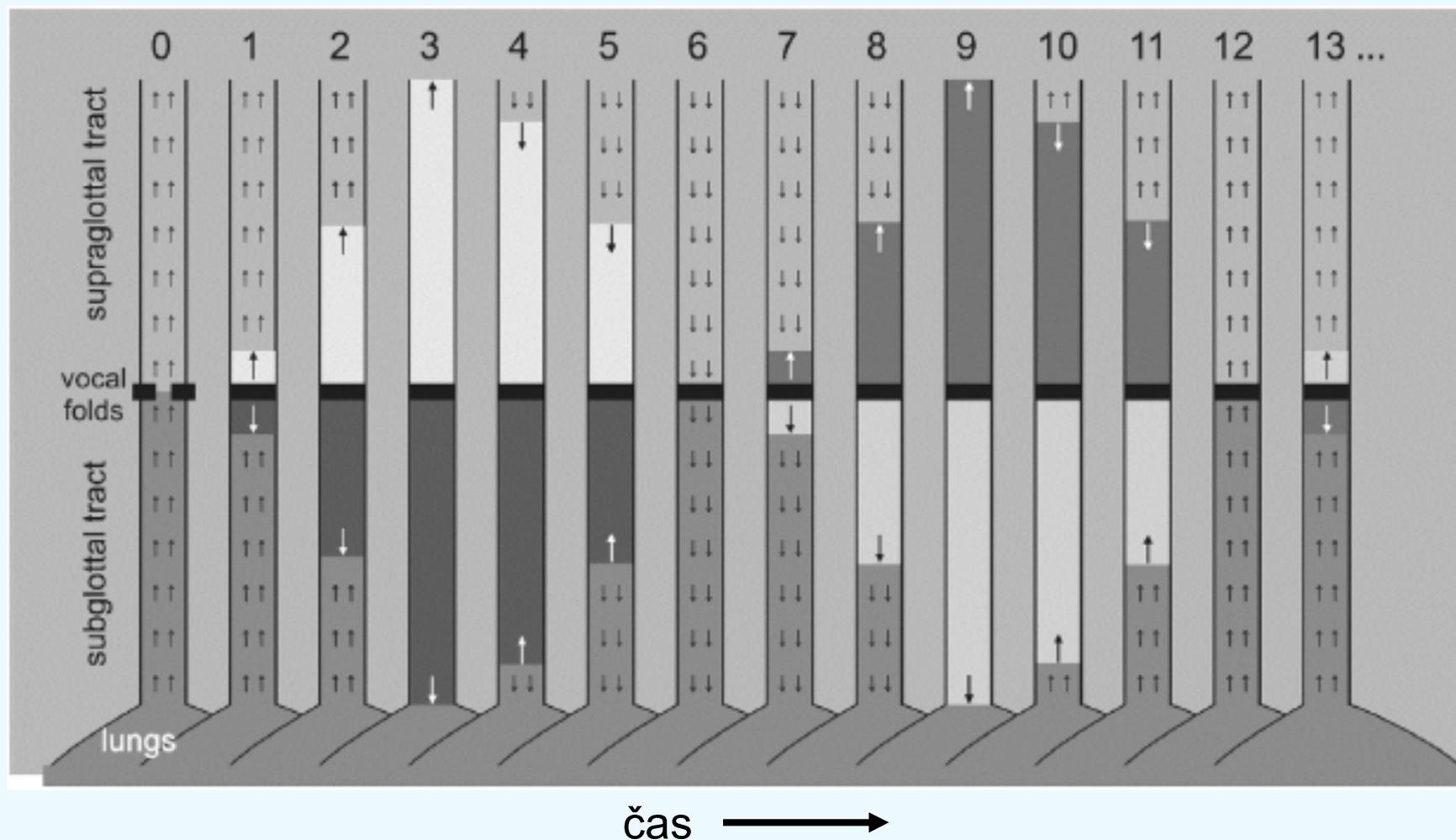
čas →

ABRUPT GLOTTAL CLOSURE: EXCITATION OF ACOUSTIC RESONANCES ABOVE AND BELOW GLOTTIS – VOICE PRODUCTION



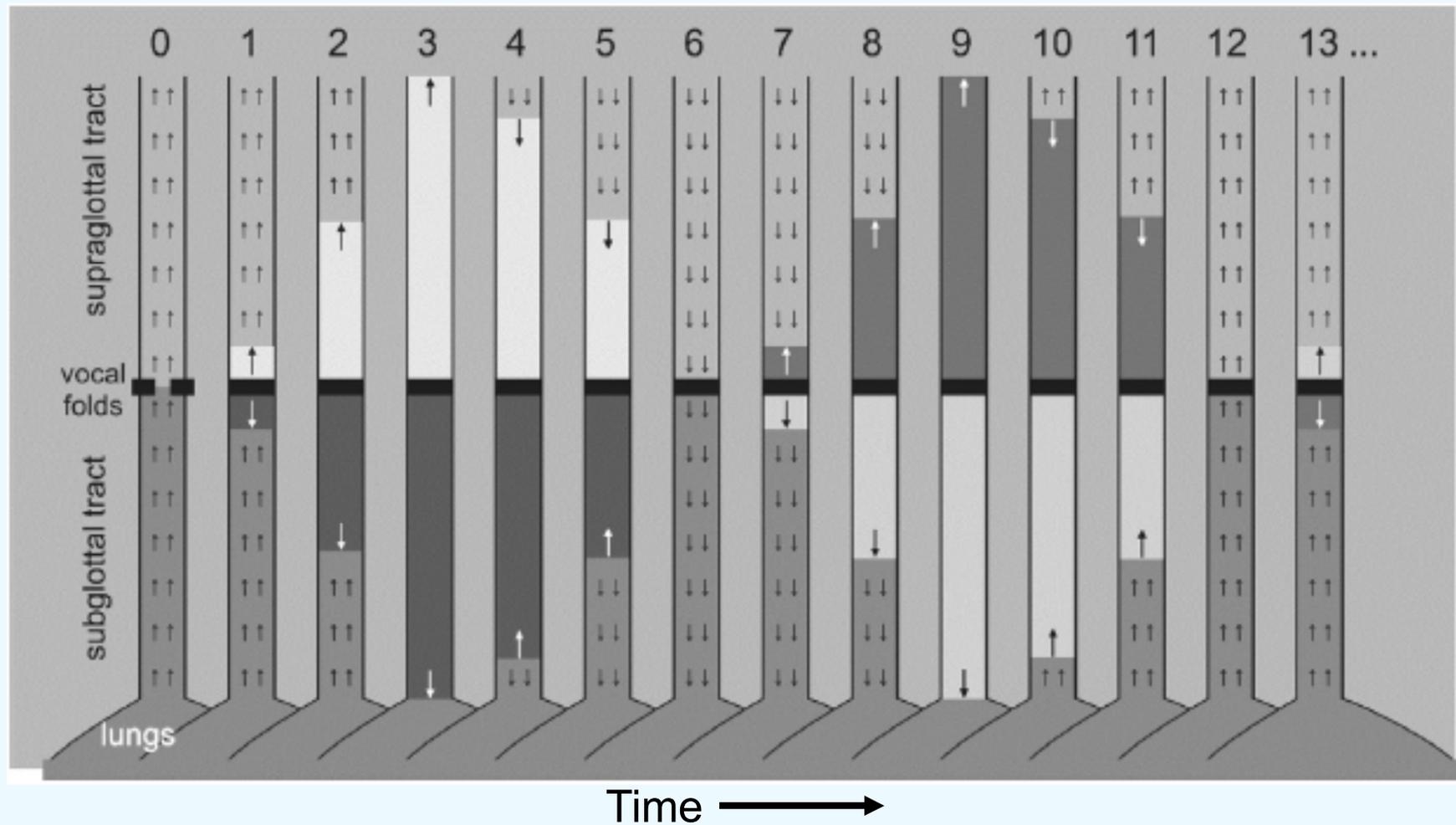
Švec, Schutte, Chen, Titze (2023). Integrative Insights into MEAD. *Journal of Voice*
doi:10.1016/j.jvoice.2021.01.023

EXCITACE AKUSTICKÝCH REZONANCÍ POD A NAD HLASIVKAMI UZAVŘENÍM GLOTIS – VZNIK HLASU



Švec, Schutte, Chen, Titze (2023). Integrative Insights into MEAD. *Journal of Voice*
doi:10.1016/j.jvoice.2021.01.023

ABRUPT GLOTTAL CLOSURE: EXCITATION OF ACOUSTIC RESONANCES ABOVE AND BELOW GLOTTIS – VOICE PRODUCTION

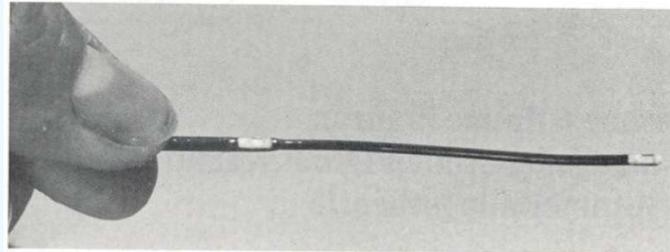


Švec, Schutte, Chen, Titze (2023). Integrative Insights into MEAD. *Journal of Voice*
doi:10.1016/j.jvoice.2021.01.023

TLAKY VZDUCHU A KMITÁNÍ HLASIVEK

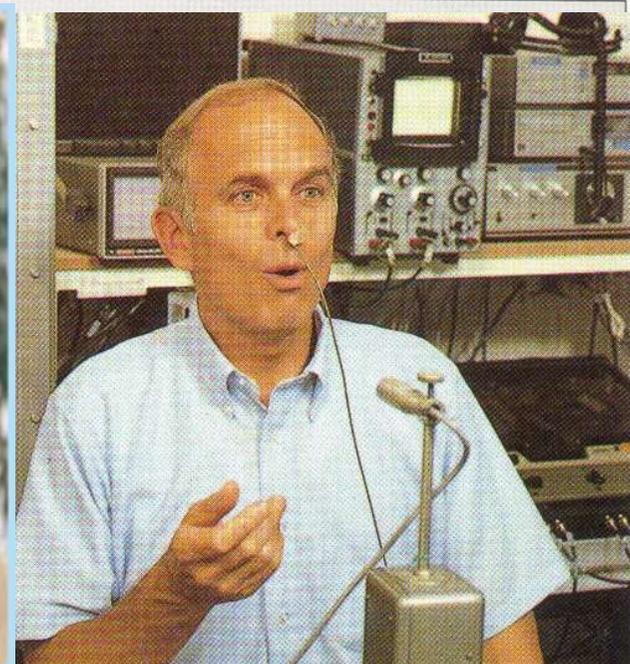
Měření in vivo (Miller & Schutte, 1984):

- Tenký katetr se senzory tlaku umístěn do hrtanu tak, aby měřil tlak vzduchu pod a nad hlasivkami při fonaci.
- Kmitání hlasivek monitorováno pomocí elektroglografie (EGG)
- Unikátní data, která nemá téměř žádné pracoviště na světě k dispozici. Nyní na UPOL(!).



Schutte & Miller (1988)

Abb. 1. Katheter mit zwei Miniaturdruckwandlern.



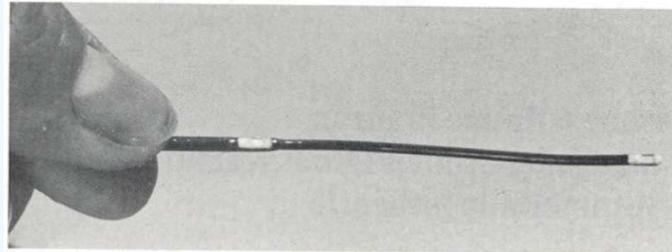
Miller DG and Schutte HK. Characteristic patterns of sub- and supraglottal pressure variations within the glottal cycle. In: Transcripts of the XIIIth symposium: Care of the professional voice, New York, 1984, edited by Van Lawrence L. New York, NY: The Voice Foundation, 1985.

Schutte HK and Miller DG. Resonanzspiele der Gesangsstimme in ihren Beziehungen zu supra- und subglottalen Druckverläufen: Konsequenzen für die Stimmbildungstheorie. Folia Phoniatri (Basel) 40: 65-73, 1988.

VOCAL FOLD SELF-OSCILLATIONS

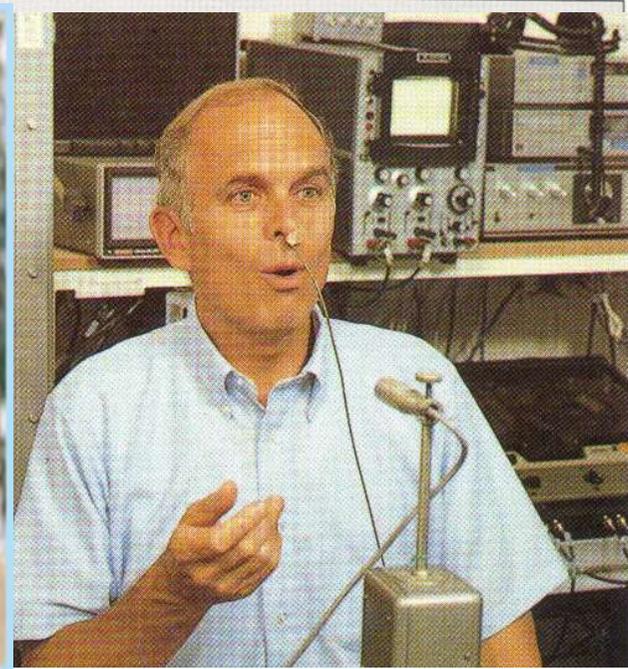
Measurements in vivo (Miller & Schutte, 1984):

- Pressure sensor was positioned on a thin catheter and placed into the subglottal space through the cartilaginous glottis. (Simultaneously there was also a sensor above the vocal folds). These sensors were used to measure the sub and supraglottal pressures during vocal fold self-oscillations. Glottal opening and closing was monitored through electroglottography (EGG).



Schutte & Miller (1988)

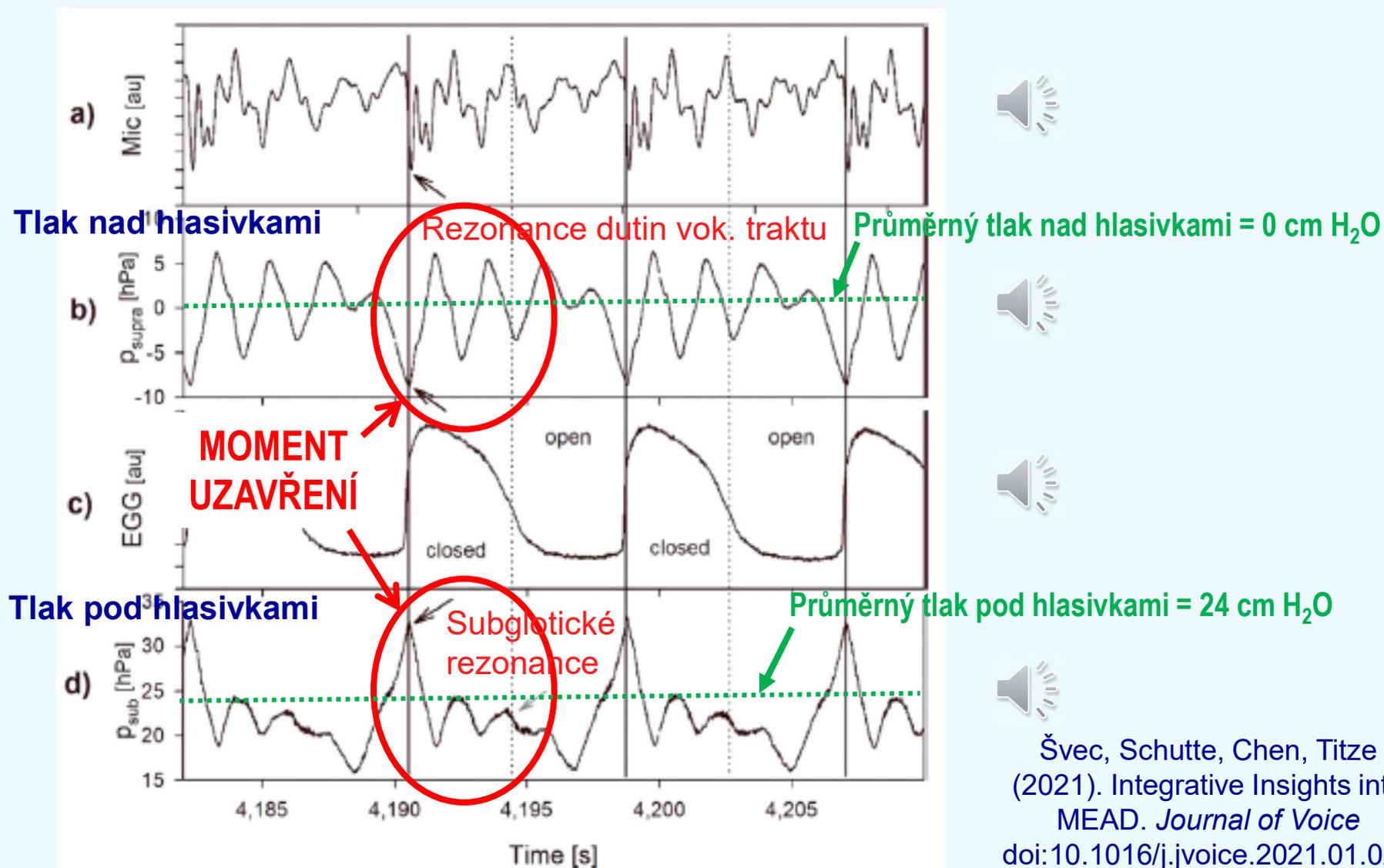
Abb. 1. Katheter mit zwei Miniaturdruckwandlern.



Miller DG and Schutte HK. Characteristic patterns of sub- and supraglottal pressure variations within the glottal cycle. In: Transcripts of the XIIIth symposium: Care of the professional voice, New York, 1984, edited by Van Lawrence L. New York, NY: The Voice Foundation, 1985.

