

Spraakakoestiek  
voor taal- en spraaktechnologie

Gerrit Bloothoof

# Het instrument

Neusholte

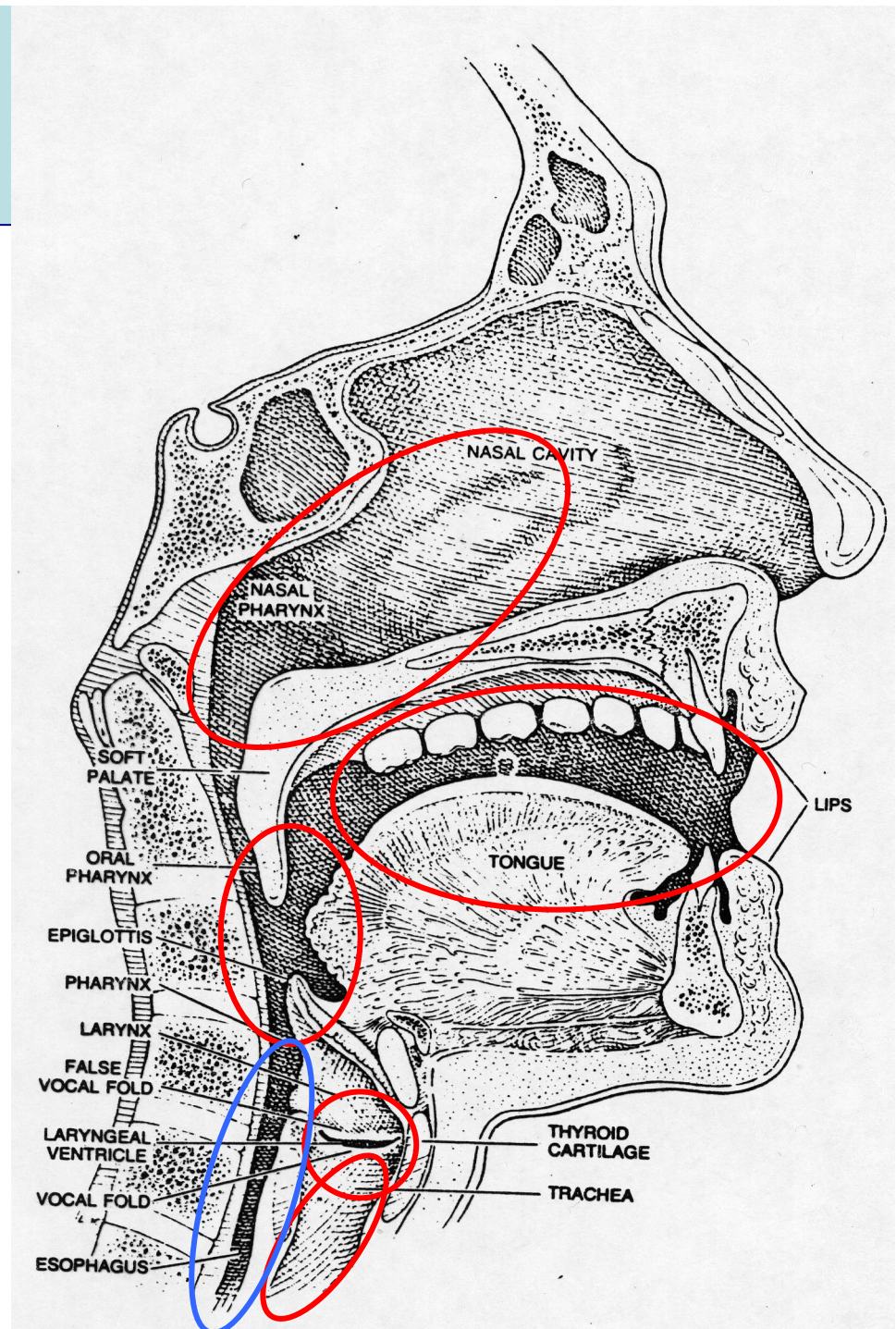
Mondholte met onderkaak,  
tong, lippen

Keelholte met strotteklep

Strottehoofd met  
stemplooiën

Longen en luchtpijp

Slokdarm



# Onderdelen van klankvorming

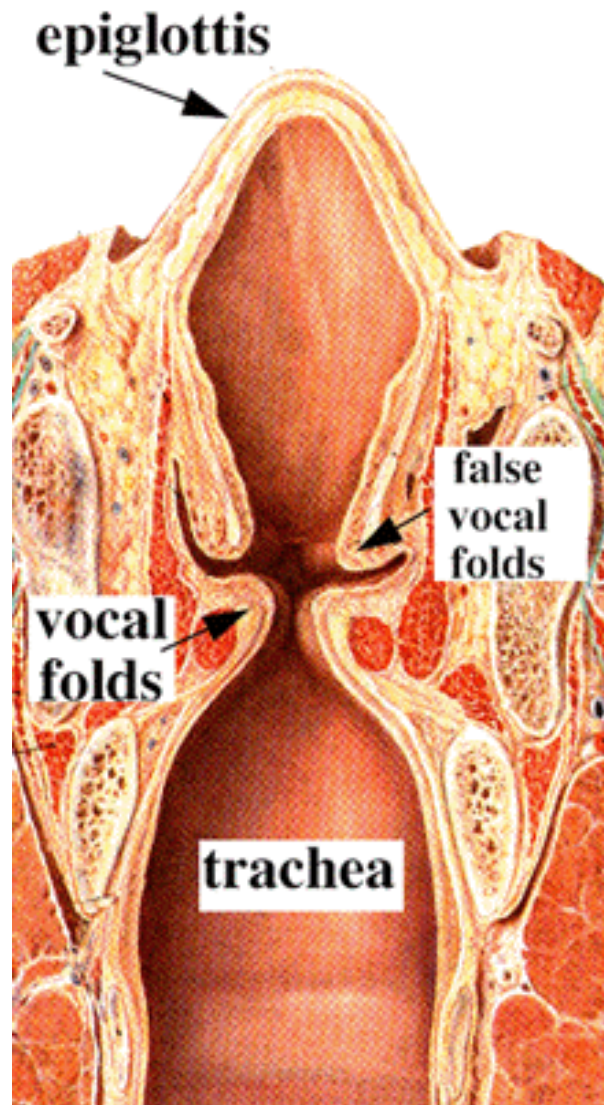
<b>Fysiologie</b>	<b>Akoestiek</b>
Mond-keelholte	Klankvorm door articulatie (klankkleur, klinkers)
Stemplooien in strottehoofd	Basisgeluid door stemgeving (toonhoogte, luidheid, stemregister)
Longen	Luchtdruk

# Servox demonstratie

# Strottenhoofd

De stemplooien produceren het basisgeluid

- balans tussen **spierkracht** die stemplooien sluit en de **ademdruk** die ze opent
- stemplooitruilling door het Bernoulli-effect



**Dwarsdoorsnede door het strottenhoofd**

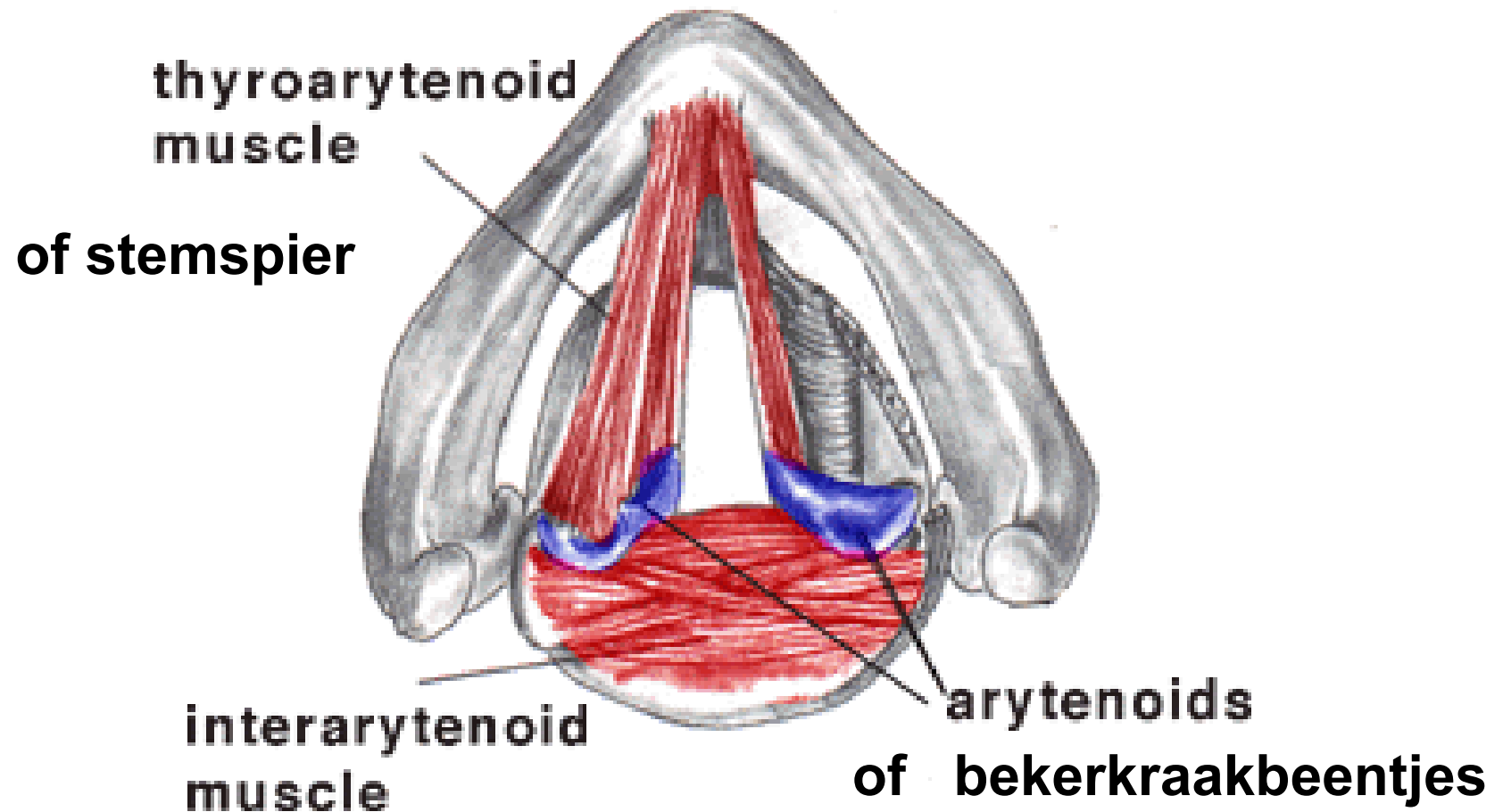
**Strottenklep**

**Valse stemplooiën**

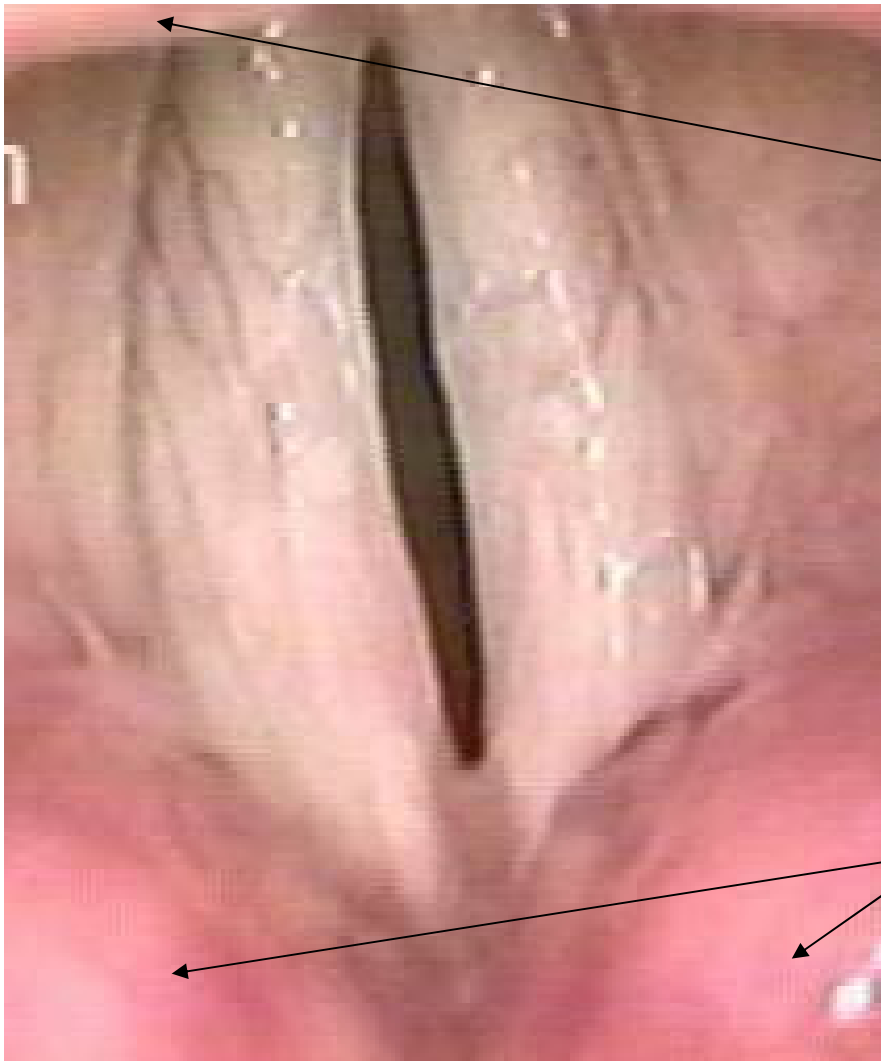
**Ware stemplooiën**

**Luchtpijp**

## Bovenaanzicht van het strottenhoofd met belangrijke stemspieren







**Bovenaanzicht van  
de stemplooiën**