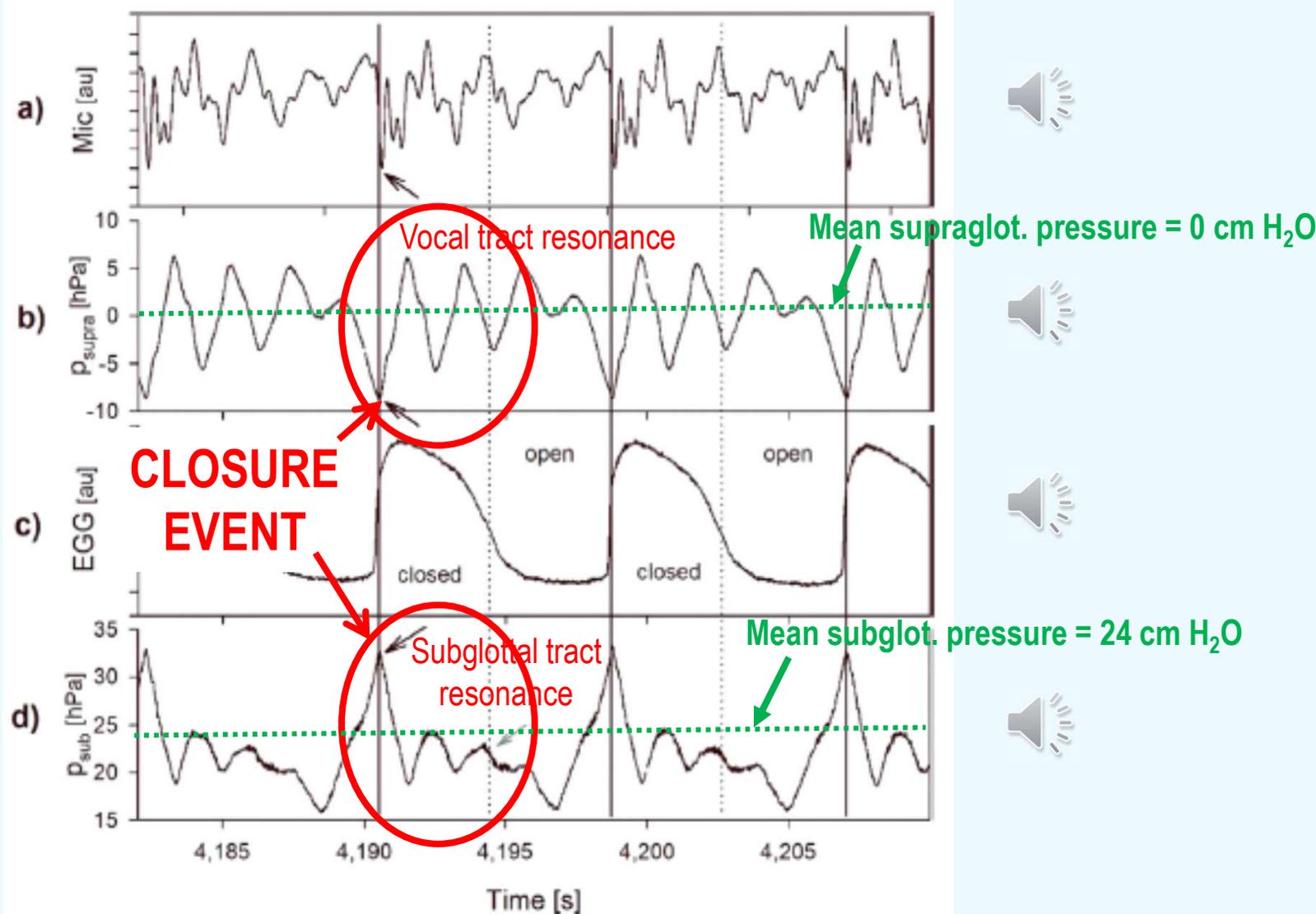
Schutte HK and Miller DG. Resonanzspiele der Gesangsstimme in ihren Beziehungen zu supra- und subglottalen Druckverläufen: Konsequenzen für die Stimmbildungstheorie. Folia Phoniatr (Basel) 40: 65-73, 1988.

EXCITACE AKUSTICKÝCH REZONANCÍ POD A NAD HLASIVKAMI UZAVŘENÍM GLOTIS



Švec, Schutte, Chen, Titze
(2021). Integrative Insights into
MEAD. *Journal of Voice*
doi:10.1016/j.jvoice.2021.01.023

PRESSURES AND SOUND BELOW AND ABOVE THE VOCAL FOLDS



MODELY HLASIVEK

(vycházející z myoelasticko-aerodynamické teorie)

Při použití modelů hlasivek platí stejný problém jako u kteréhokoli jiného modelu fyzikálního či fyziologického děje:

- 1) Model musí být dostatečně jednoduchý, tak aby ho bylo možné matematicko-fyzikálně popsat a aby jeho použití bylo užitečné pro konceptualizaci a předpovídání vývoje zkoumaného děje.
- 2) Jeho chování musí odpovídat chování reálných hlasivek.

VOCAL FOLD MODELS

(based on myoelastic-aerodynamic theory)

When using vocal fold models, there are the following issues (as they are in any other models of physical or physiological phenomena):

- 1) The model must be simple enough, so that it can be described by physics and mathematics and so that its use is useful for conceptualizing and predicting investigated phenomena.
- 2) The model behaviour must correspond to that of the real vocal folds.

MODELY HLASIVEK

Kmitající díky proudu vzduchu [self-sustained oscillations], vycházející z myoelasticko-aerodynamické teorie

PREPARÁTY HRTANU:

(A Ferrein 1741-46, J. Müller 1837-9, L.Réthy 1896, M. Sovák 1945, Jw. van den Berg 1959-68, T. Baer 1975, N.Isshiki 1978-82, a další)

Nejfyziologičtější fyzické modely hlasivek, umožňující nejpřesněji studovat chování hlasivek.

Umožňují sledování chování hlasivek za stabilních podmínek

Vytýkané nedostatky – nefunkčnost TA svalu, odlišnost vlastností mrvých tkání od živých

Využíváno pro sledování závislosti kmitání hlasivek na jednotlivých kontrolních parametrech, zejména:

- Subglotický tlak
- Průtočné množství vzduchu
- Prodloužení hlasivek
- Míra addukce hlasivek
- Pravo-levá asymetrie
- Akustické rezonance subglotického a supraglotického prostoru
- atd.

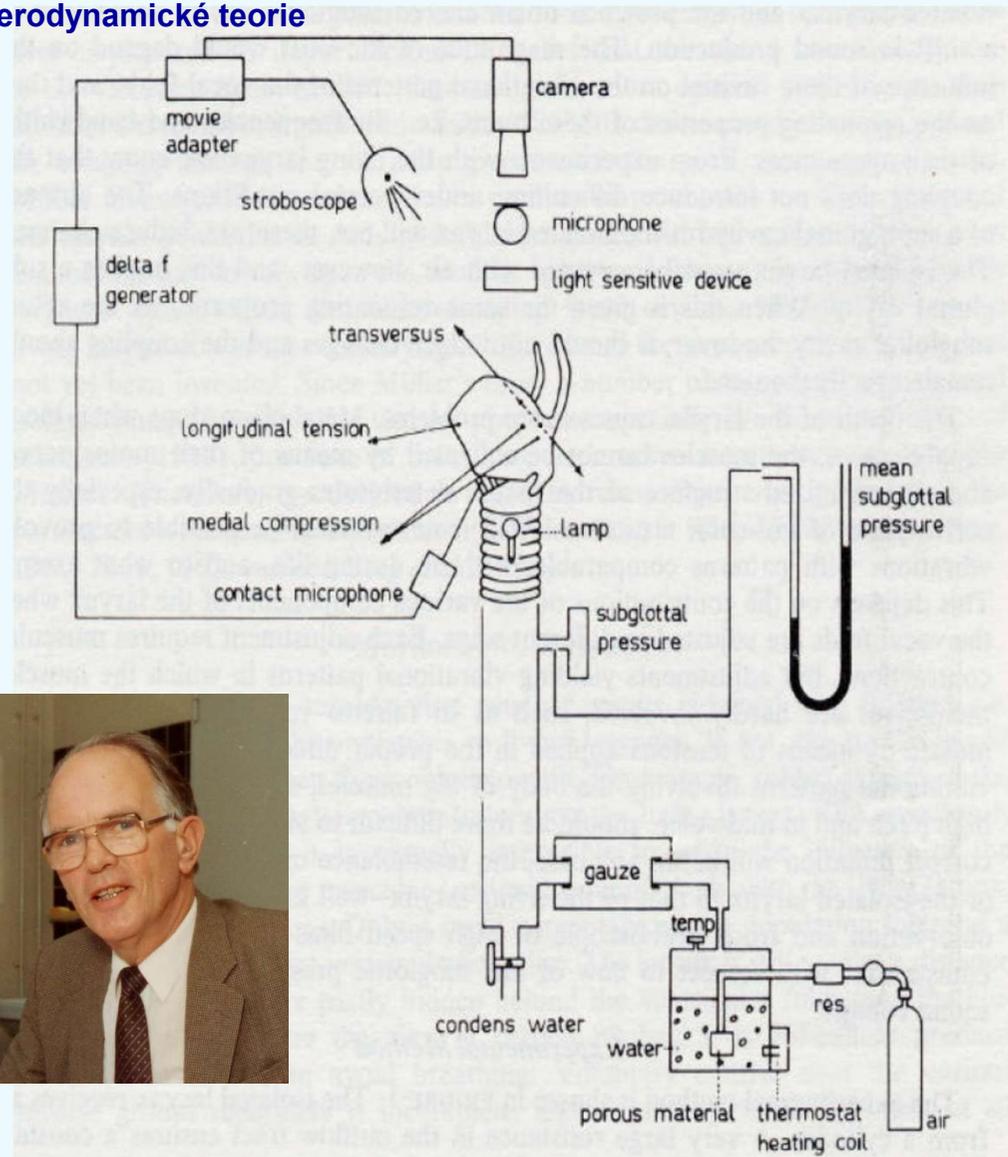


FIGURE 1. Scheme of the arrangement used for experiments with isolated larynges.

Jw. van den Berg (1959, 1960, 1968)

VOCAL FOLD MODELS

showing self-sustained oscillations excited by airflow, based on myoelastic-aerodynamic theory

EXCISED LARYNGES:

(A Ferrein 1741-46, J. Müller 1837-9, L.Réthy 1896, M. Sovák 1945, Jw. van den Berg 1959-68, T. Baer 1975, N.Isshiki 1978-82, etc)

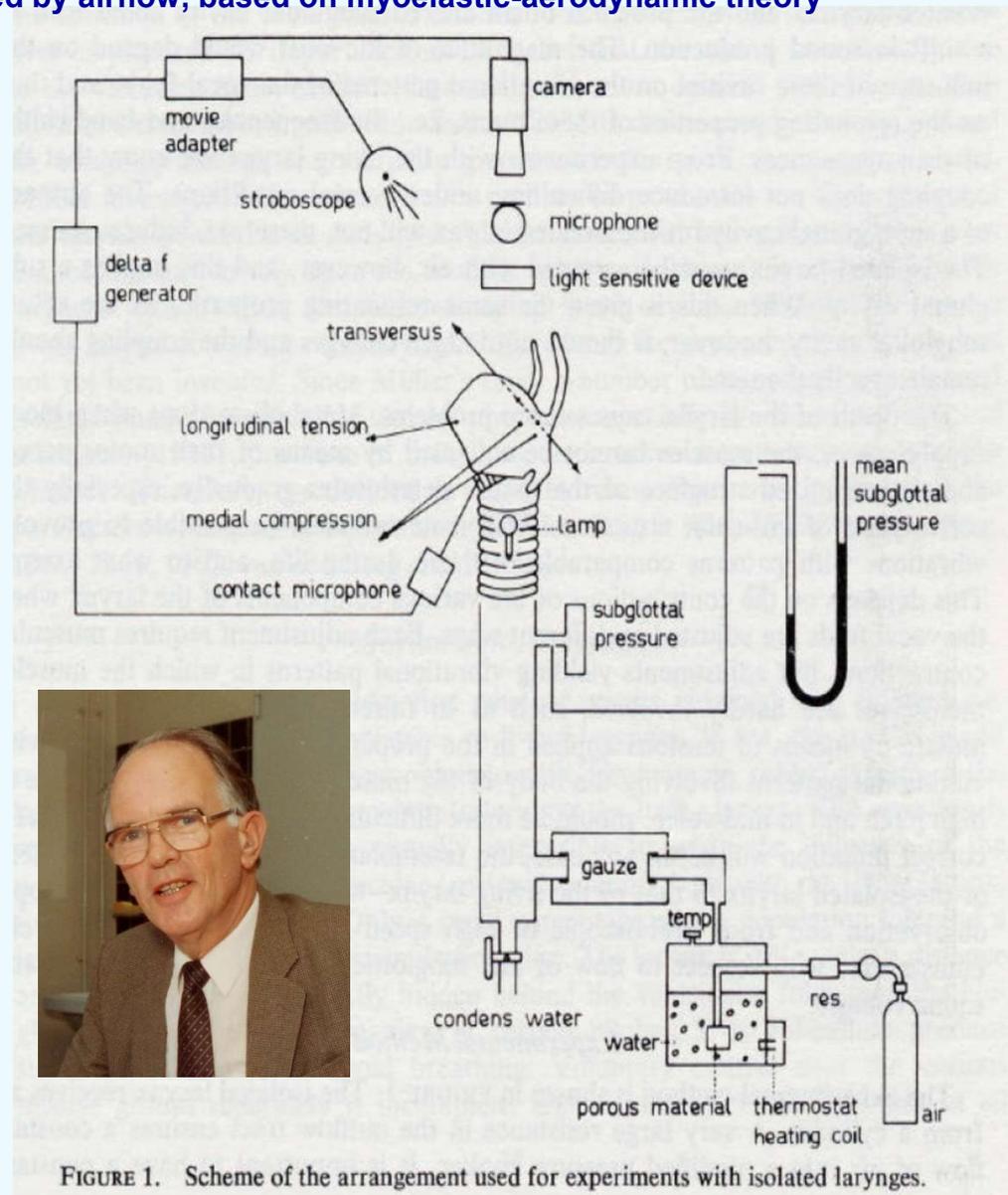
The most physiologic vocal fold models allowing the most accurate observations of the vocal fold vibrations.

They allow investigating vocal fold behavior at stable, controlled conditions

Drawbacks – no activity of TA muscle, differences of the dead tissues from the living ones.

Used to investigate the vocal fold vibration dependencies on individual control parameters, such as:

- Subglottal pressure
- Airflow
- Vocal fold elongation
- Degree of vocal fold adduction
- Left-right asymmetry
- Acoustic resonances of the subglottal and supraglottal tract
- etc.



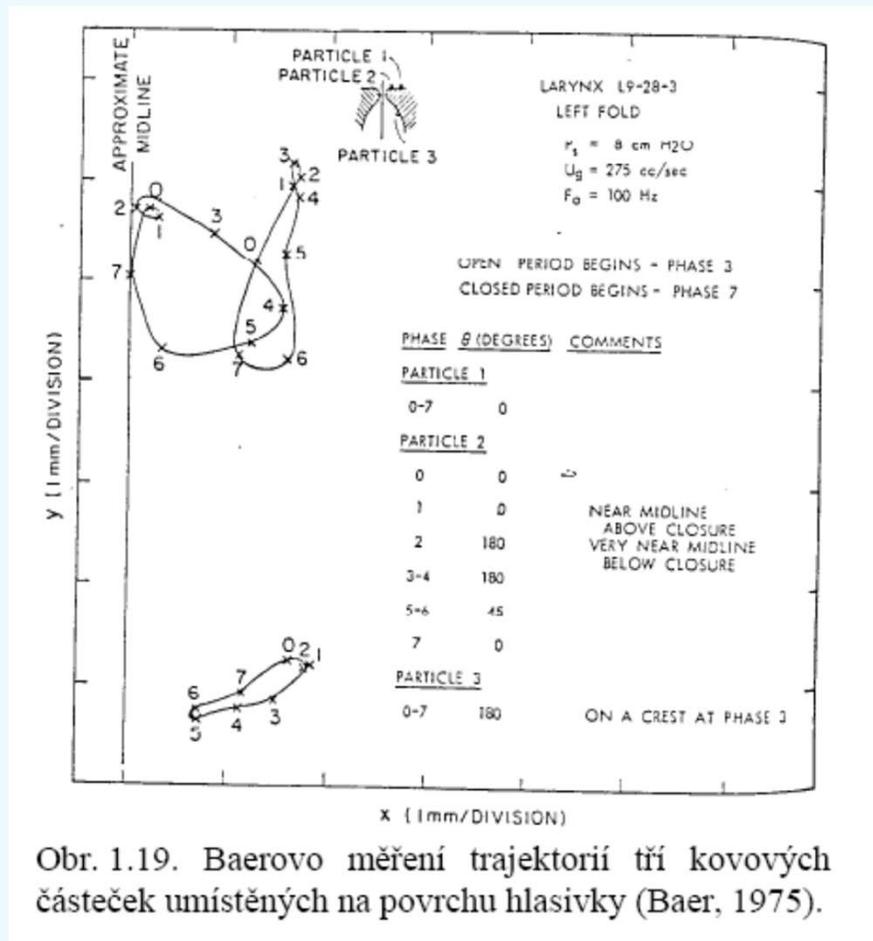
Jw. van den Berg (1959, 1960, 1968)

Pozorování a interpretace kmitů hlasivek na preparátech hrtanů

Měření kovových částecek umístěných na povrchu hlasivky:

Pozorování trajektorie jednotlivých bodů na hlasivkách prozradilo, že hlasivka koná současně horizontální i vertikální pohyby.

Trajektorie jsou přibližně eliptické; v případě bodů na horních částech hlasivky se objevují sekundární smyčky (Baer, 1975).



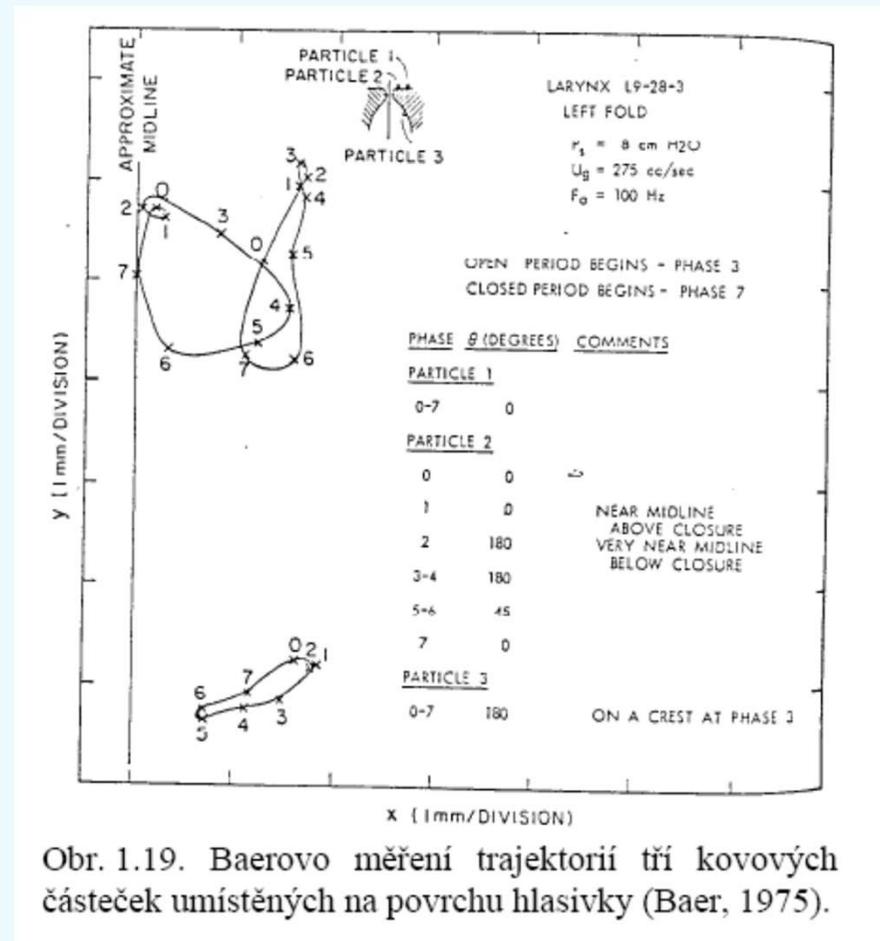
Baer T. Investigation of phonation using excised larynxes. (Doctoral dissertation). Cambridge, Mass: Massachusetts Institute of Technology, 1975.

Investigation and interpretation of vocal fold vibrations in excised larynges:

Measurements of lead particles placed at vocal fold surface:

Investigations of the trajectories of the particles on the vocal folds revealed that the vocal fold performs horizontal and vertical movements simultaneously.

The trajectories are approximately elliptical; in case of the particles placed close to the upper vocal fold margin, secondary loops could be observed (Baer, 1975).



Obr. 1.19. Baerovo měření trajektorií tří kovových částíček umístěných na povrchu hlasivky (Baer, 1975).

Baer T. Investigation of phonation using excised larynges. (Doctoral dissertation). Cambridge, Mass: Massachusetts Institute of Technology, 1975.

Vocal Fold Medial Surface Imaging

High-speed digital imaging of the medial surface of the vocal folds

David A. Berry^{a)}

*Department of Biomedical Engineering and Dep
The University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242*

Douglas W. Montequin

Department of Speech Pathology and Audiology

Niro Tayama

Department of Otolaryngology, University of To.

J. Acoust. Soc. Am., Vol. 110, No. 5, Pt. 1, Nov. 2001



David A. Berry

Excised canine larynges

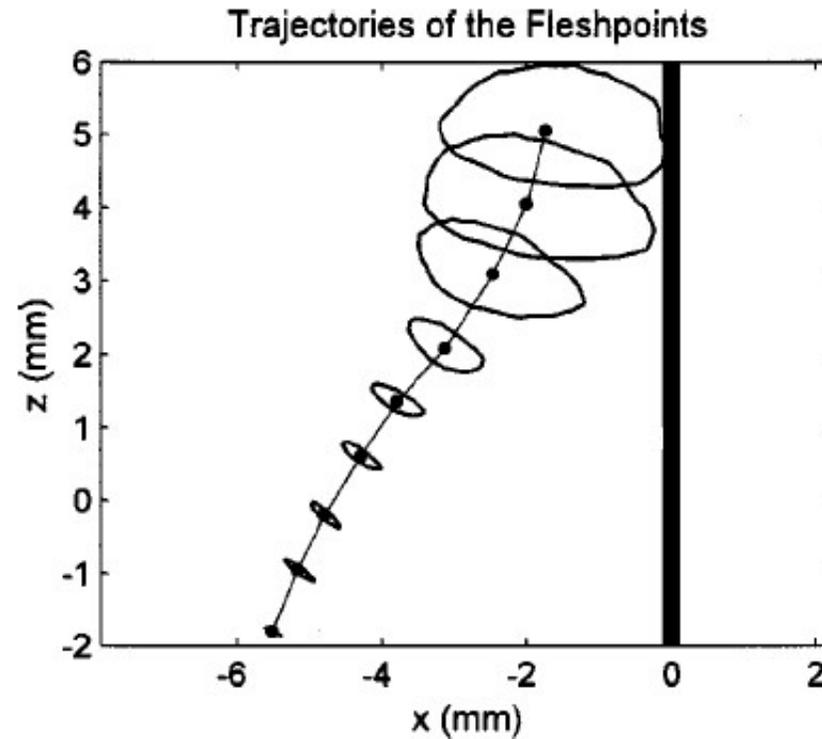


FIG. 5. An anterior view of the left vocal fold. The ellipses indicate the trajectories of vocal fold fleshpoints over one cycle of vibration, with physical dimensions labeled. All the fleshpoints travel in counter-clockwise orbits. The dark vertical line indicates the glass plate in the hemilarynx set up. The bolded dots, connected by a solid line, indicate the dynamic equilibria of the fleshpoints.

Pozorování a interpretace kmitů hlasivek

Komplexní trajektorie jsou vysvětlovány složením svou typů pohybů:

- 1) Přibližně eliptickým pohybem hlasivek a
- 2) Postupem slizničních vln směrem od spodu po povrchu hlasivky.



Investigation and interpretation of vocal fold vibrations

The complex trajectories can, in principle, be explained by combining two types of motion:

- 1) Approximately elliptic vocal fold motion and
- 2) Mucosal waves travelling from the bottom to the top of the vocal folds.



SLIZNIČNÍ VLNY NA HLASIVKÁCH

Vlny se šíří od spodního okraje
hlasivek směrem nahoru po obvodu
hlasivek

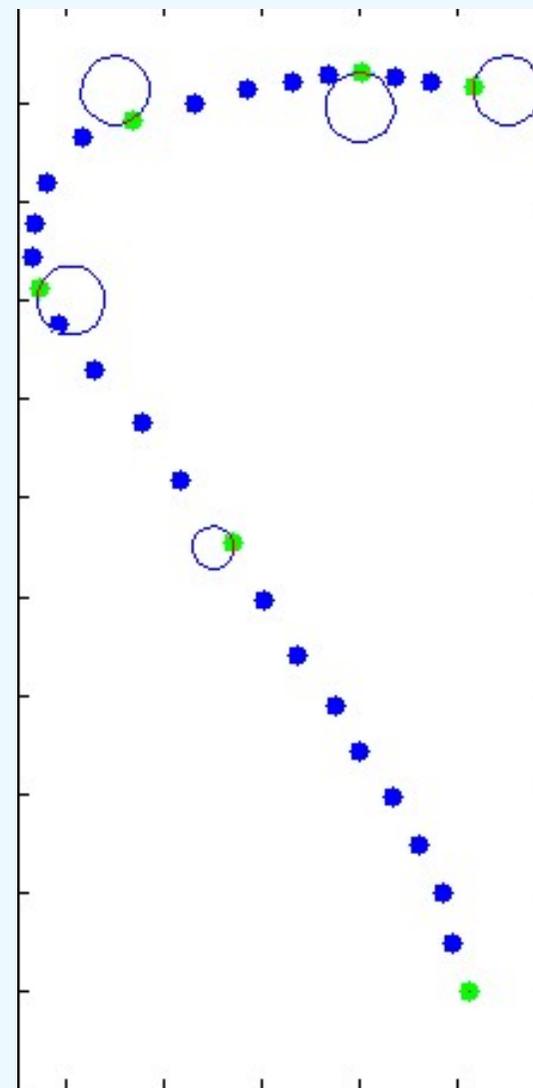
(Rethi, 1896; Farnsworth, 1940; Smith, 1954;
Moore & von Leden, 1958; Perello, 1964;
Hiroto, 1968; Hirano, 1974; Baer, 1975;
Matsushita, 1975; Saito, 1981; Yumoto
1989-98, Berry et al 2001, Döllinger et al
2004, Boessendecker et al 2007)



David A. Berry

ILUSTRACE

vytvořena přibližně
na základě trajektorií
změřených Berry et al (2001)



MUCOSAL WAVES ON THE VOCAL FOLDS

The waves travel from the bottom of the vocal folds upwards and across the upper vocal fold surface

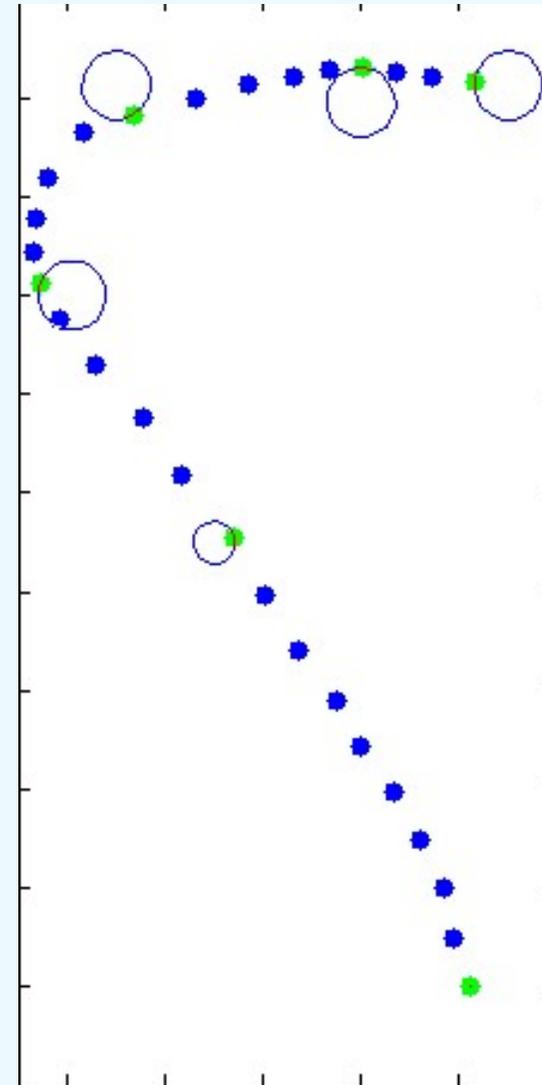
(Rethi, 1896; Farnsworth, 1940; Smith, 1954; Moore & von Leden, 1958; Perello, 1964; Hiroto, 1968; Hirano, 1974; Baer, 1975; Matsushita, 1975; Saito, 1981; Yumoto 1989-98, Berry et al 2001, Döllinger et al 2004, Boessendecker et al 2007)



David A. Berry

ILLUSTRATION

created by Švec (2007) based on the trajectories measured by Berry et al (2001)

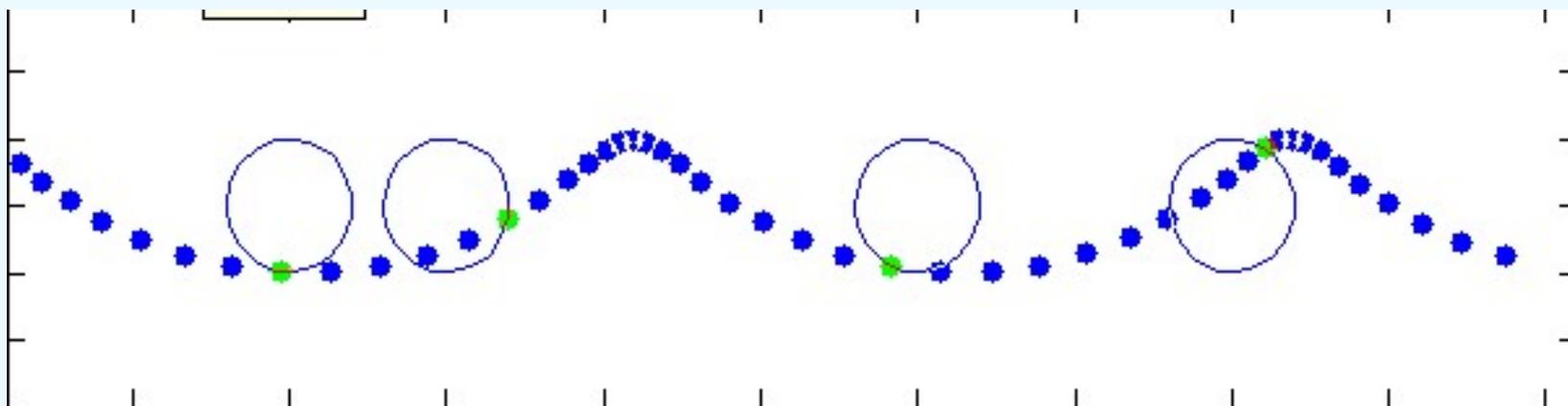


ANALOGIE MEZI SLIZNIČNÍMI VLNAMI A VLNAMI NA VODĚ

R. S. McGowan (1990). Haskins Laboratories Status Report on Speech
Research 101/102: 243-249.

**Epitel + Reinkeův prostor (povrchová vrstva laminy propria) \leftrightarrow
podobnost s vodní hladinou a vodou**

Eliptické trajektorie + fázové rozdíly \rightarrow postupná vlna

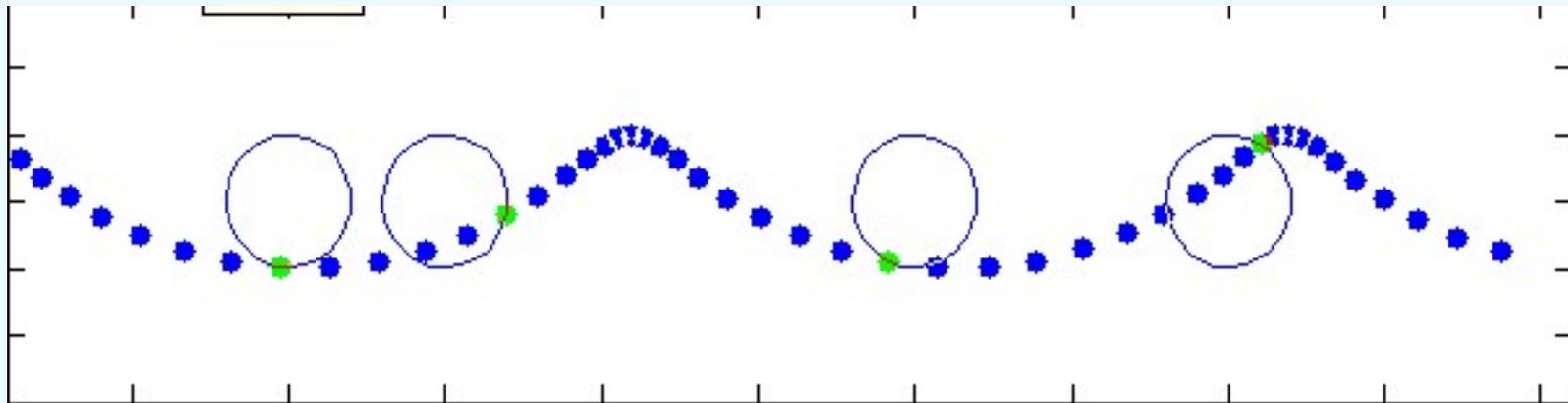


ANALOGY OF THE MUCOSAL WAVES WITH THE WAVES ON WATER

R. S. McGowan (1990). Haskins Laboratories Status Report on Speech Research 101/102: 243-249.

Epithelium + Reinke's space (superficial layer of lamina propria) \leftrightarrow resembling water and water surface

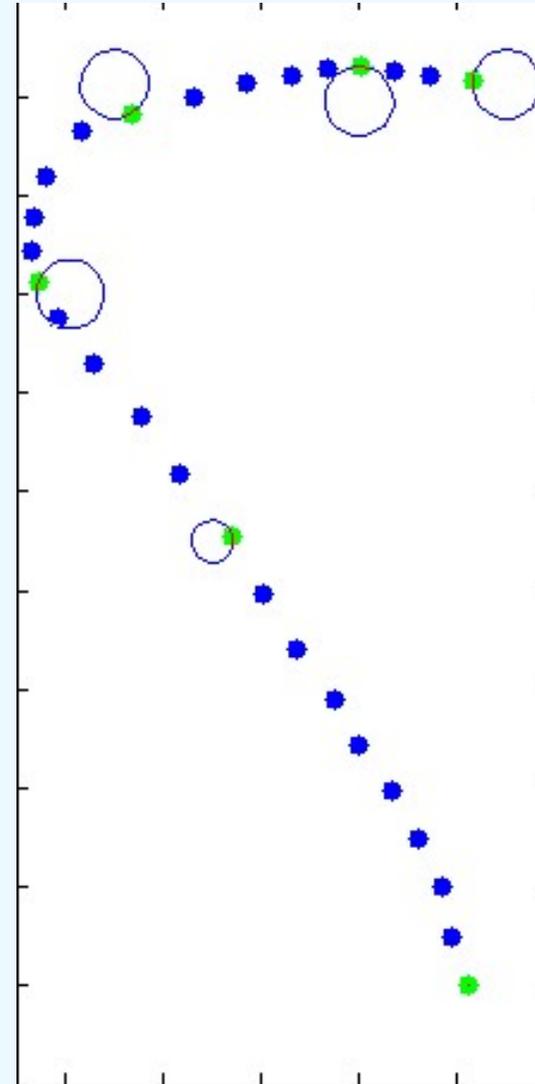
Elliptic trajectories + phase differences \rightarrow travelling wave



SLIZNIČNÍ VLNY NA HLASIVKÁCH

DVĚ SLOŽKY SLIZNIČNÍCH
VLN:

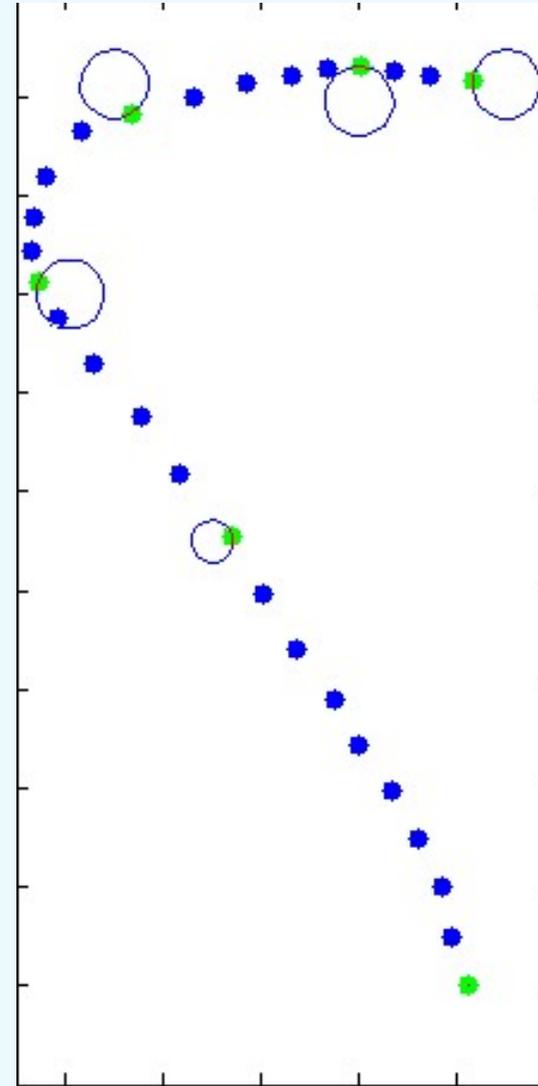
- a) Fázový rozdíl v pohybu
spodní a horní části hlasivek
(aktivně buzen prouděním
vzduchu)
- b) Vlny postupující po horním
povrchu hlasivek do strany
(pasivní pokračování šíření
vln)



VOCAL FOLD MUCOSAL WAVES

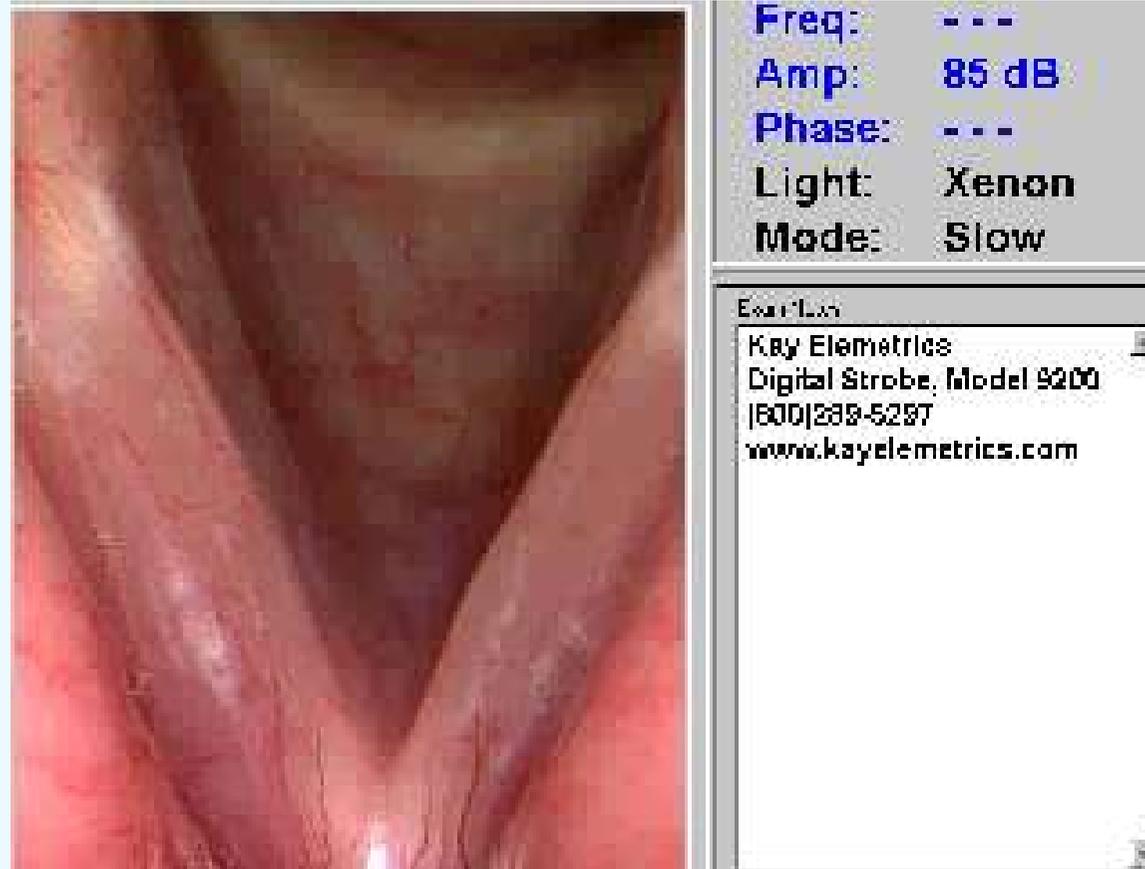
TWO COMPONENTS OF THE MUCOSAL WAVES:

- a) Phase differences between the lower and upper vocal fold margins (actively driven by airflow)
- b) Waves travelling across the upper vocal fold surface to the side (passive continuation of the waves)



Vizualizace: LARYNGO STROBOSKOPIE

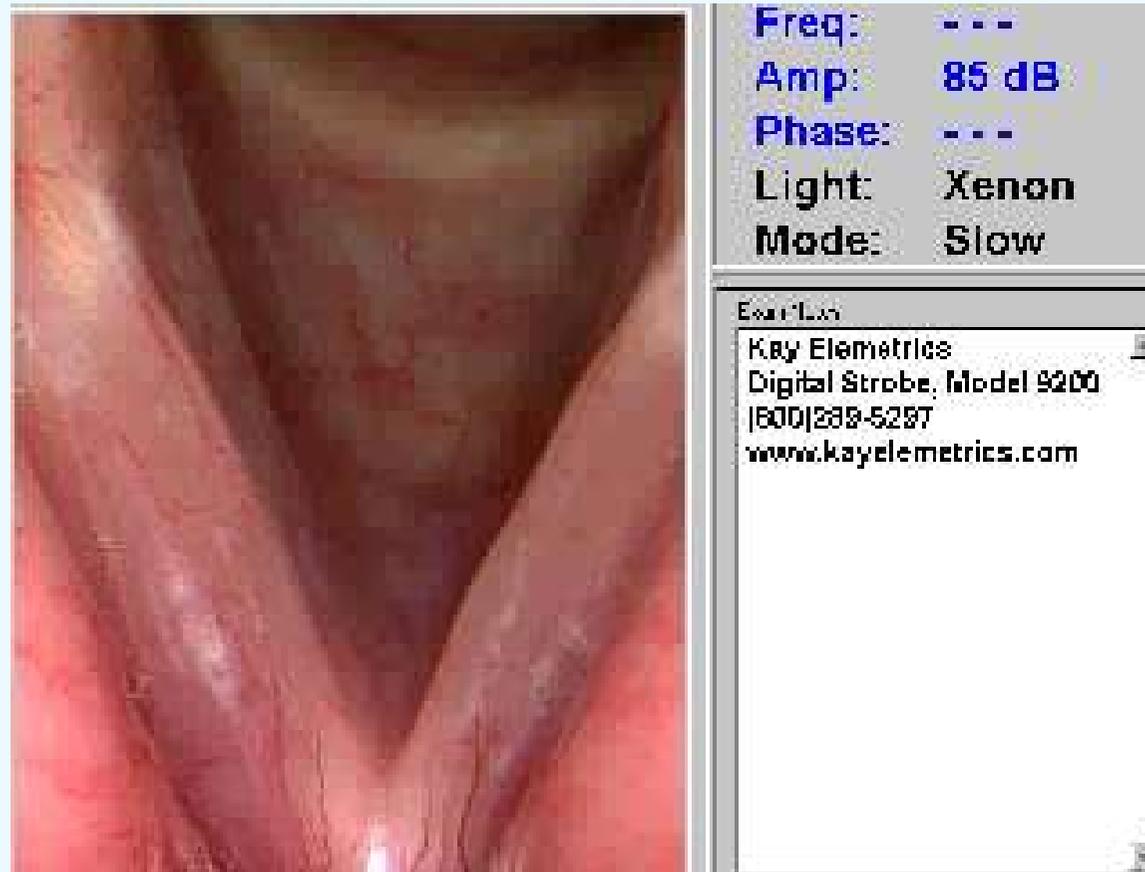
Všimni si vertikálních rozdílů v pohybech hlasivek a šíření slizničních vln po horním povrchu laterálně



Kay Elemetrics Demo examples on Stroboscope

Vizualization: LARYNGOSTROBOSCOPY

Notice the vertical phase differences and the propagation of the waves laterally on the upper vocal fold surface



Kay Elemetrics Demo examples on Stroboscope

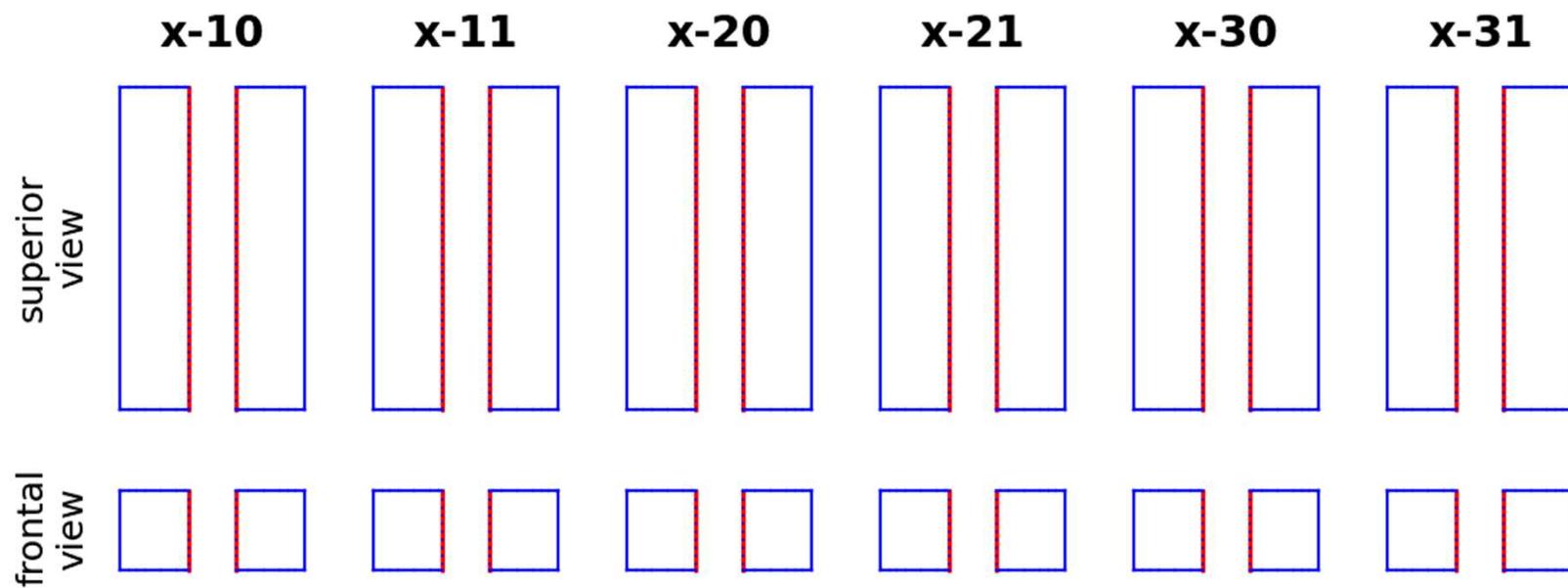
Módy kmitání hlasivek

Obecně, každé mechanické kmitání struktury lze rozložit do tzv. vlastních módů kmitání.

Tyto módy mají charakteristický tvar a frekvenci kmitání.

Kombinací módů lze vysvětlit i velmi složité kmitání hlasivek u chraptivosti.

Čím složitější je kmitání hlasivek, tím větší počet módů je excitován.



(C) 2013 www.christian-herbst.org

Animations downloaded from <https://www.christian-herbst.org/media/>

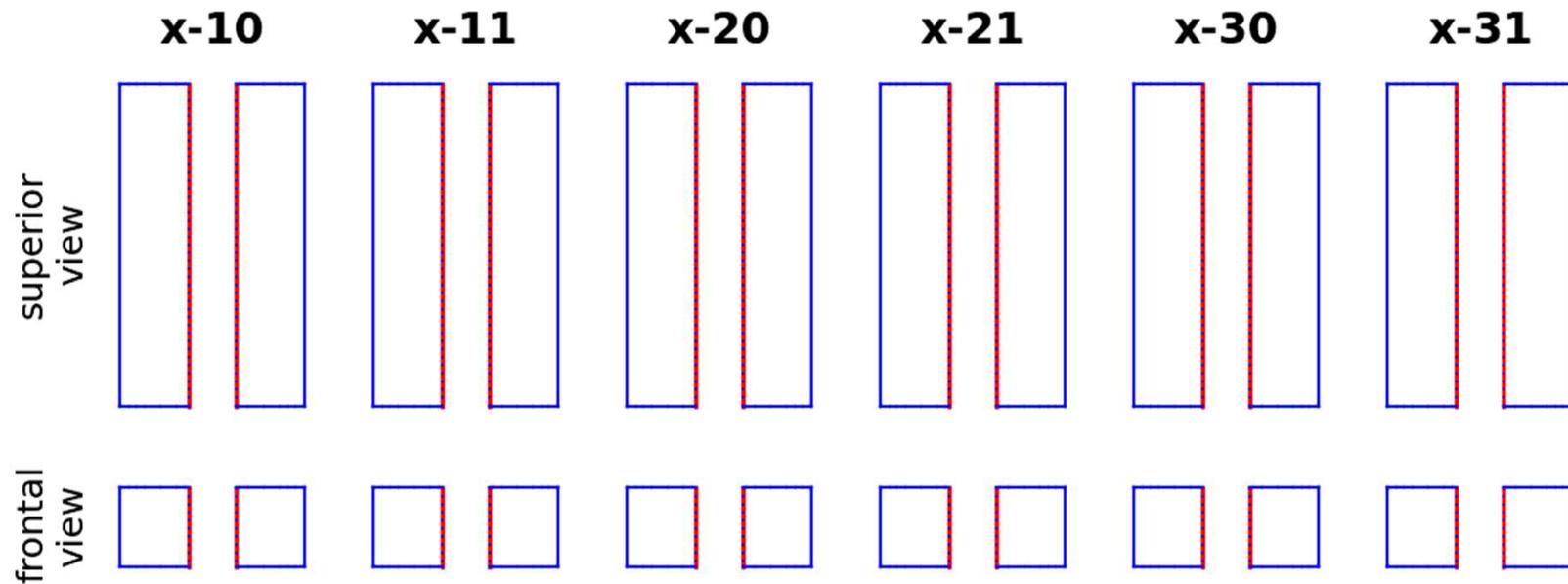
Modes of vocal fold vibration

In general, every mechanical vibration of a structure can be decomposed into so called eigenmodes of vibration.

These modes display a characteristic shape and frequency of vibration.

Combining these modes can explain even very complex vocal fold vibration patterns in hoarse patients.

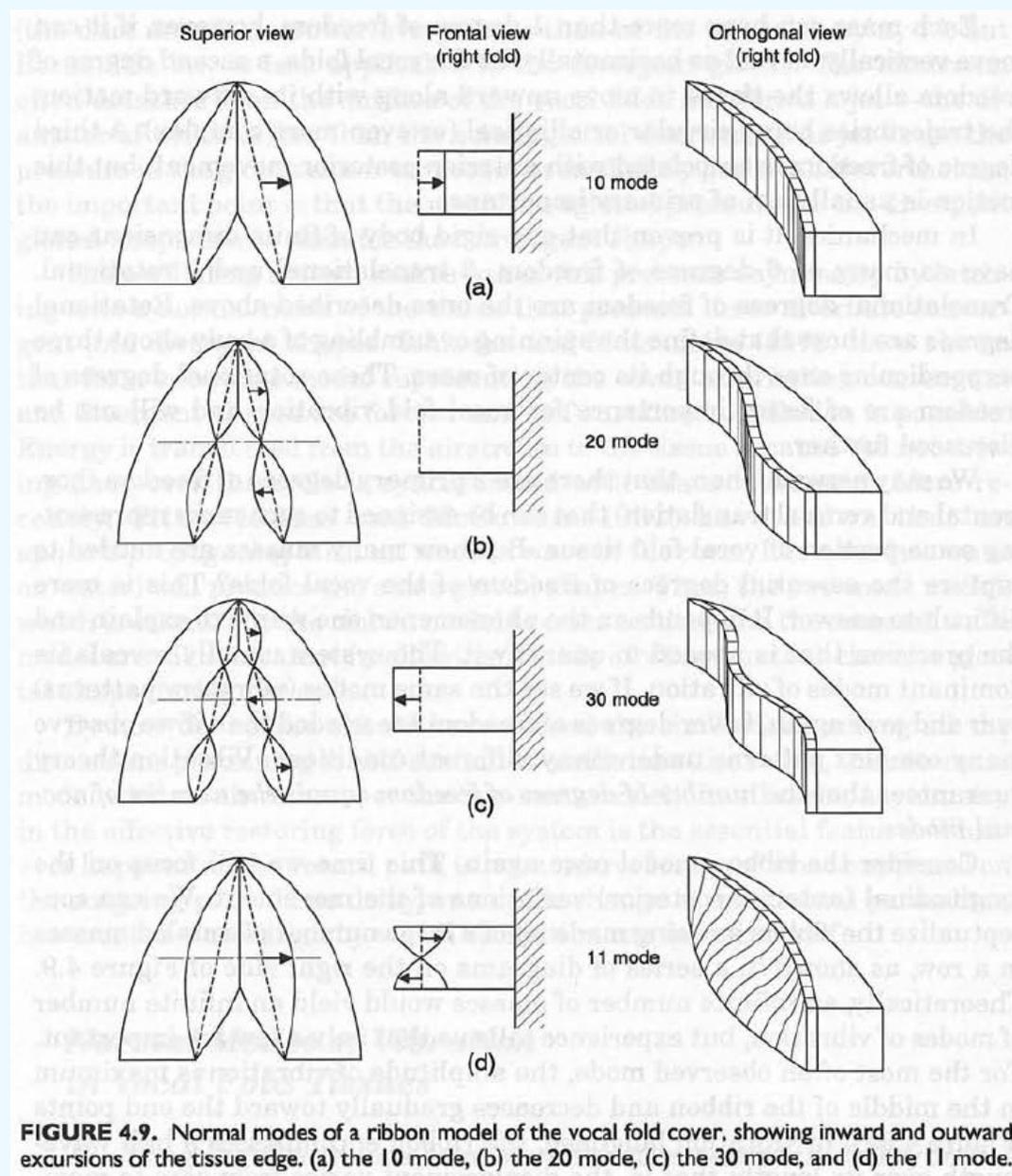
The more complex the vocal fold vibration, the more modes are excited



(C) 2013 www.christian-herbst.org

Animations downloaded from <https://www.christian-herbst.org/media/>

Módy kmitání hlasivek / Modes of vocal fold vibration



Titze IR. Principles of voice production (second printing). Iowa City, IA: National Center for Voice and Speech, 2000,

Módy kmitání hlasivek

Zobrazení pohybu mediálního povrchu hlasivek u preparátů hrtanu a jejich rozklad do vlastních módů kmitání poprvé publikovali Berry et al. v roce 2001.

High-speed digital imaging of the medial surface of the vocal folds

J. Acoust. Soc. Am. 110 (5), Pt. 1, Nov. 2001

David A. Berry^{a)}

*Department of Biomedical Engineering and Department of Speech Pathology & Audiology,
The University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242*

Douglas W. Montequin

Department of Speech Pathology and Audiology, The University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242

Niro Tayama

Department of Otolaryngology, University of Tokyo, Tokyo, Japan



Mounting Procedure

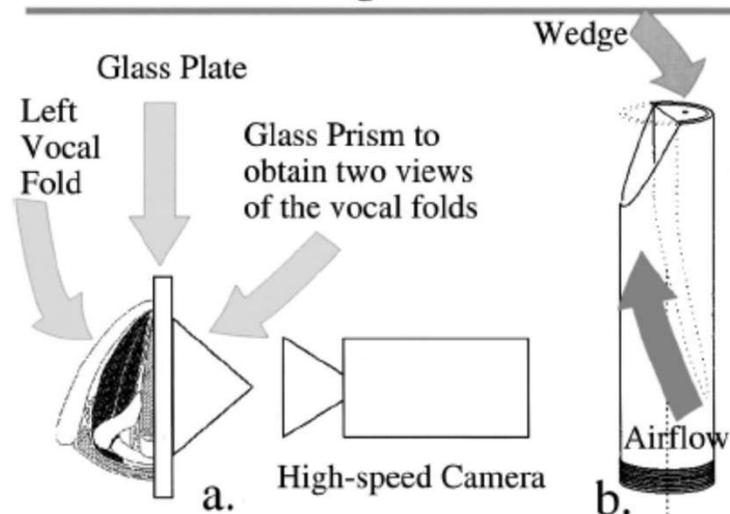
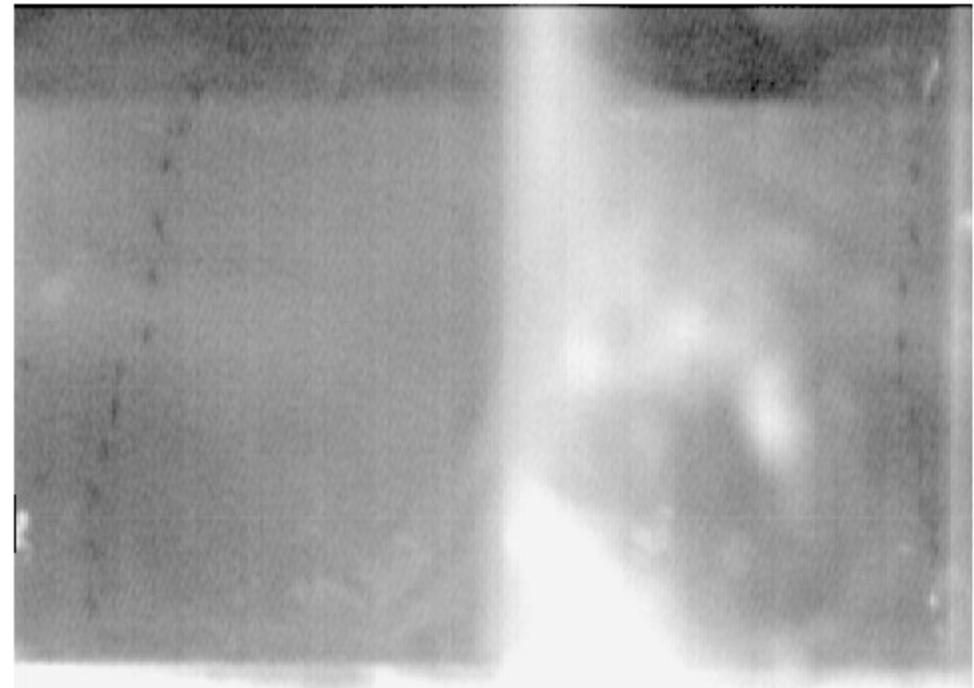


FIG. 2. (a) A superior view of the hemilarynx setup, including the left vocal fold, the glass plate, the glass prism, and the high-speed camera. (b) Artificial trachea upon which the hemilarynx is mounted for phonation.



Modes of vocal fold vibration

First investigations of the movement of the medial vocal fold surface in excised hemilarynges and its decomposition into eigenmodes of vocal fold vibration was first published by Berry et al. in 2001.