**Rand strottenklep**

**Voor**



**Achter**

**Bekerkraakbeentjes**



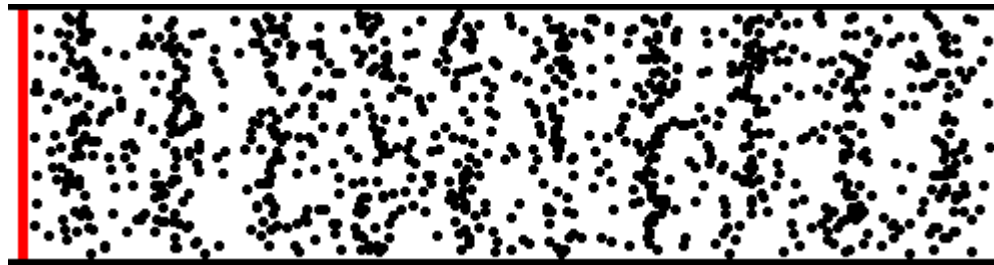
# Bernoulli-effect

*Door stroming neemt de druk af.*

- 1) Stemplooiën openen door ademdruk
- 2) Luchtstroom door de stemplooiën
- 3) Door stroming neemt druk tussen de stemplooiën af
- 4) Stemplooiën drukken de spleet weer dicht.