High-speed digital imaging of the medial surface of the vocal folds

J. Acoust. Soc. Am. **110** (5), Pt. 1, Nov. 2001

David A. Berry^{a)}

*Department of Biomedical Engineering and Department of Speech Pathology & Audiology,
The University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242*

Douglas W. Montequin

Department of Speech Pathology and Audiology, The University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242

Niro Tayama

Department of Otolaryngology, University of Tokyo, Tokyo, Japan



Mounting Procedure

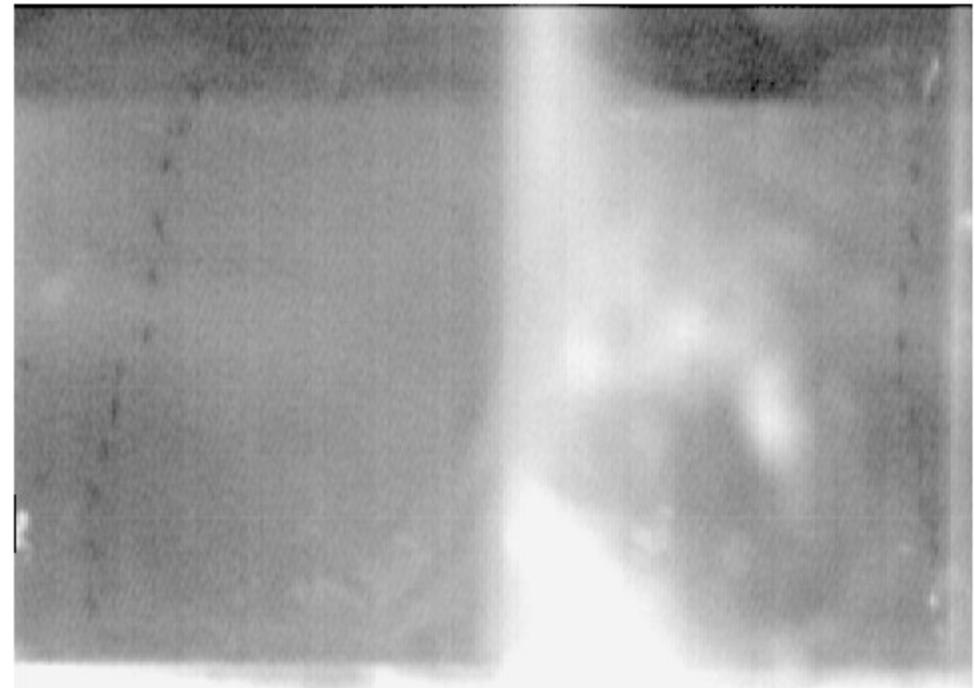
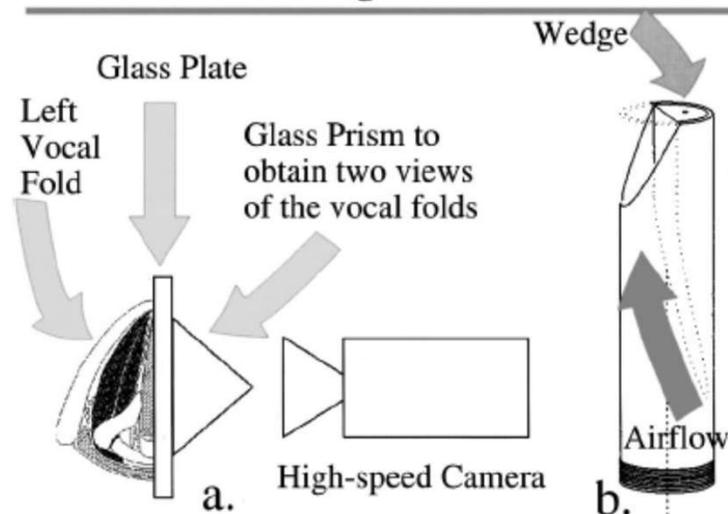
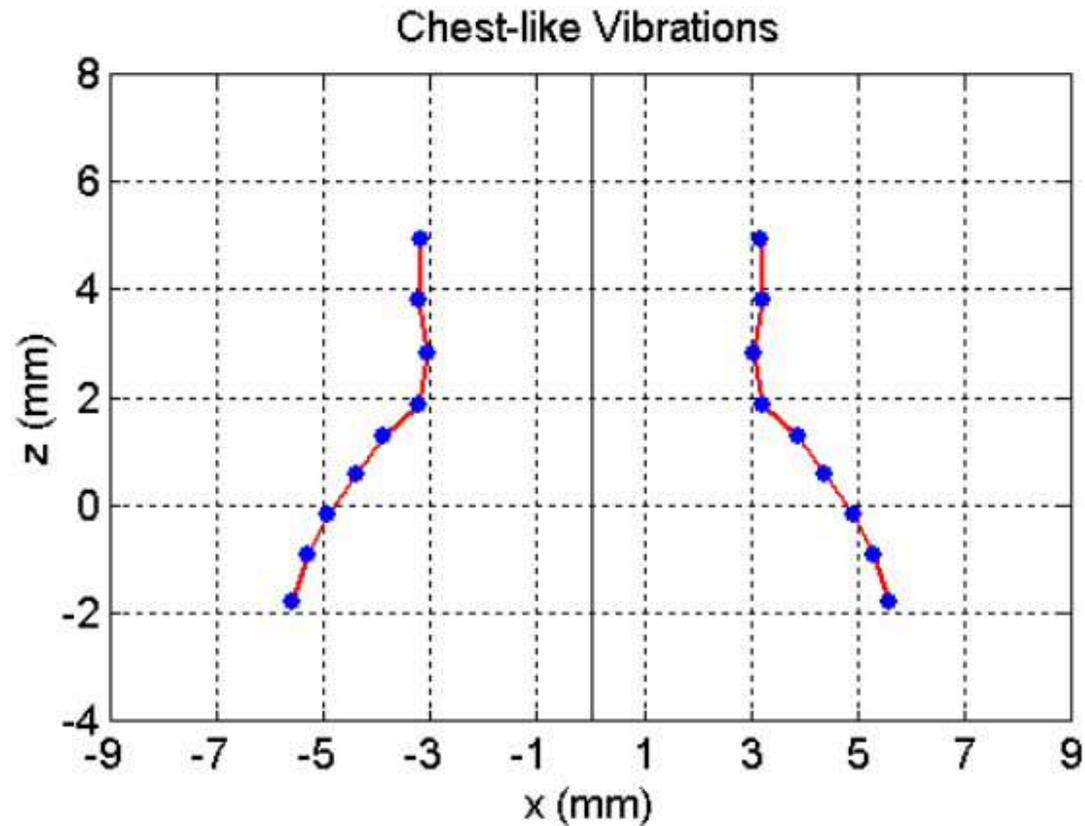


FIG. 2. (a) A superior view of the hemilarynx setup, including the left vocal fold, the glass plate, the glass prism, and the high-speed camera. (b) Artificial trachea upon which the hemilarynx is mounted for phonation.

Módy kmitání hlasivek

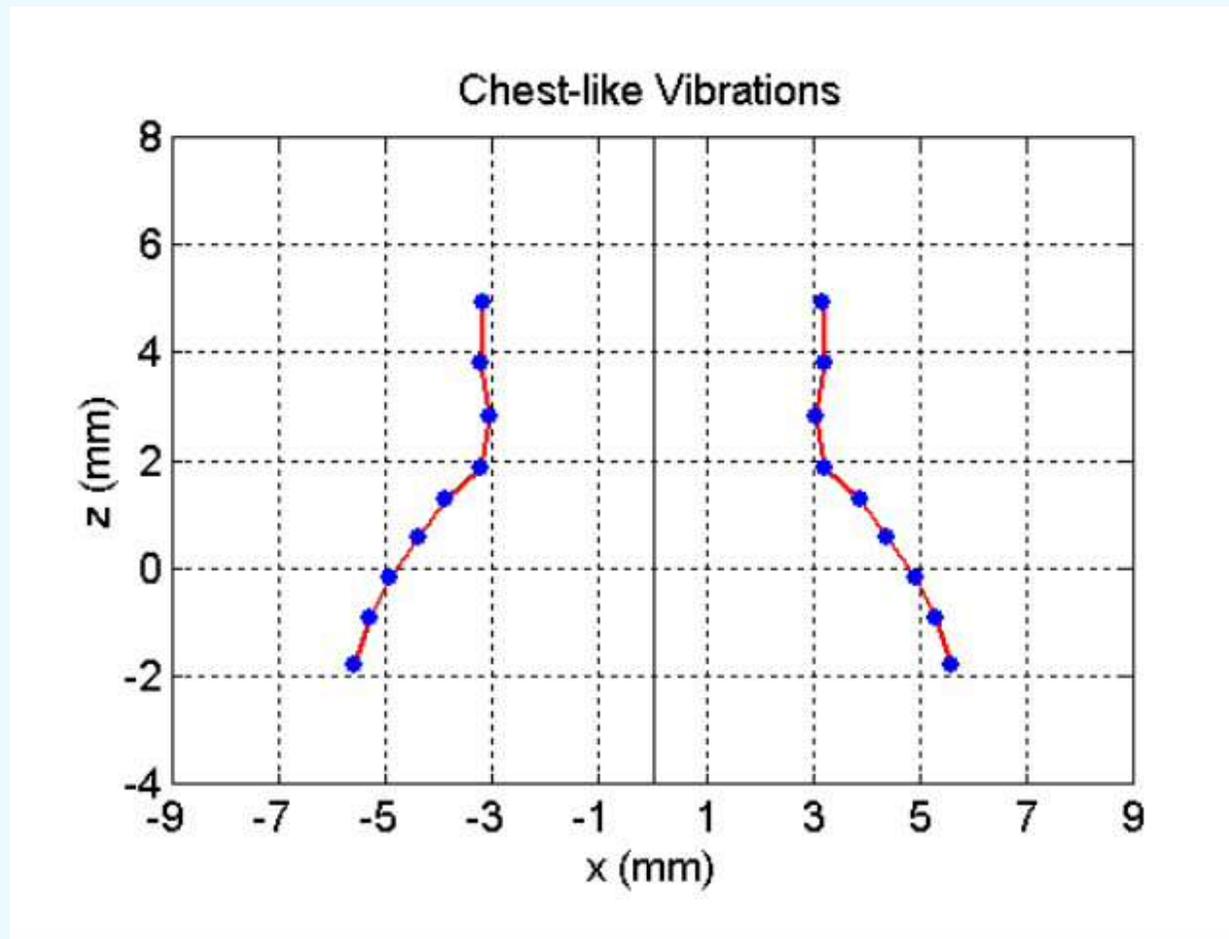
Zobrazení pohybu mediálního povrchu hlasivek u preparátů hrtanu a jejich rozklad do vlastních módů kmitání poprvé publikovali Berry et al. v roce 2001.

Experimentálně zjištěné kmity mediálního povrchu hlasivek:



Modes of vocal fold vibration

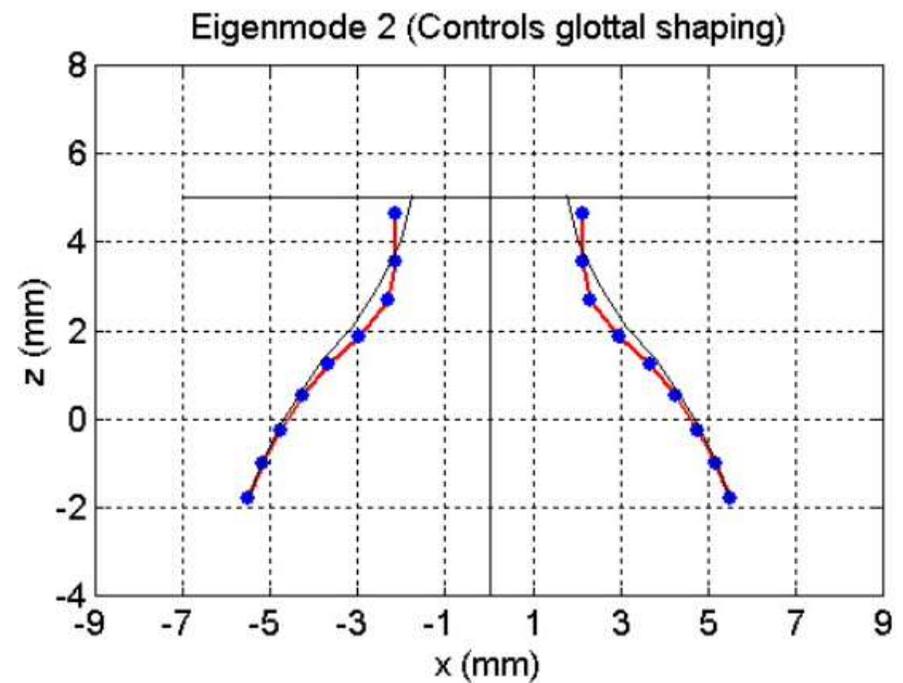
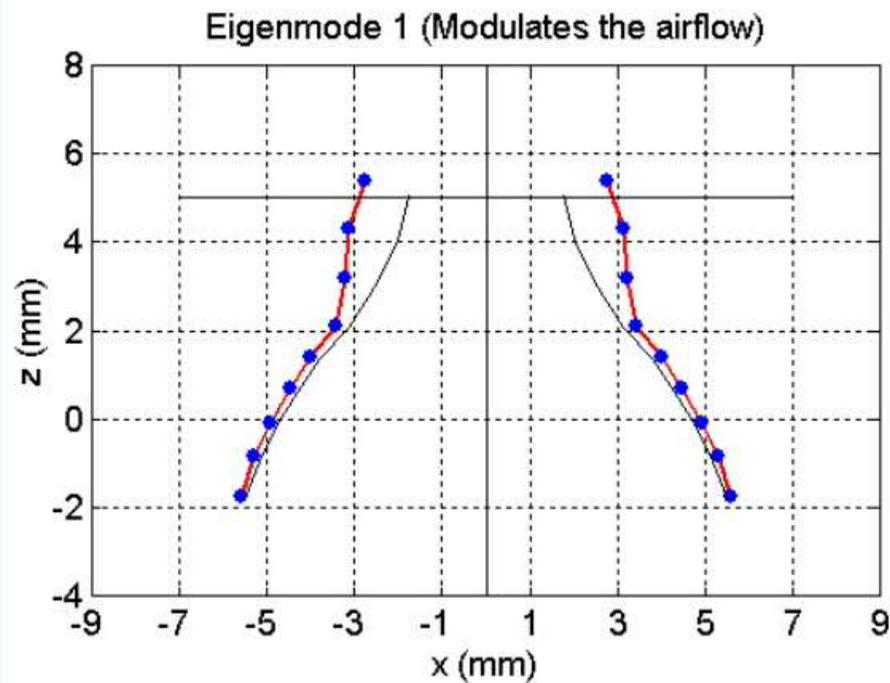
First investigations of the movement of the medial vocal fold surface in excised hemilarynges and its decomposition into eigenmodes of vocal fold vibration was first published by Berry et al. in 2001.



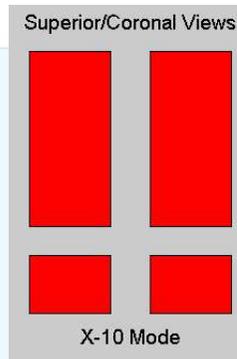
Módy kmitání hlasivek

Zobrazení pohybu mediálního povrchu hlasivek u preparátů hrtanu a jejich rozklad do vlastních módů kmitání poprvé publikovali Berry et al. v roce 2001.

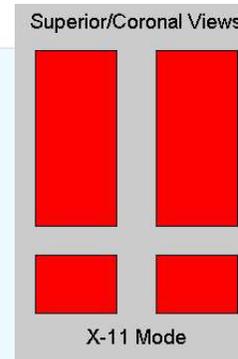
Dva nejvýraznější módy při běžném kmitání hlasivek:



1. Vlastní mód:
69% variance kmitů



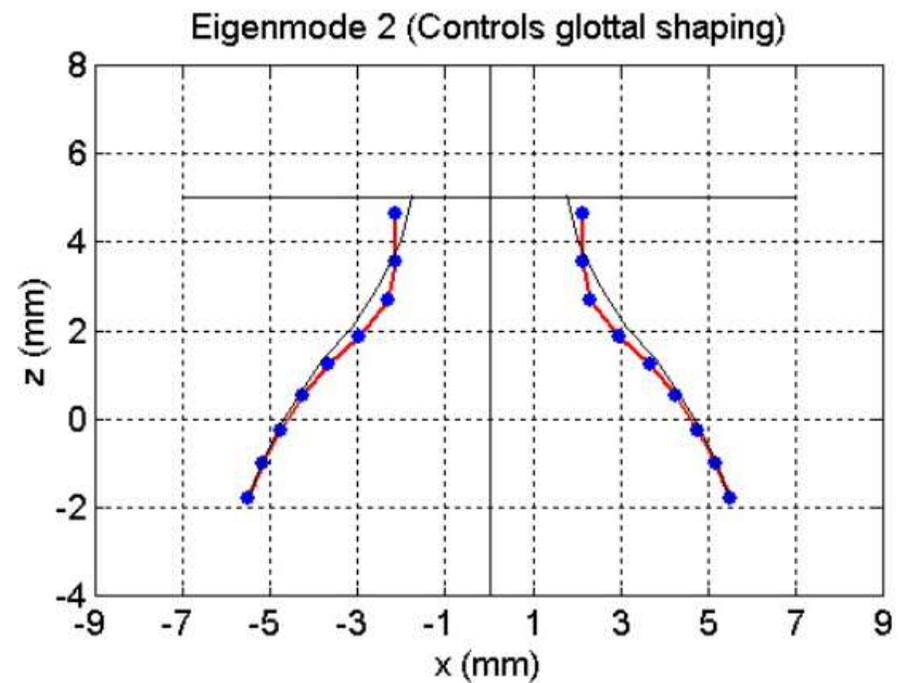
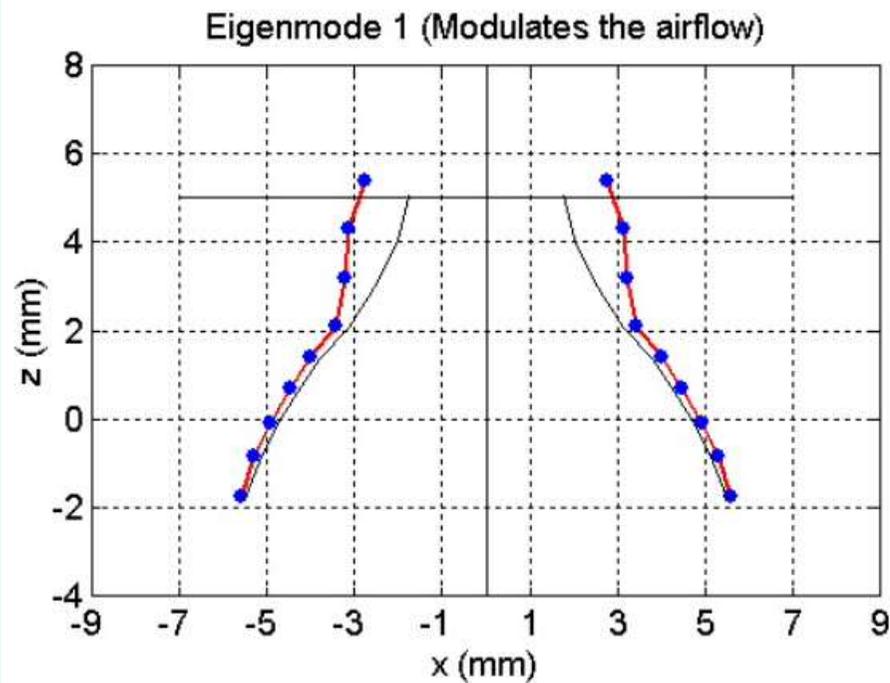
2. Vlastní mód:
29% variance kmitů



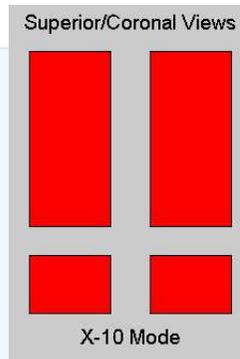
Modes of vocal fold vibration

First investigations of the movement of the medial vocal fold surface in excised hemilarynges and its decomposition into eigenmodes of vocal fold vibration was first published by Berry et al. in 2001.

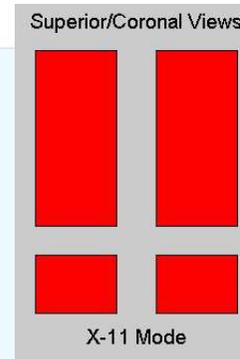
Two most dominant modes in usual vocal fold vibrations:



1. Eigenmode:
69% variance



2. Eigenmode:
29% variance

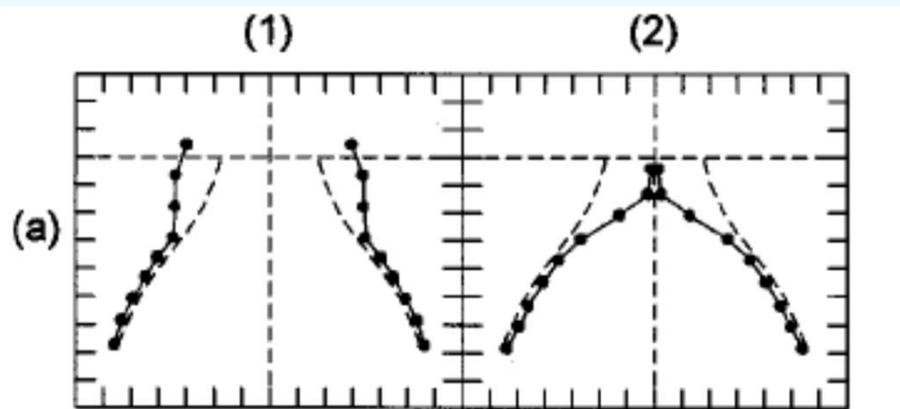


Módy kmitání hlasivek

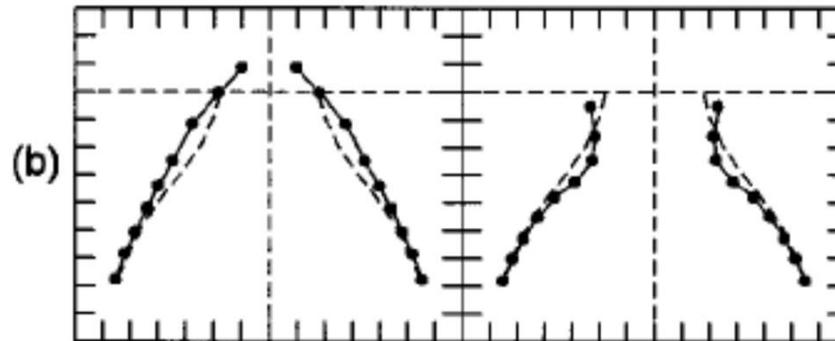
Zobrazení pohybu mediálního povrchu hlasivek u preparátů hrtanu a jejich rozklad do vlastních módů kmitání poprvé publikovali Berry et al. v roce 2001.

Dva nejvýraznější módy při běžném kmitání hlasivek:

1. *Vlastní mód:*



2. *Vlastní mód:*

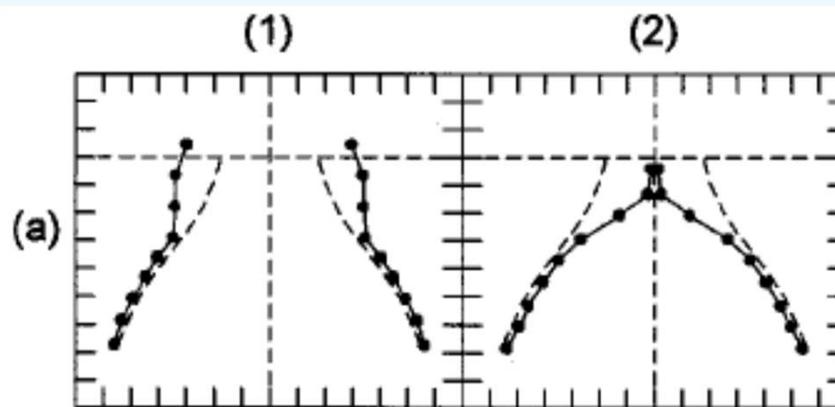


Modes of vocal fold vibration

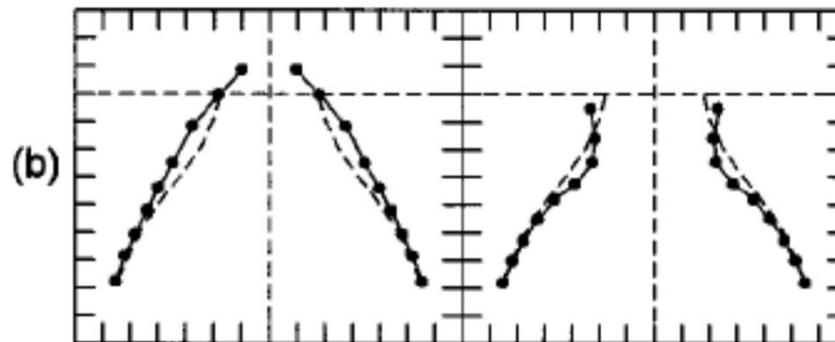
First investigations of the movement of the medial vocal fold surface in excised hemilarynges and its decomposition into eigenmodes of vocal fold vibration was first published by Berry et al. in 2001.

Two most dominant modes in vocal fold vibration:

1. Eigenmode



2. Eigenmode



VOCAL FOLD MODELS

vibrating due to airflow excitation [self-sustained oscillations],
based on myoelastic-aerodynamic theory

FYZICKÉ A MATEMATICKÉ MODELÝ HLASIVÉK

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS OF
THE VOCAL FOLDS

MODELY HLASIVEK

Kmitající díky proudu vzduchu [self-sustained oscillations],
vycházející z myoelasticko-aerodynamické teorie

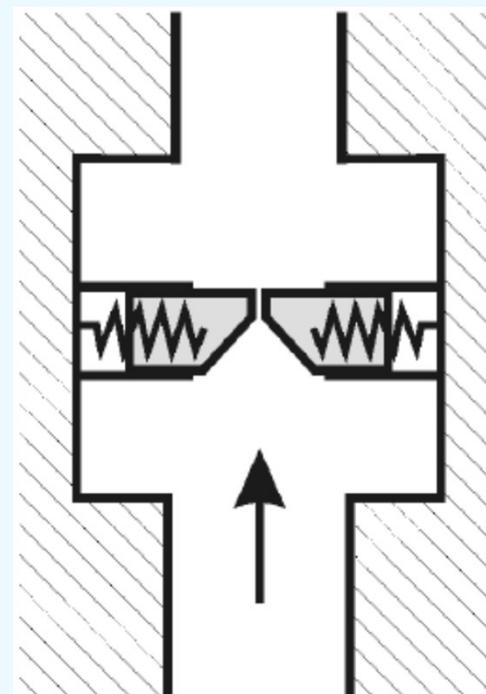
EWALDOVA PÍŠŤALA:

Patrně první historický model hlasivek.

Analogie hlasivek s píšťalou s protiraznými jazýčky.

Tlak vzduchu způsobí rozevření hlasivek a ty se, poté co vzduch unikne a tlak klesne, díky své pružnosti (tuhost pružin na obr. 1.24 je analogická napětí hlasivek) zase uzavřou. Tento děj se cyklicky opakuje.

Na bázi této představy Ewald zkonstruoval některé funkční fyzické hlasivkové modely (Ewald, 1898).



VOCAL FOLD MODELS

vibrating due to airflow excitation [self-sustained oscillations],
based on myoelastic-aerodynamic theory

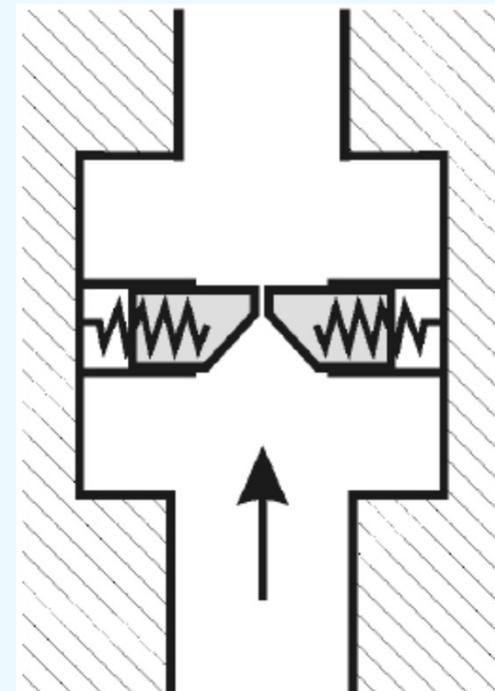
EWALD'S REED PIPE:

Probably the first physical vocal fold model in history.

Analogy of the vocal folds with a pipe with opposite reeds.

Air pressure causes the reeds to open and due to the elasticity they close again (the spring stiffness on the Fig. 1.24 is analogic to vocal fold tension). This event cyclically repeats.

Using this idea, Ewald constructed functional prototypes of vocal fold models (Ewald, 1898).



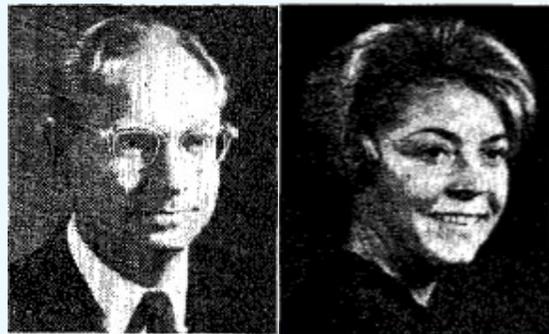
Ewald R. Zur Konstruktion der Polsterpfeifen. Pflüg Arch 152: 171-186, 1898.

MODELY HLASIVEK

Kmitající díky proudu vzduchu [self-sustained oscillations],
vycházející z myoelasticko-aerodynamické teorie

JEDNOHMOTNOSTNÍ MODEL:

(Flanagan & Landgraf, 1968)



Nejjednodušší matematicko-fyzikální model.

Vycházel z představ Ewaldovy píš'aly.

Implementován počítačově!

Chování ne zcela uspokojivé:

- kmital pouze v přítomnosti vokálního traktu
- nezohledňoval rozdíly fáze mezi dolním a horním okrajem hlasivky

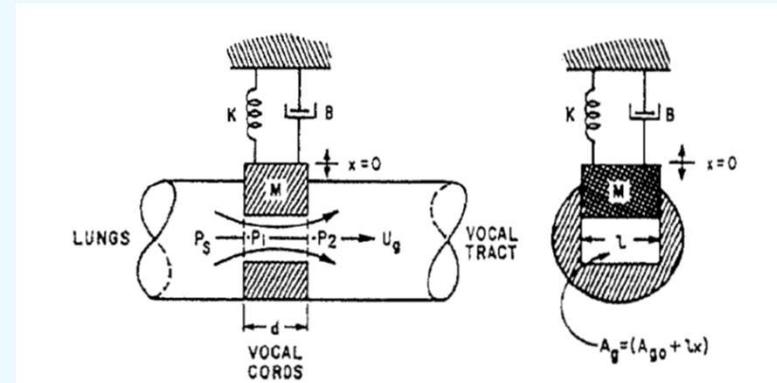
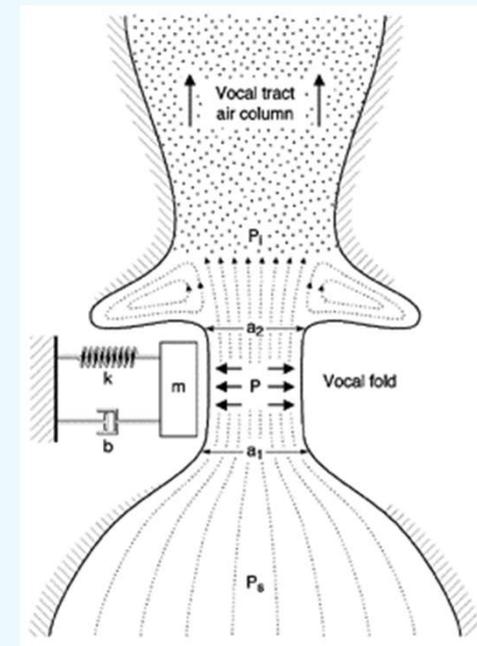


Fig. 3. Second-order mechanical model of the vocal cords.



VOCAL FOLD MODELS

vibrating due to airflow excitation [self-sustained oscillations],
based on myoelastic-aerodynamic theory

ONE-MASS MODEL:

(Flanagan & Landgraf, 1968)



The simplest mathematical model.

It was based on the idea of Ewald's physical model.

Implemented computationally – first computer model!

The model behaviour was not satisfying:

- it oscillated only in the presence of the vocal tract
- it did not take into account the vertical phase differences between the upper and lower margins

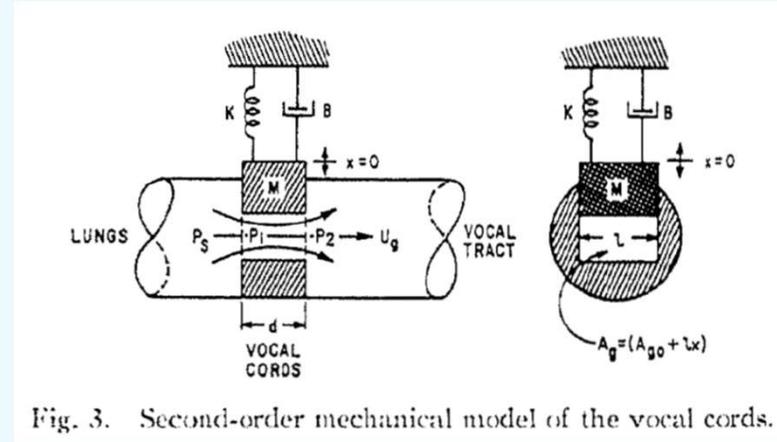
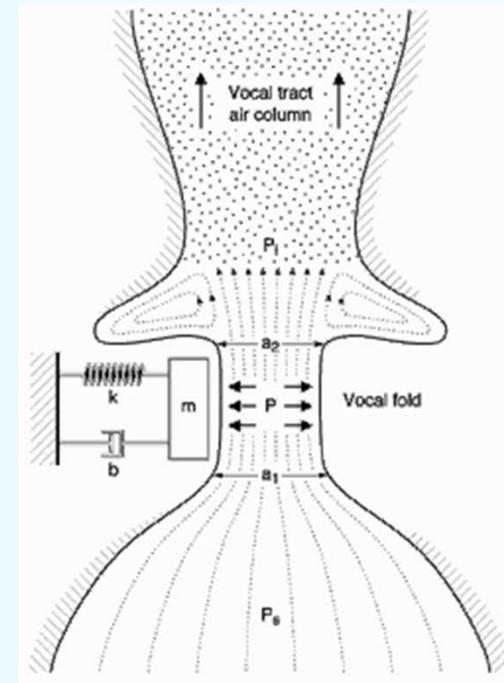


Fig. 3. Second-order mechanical model of the vocal cords.



MODELY HLASIVEK

Kmitající díky proudu vzduchu [self-sustained oscillations],
vycházející z myoelasticko-aerodynamické teorie

DVOUHNOTNOSTNÍ MODEL:

(Ishizaka & Flanagan, 1972)

Velice úspěšný počítačový model, který je používán v různých modifikacích dosud.

7 hlavních viskoelastických parametrů – 2 hmotnosti, 2 tlumiče a 3 pružiny.

Umožňuje uspokojivě modelovat chování hlasivek – jak pravidelné tak nepravidelné.

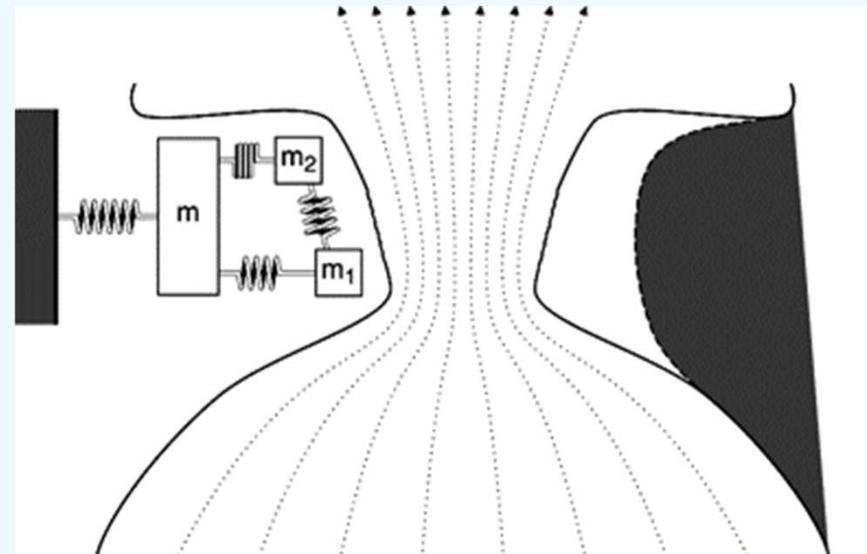
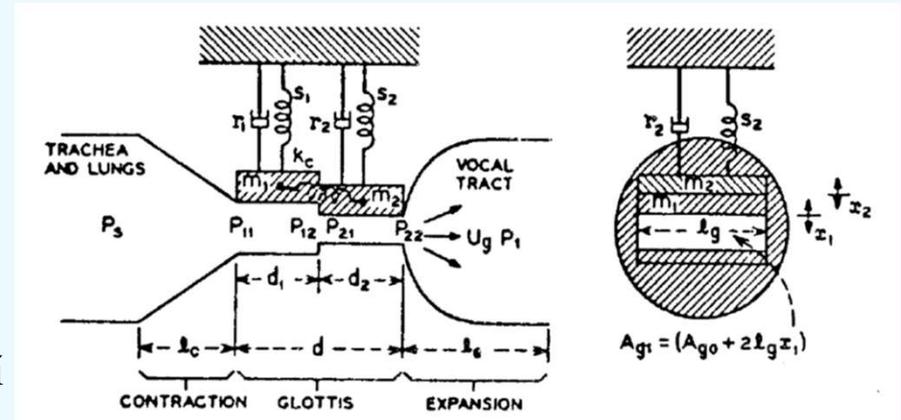
Kmitá i bez přítomnosti vokálního traktu.

Při kmitání vykazuje fázový rozdíl mezi horním a dolním okrajem hlasivek.

Tento jev umožňuje efektivní přenos energie z tlaku vzduchu do kmitání hlasivek.

Vykazuje nelineárně-dynamické vlastnosti, včetně chaotického kmitání.

Jeho rozšířením je **tříhmotnostní model** (Story & Titze, 1995), který se snaží lépe vystihnout teorii těla a obalu hlasivky:



MODELY HLASIVEK

Kmitající díky proudu vzduchu [self-sustained oscillations],
vycházející z myoelasticko-aerodynamické teorie

MODEL SLIZNIČNÍ VLNY:

(Titze 1988)

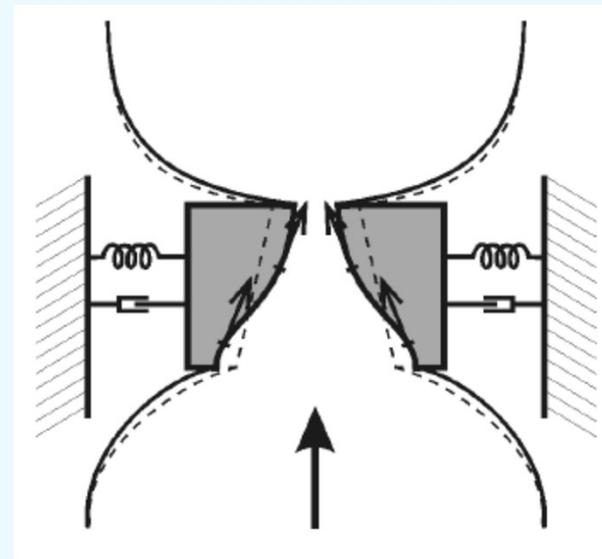
Počítačový model

Vystihuje šíření slizničních vln po
hlasivkách odspodu nahoru.