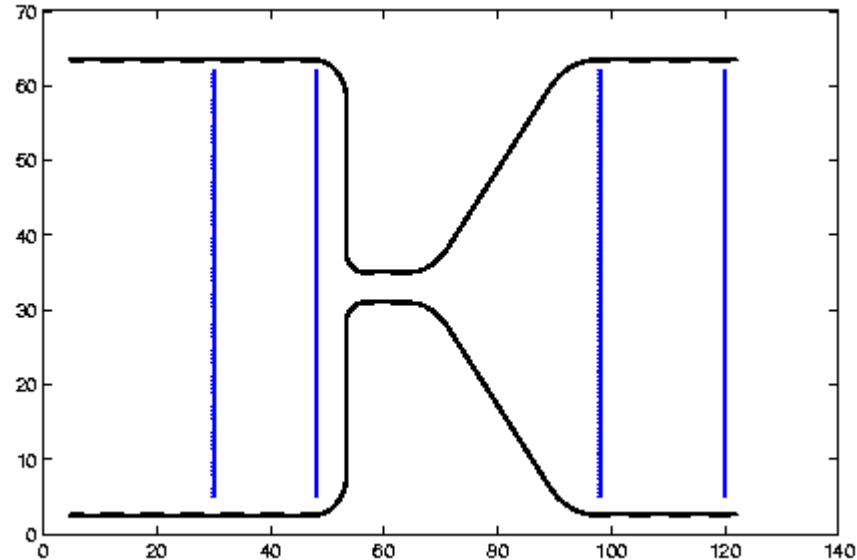
# Stembron creëert geluiddruk golf

- demonstratie van longitudinale golfvorm



# Model van stemplooibeweging en snelheidsveld

- Demonstratie



## Stem: toonhoogte (grondfrequentie)

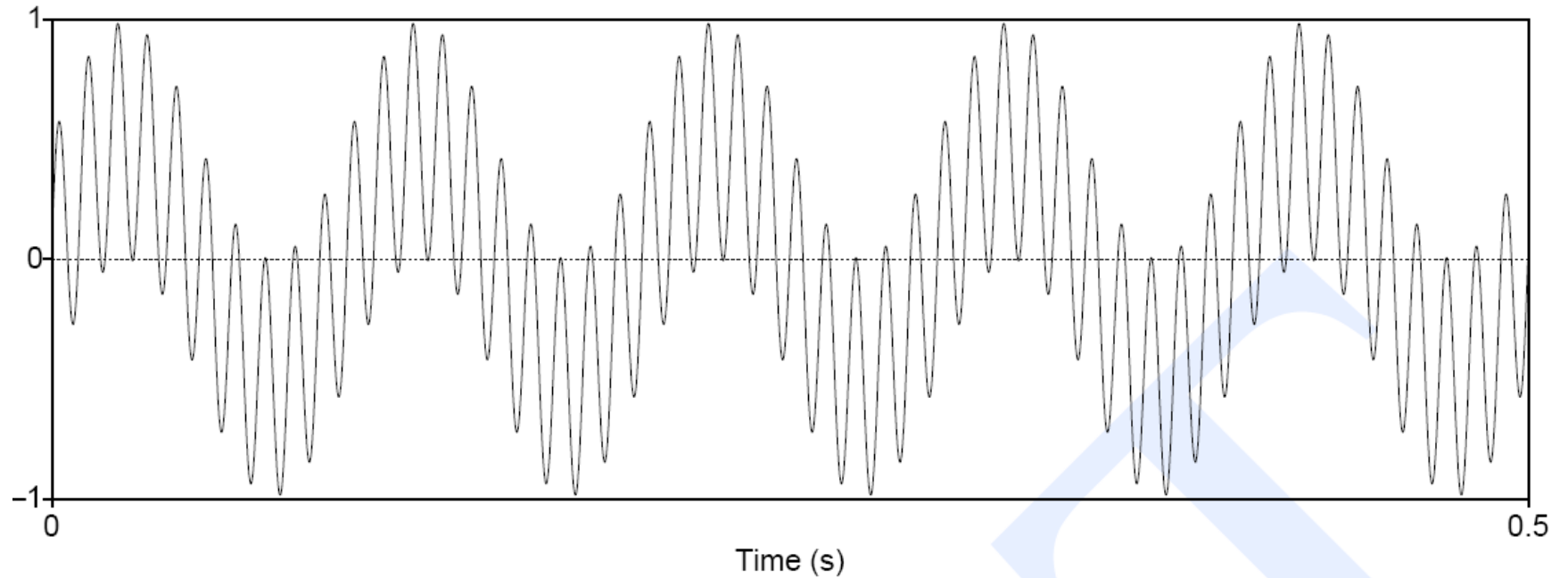
Grondfrequentie wordt fysisch bepaald door het aantal maal dat de stemplooiën open en dicht gaan per seconde (Hz)  