Obsahuje pouze jeden kmitající
element po jehož mediálním okraji
se ale navíc šíří vlna.



I.R. Titze



Titze I.R. The physics of small-amplitude oscillation of the
vocal folds. J Acoust Soc Am 83: 1536-1552, 1988.

VOCAL FOLD MODELS

vibrating due to airflow excitation [self-sustained oscillations],
based on myoelastic-aerodynamic theory

MUCOSAL WAVE MODEL:

(Titze 1988)

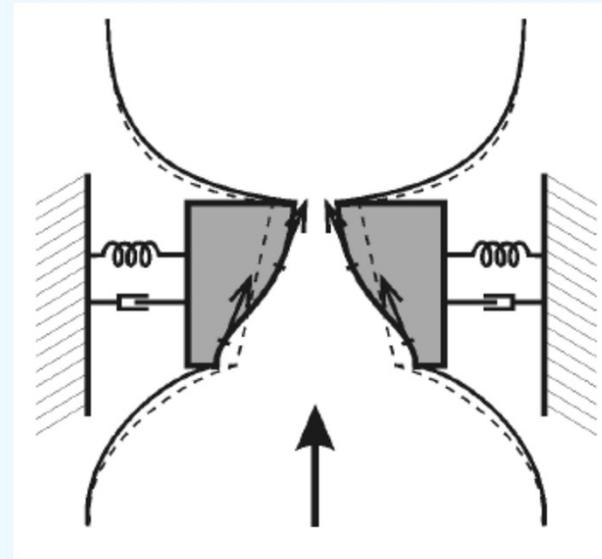
Theoretical mathematical model

It expresses the propagation of the
mucosal waves across the medial
vocal fold surface upwards.

It has only a single vibrating element
on top of which the wave
propagates upward.



I.R. Titze



Titze IR. The physics of small-amplitude oscillation of the
vocal folds. J Acoust Soc Am 83: 1536-1552, 1988.



MODEL SLIZNIČNÍCH VLN:

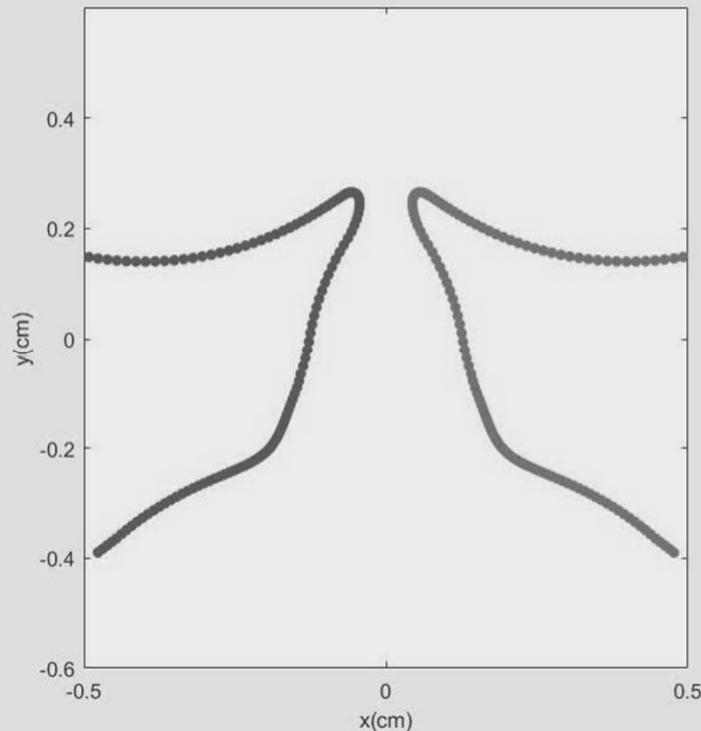


Kumar & Švec (2019):

Mathematical extension of the mucosal wave model to 3D – waves travelling around the vocal fold surface upwards and then laterally.

Simulation of vocal fold kymograms

Simulated kymogram



Kumar SP and Svec JG. Kinematic model for simulating mucosal wave phenomena on vocal folds. Biomed Signal Process Control 49: 328-337, 2019.



MUCOSAL WAVE MODEL:

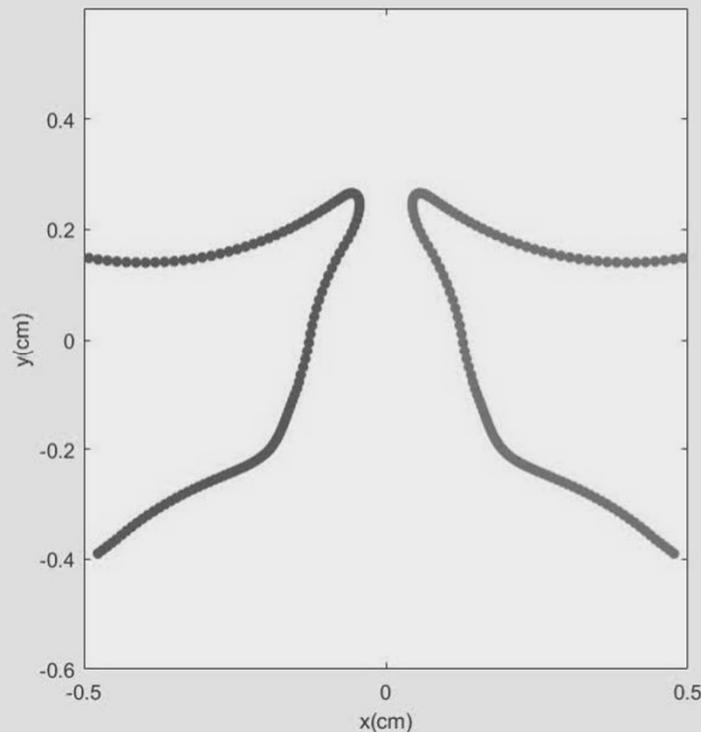


Kumar & Švec (2019):

Mathematical extension of the mucosal wave model to 3D – waves travelling around the vocal fold surface upwards and then laterally.

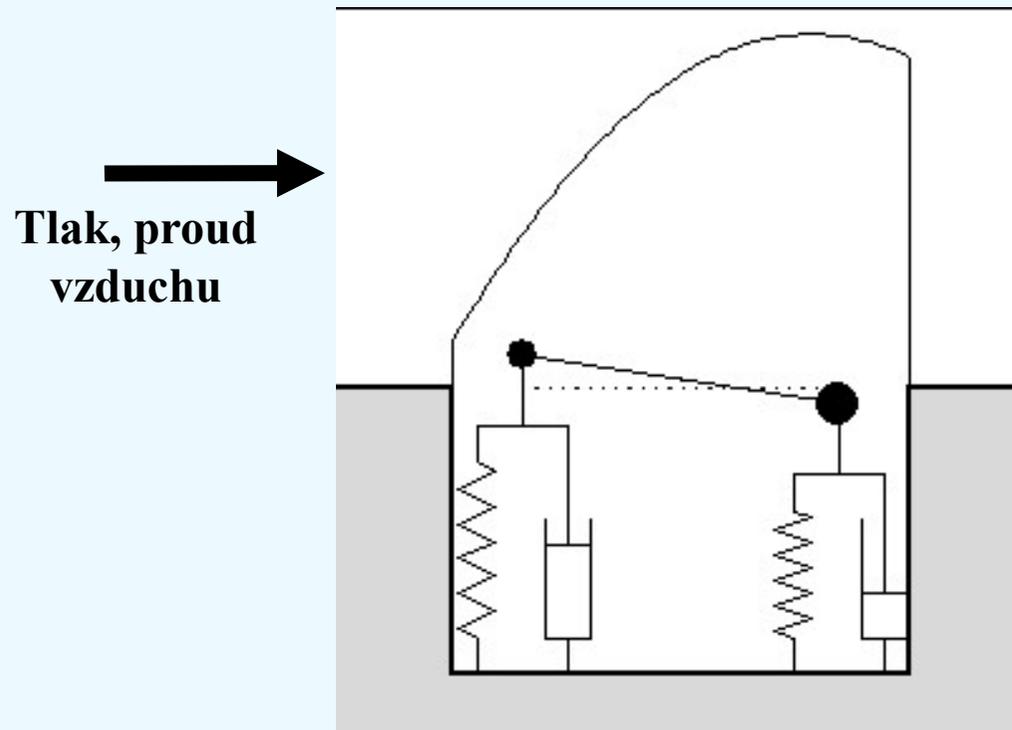
Simulation of vocal fold kymograms

Simulated kymogram



Kumar SP and Svec JG. Kinematic model for simulating mucosal wave phenomena on vocal folds. Biomed Signal Process Control 49: 328-337, 2019.

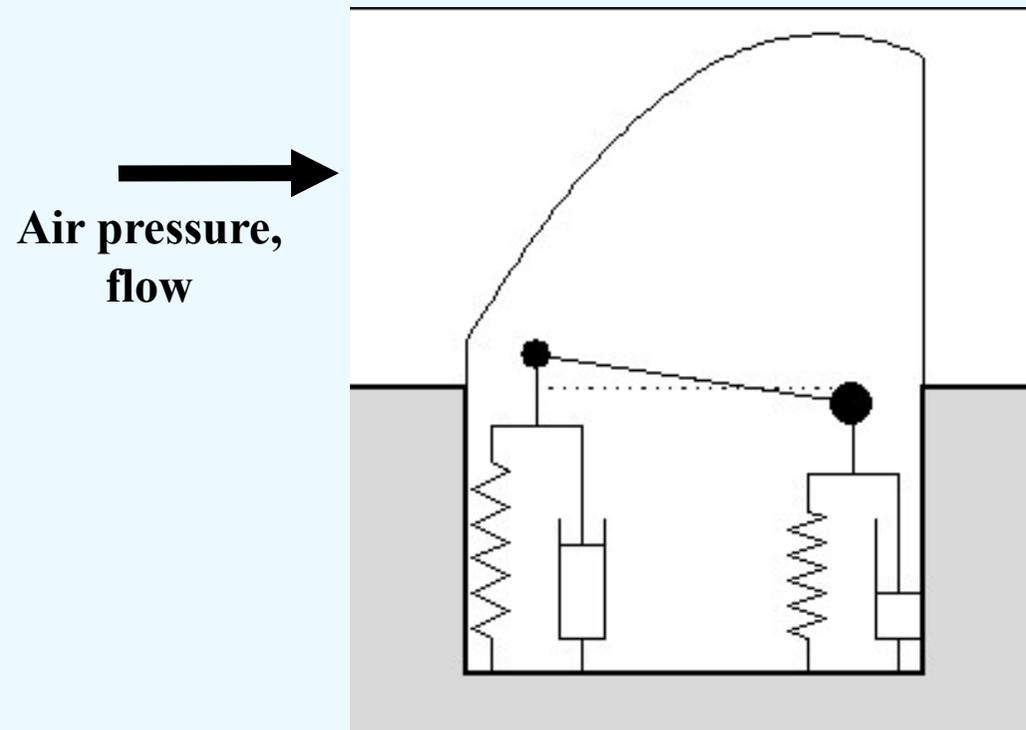
AEROELASTICKÝ MODEL (Horáček et al., 2002, 2005)



Kmitající element parabolického tvaru, dva stupně volnosti, symetrické kmity, buzení proudem vzduchu (1D Eulerova rovnice a rovnice kontinuity pro nevazkou nestlačitelnou tekutinu), Hertzův model rázů

(Horáček, J. - Šidlof, P. - Švec, J.G. *Journal of Fluids and Structures*, 2005)

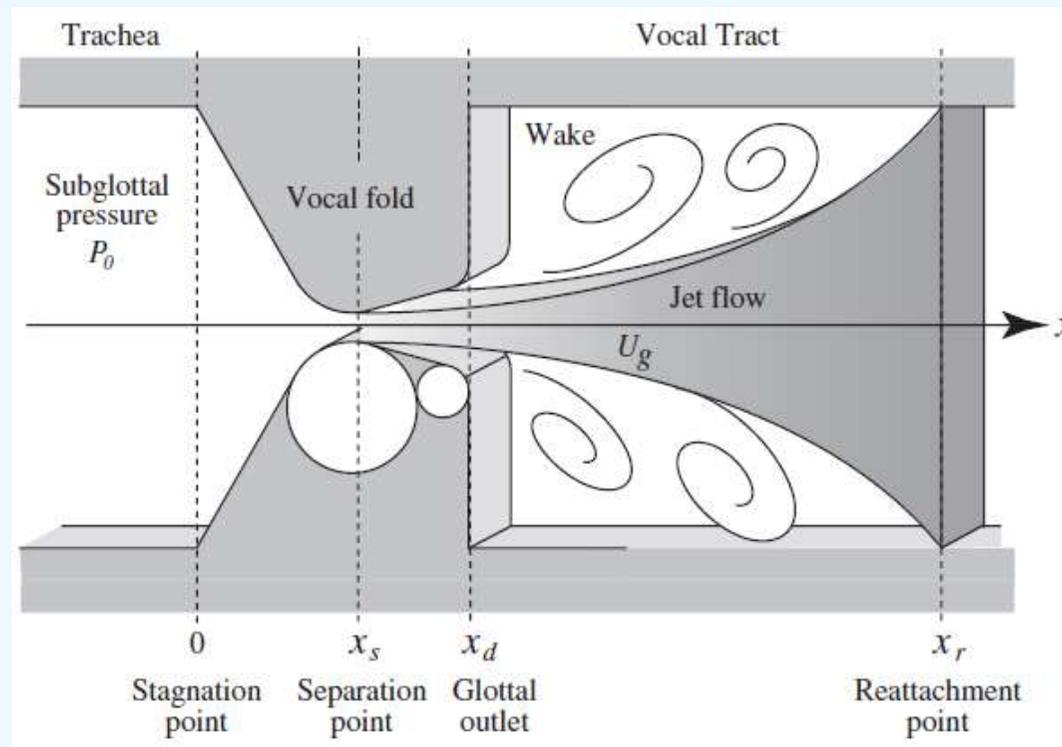
AEROELASTIC MODEL (Horáček et al., 2002, 2005)



Vibrating element of parabolic shape, two degrees of freedom, symmetric vibrations, air-driven self-sustained oscillations (1D Euler equation and continuity equation for incompressible inviscid fluid), Hertz model of impact forces

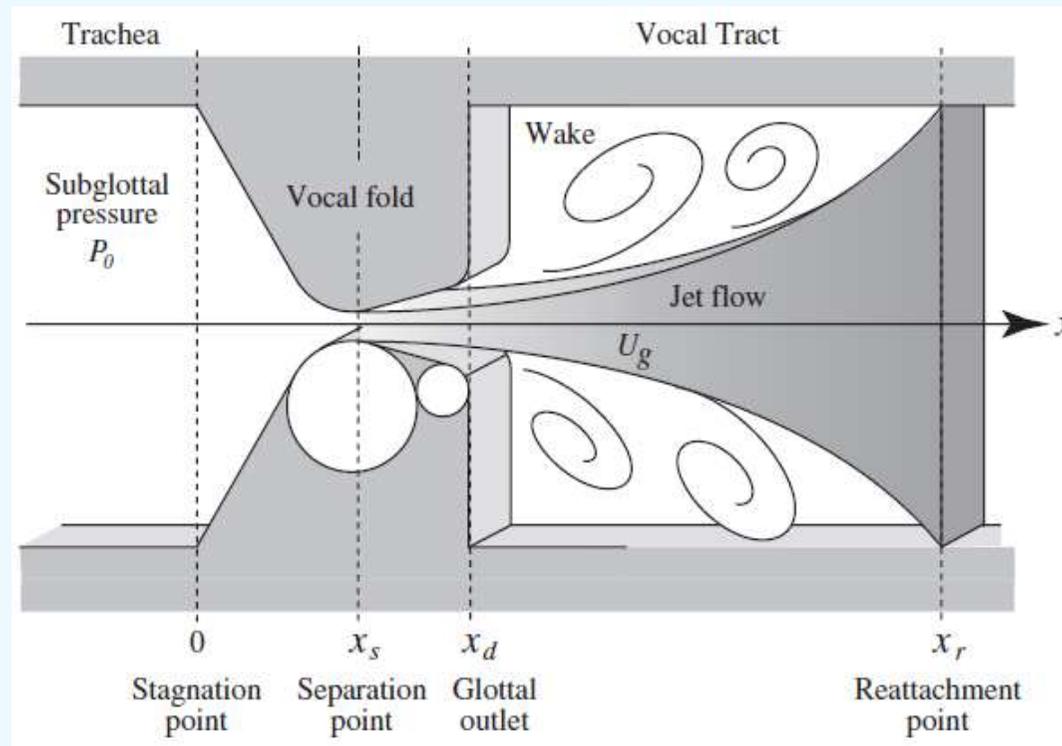
(Horáček, J. - Šidlof, P. - Švec, J.G. *Journal of Fluids and Structures*, 2005)

PROUDĚNÍ VZDUCHU A VÝSLEDNÉ SÍLY PŮSOBÍCÍ NA HLASIVKY



Při proudění vzduchu mezi hlasivkami vznikají síly, které hlasivky rozkmitávají. Tyto síly závisí m.j. na rychlosti proudění (Bernoulliova rovnice) a na místě odtržení proudu od hlasivek.

AIR FLOW AND RESULTING FORCES ACTING ON THE VOCAL FOLDS (Kaburagi 2008)



The air flowing between the vocal folds causes forces which excite vocal fold vibrations. These forces depend, e.g., on the flow velocity (Bernoulli equation) and on the point at which the flow separates from the vocal folds.

MODELY HLASIVEK

Kmitající díky proudu vzduchu [self-sustained oscillations],
vycházející z myoelasticko-aerodynamické teorie

KONEČNOPRVKOVÉ MODELY:

(Alipour-Haghighi & Titze 1983; Berry, Herzel, Titze & Krischer, 1994, a další)

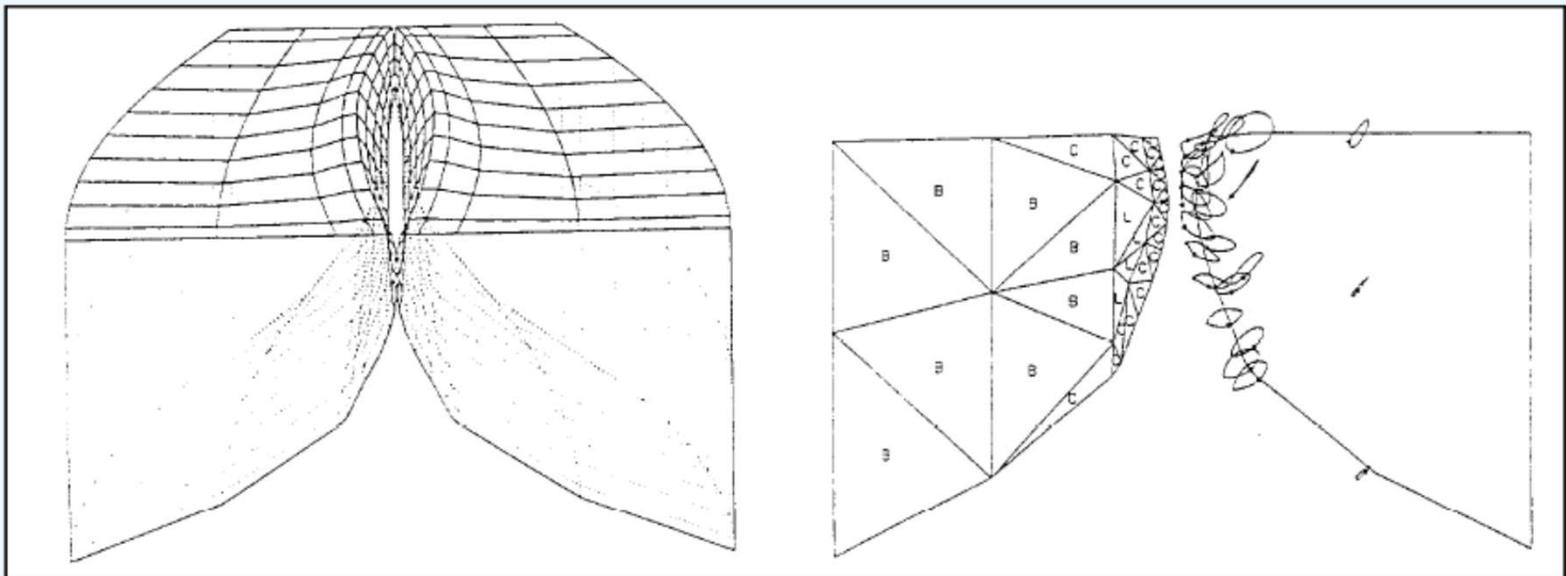
Počítačové modely

Rozdělení hlasivek na malé elementy o přesně definovaných viskoelastických vlastnostech.

Umožňuje velice přesně replikovat vlastnosti struktur hlasivek a jejich chování.

V posledních letech zaznamenaly konečnoprvkové metody velký pokrok.

Nevýhoda – výpočtová náročnost, veliká komplexita, velice mnoho vstupních parametrů, nedostatek přesných vstupních údajů.



David A. Berry

Berry DA, Herzel H, Titze IR and Krischer K. Interpretation of biomechanical simulations of normal and chaotic vocal fold oscillation with empirical eigenfunctions. J Acoust Soc Am 95: 3595-3604, 1994.

VOCAL FOLD MODELS

vibrating due to airflow excitation [self-sustained oscillations],
based on myoelastic-aerodynamic theory

FINITE-ELEMENT MODELS:

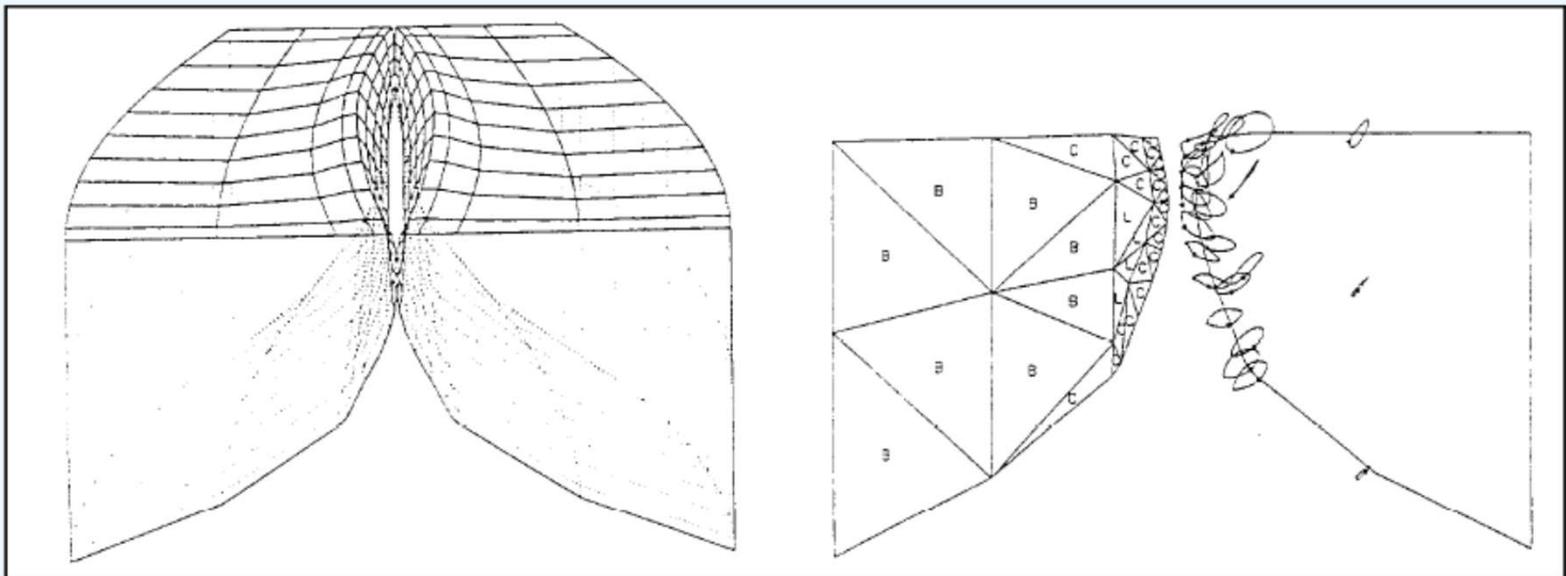
(Alipour-Haghighi & Titze 1983; Berry, Herzel, Titze & Krischer, 1994, and others)

Computational models

Vocal fold structure is divided into small elements with specific viscoelastic properties. It allows replicating the properties of the vocal fold structure and their behaviour very accurately.

There has been a lot of progress in the finite element models during the last decade.

Disadvantage – computationally very demanding, highly complex, many input parameters, insufficient information on input data.



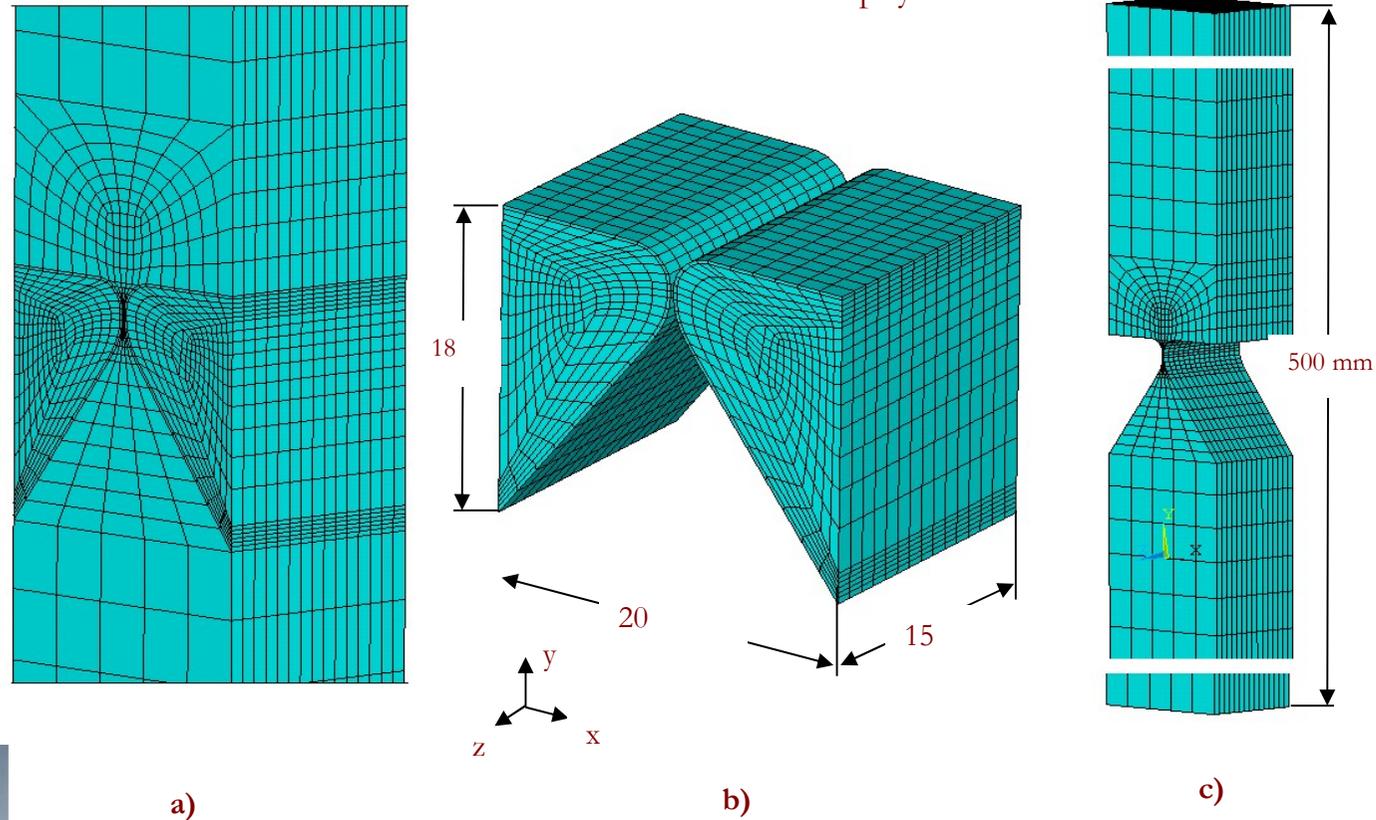
David A. Berry

Berry DA, Herzel H, Titze IR and Krischer K. Interpretation of biomechanical simulations of normal and chaotic vocal fold oscillation with empirical eigenfunctions. *J Acoust Soc Am* 95: 3595-3604, 1994.

KONEČNOPRVKOVÝ MODEL HLASIVEK

(Švancara, Horáček, & Hruza, 2008)

Software: ANSYS 10.0 Multiphysics

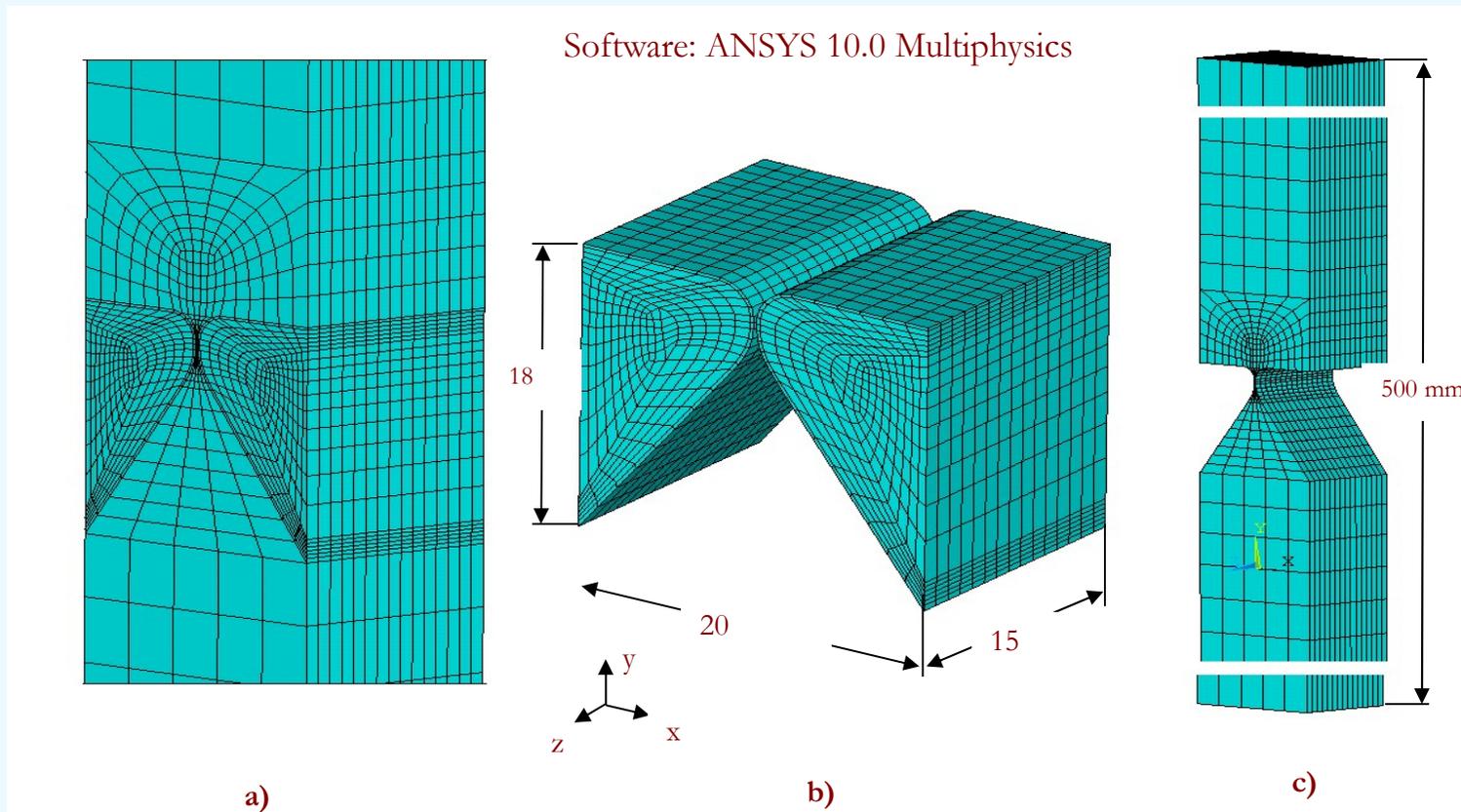


Obr:

- a) KP model hlasivek a zjednodušeného vokálního traktu
- b) KP model hlasivkových tkání
- c) KP model zjednodušeného vokálního traktu

FINITE ELEMENT MODELING OF VOICE PRODUCTION

(Svancara, Horacek, & Hruza, 2008)



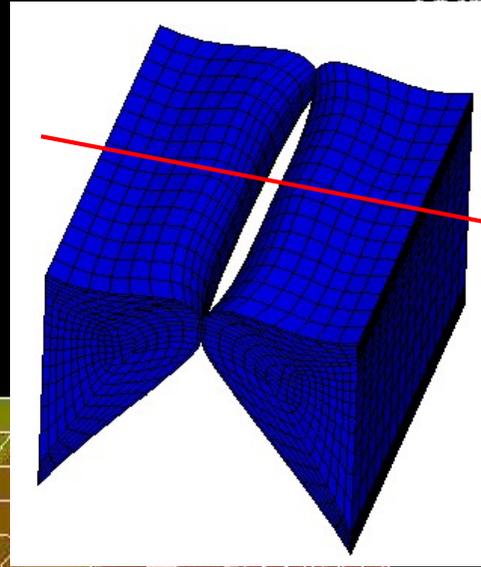
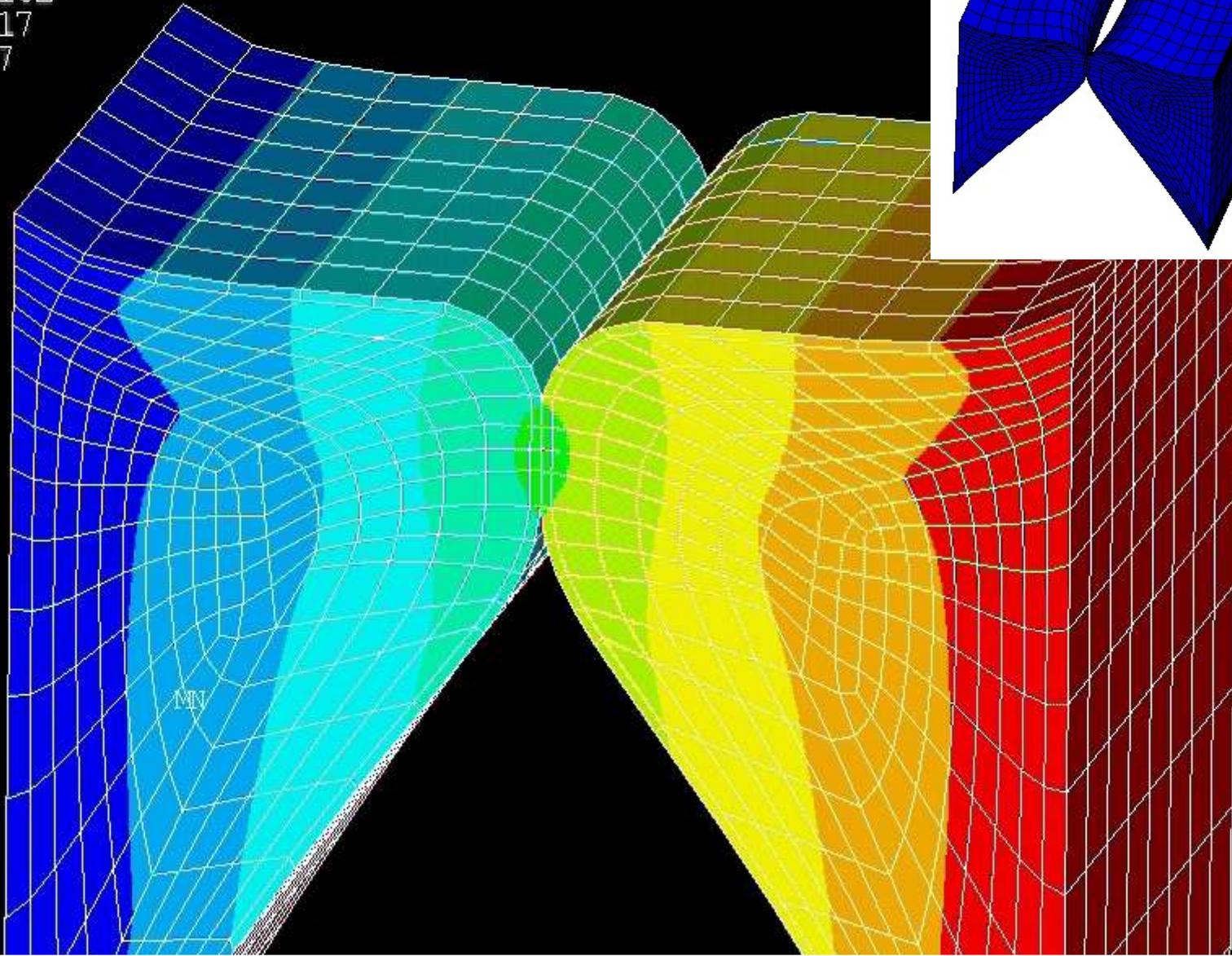
- a) FE model of the vocal folds together with part of FE model of the simplified acoustic spaces of the vocal tract
- b) FE model of the tissue of the vocal folds
- c) FE model of the simplified acoustic spaces of the vocal tract

EP=13
B =10
ME=12

Deformations in x direction

(AVG)

YS=0
K =.003162
J =-.0017
K =.0017

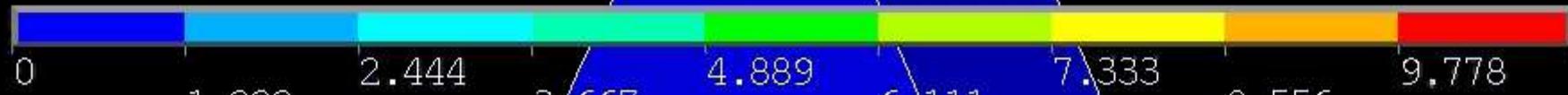
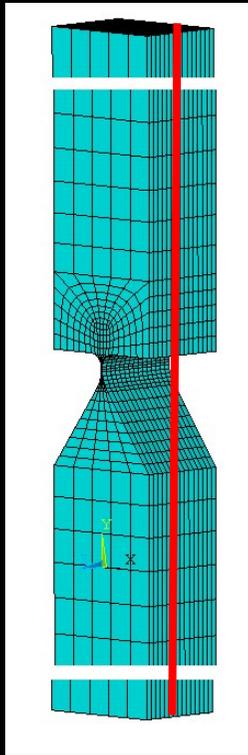


MAY 13 20
22:47:
NO.
-.0017
001322
44E-03
67E-03
MX
-.189E-03
.189E-03
.567E-03
.944E-03
.001322
.0017

EP=1
B =2
ME=.150E-03
JM (AVG)
YS=0
K =.404354

MAY 12 20
14:55:
PLOT NO.

Fluid velocity sum-color map



Video o struktuře a funkci hrtanu – 2.část

Jw. van den Berg, W. Vennard, D. Burger, and C. C. Shervanian.
Voice production. The vibrating larynx. (Instructional film),
University of Groningen, 1960.

Česká verze, překlad Prof. RNDr. J. Pešák, CSc. a Dagmar Flynt, M.A.

Janwillem van den Berg
Groningen, Nizozemsko
cca 1975



Děkuji za pozornost
Thank you for your attention