→ *waarneming* als toonhoogte

	omvang	spreken
mannen	60 - 600	~ 120
vrouwen	120 - 1500	~ 240
kinderen	200 - 3000	~ 360 Hz

# Brongeluid voor spraaksynthese

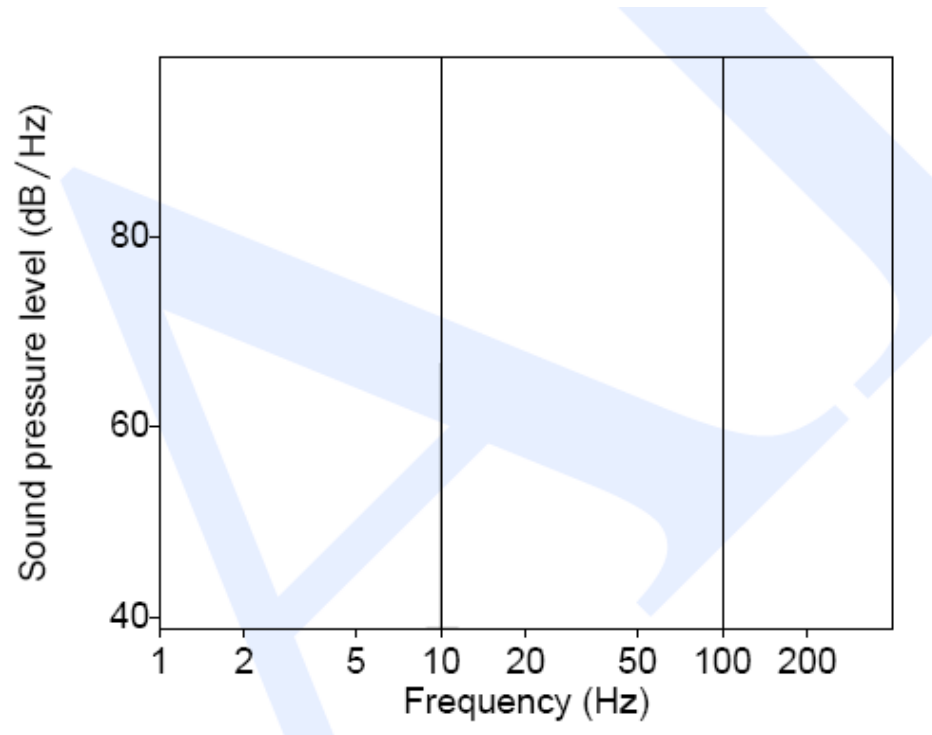
- Stemplooitruilling
  - regelmatig (bv klinkers)
  - stemhebbend
  - >Pulsreeks
- Turbulenties door nauwe opening
  - onregelmatig (bv f en s)
  - stemloos
  - >Ruis

# Golfvorm en frequenties



Golfvorm samengesteld uit twee basisgolven, één van 10 Hz en één van 100 Hz

# Frequentiespectrum



Spectrum van twee basisgolven, één van 10 Hz en één van 100 Hz

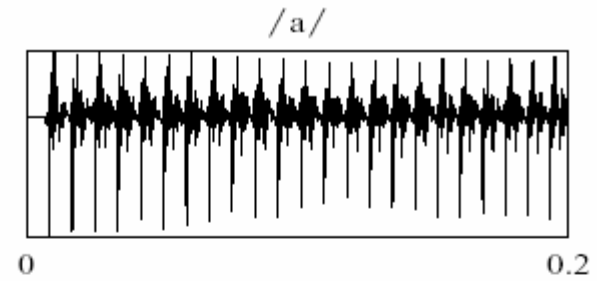


# spraakklanken

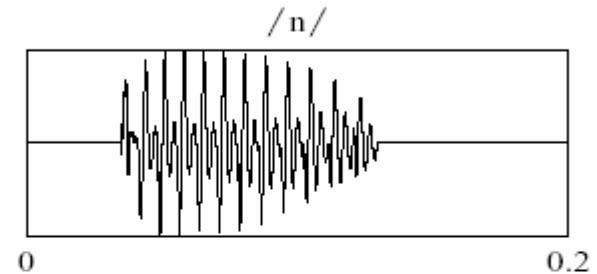
- Golfvorm is opgebouwd uit heel veel basisgolven met ieder een eigen frequentie
- Als frequenties willekeurig zijn noemen we het **ruis**
- Als frequenties regelmatig zijn, noemen we het geluid **periodiek**
  - periodiek: bijvoorbeeld omdat de stemplooiën regelmatig trillen.

# golfvormen van spraak

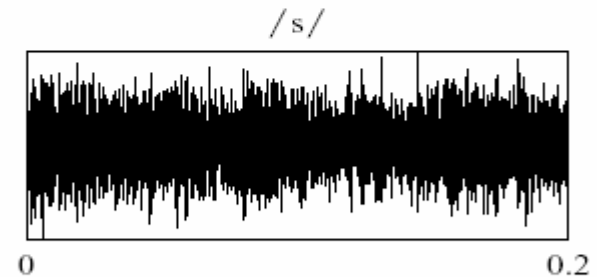
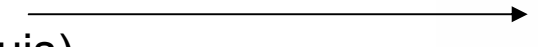
Klinkers  
(periodiek)



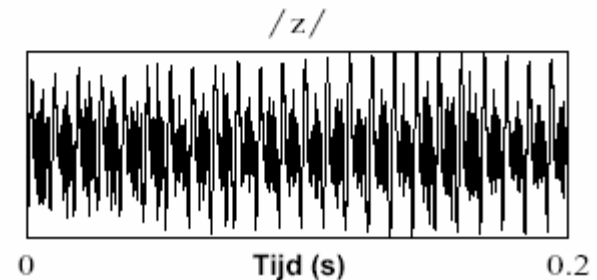
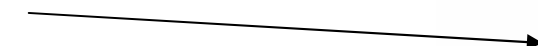
Nasalen  
(periodiek)



Fricatieven  
(stemloos, ruis)



Fricatieven  
(stemhebbend, periodiek, ruis)  
[plosieven, tweeklanken]



## Periodieke klanken

- Per stemplooi trilling herhaalt het zelfde proces zich
- Stemplooifrequentie = grondtoonfrequentie
- De verandering in grondtoon vormt de melodie

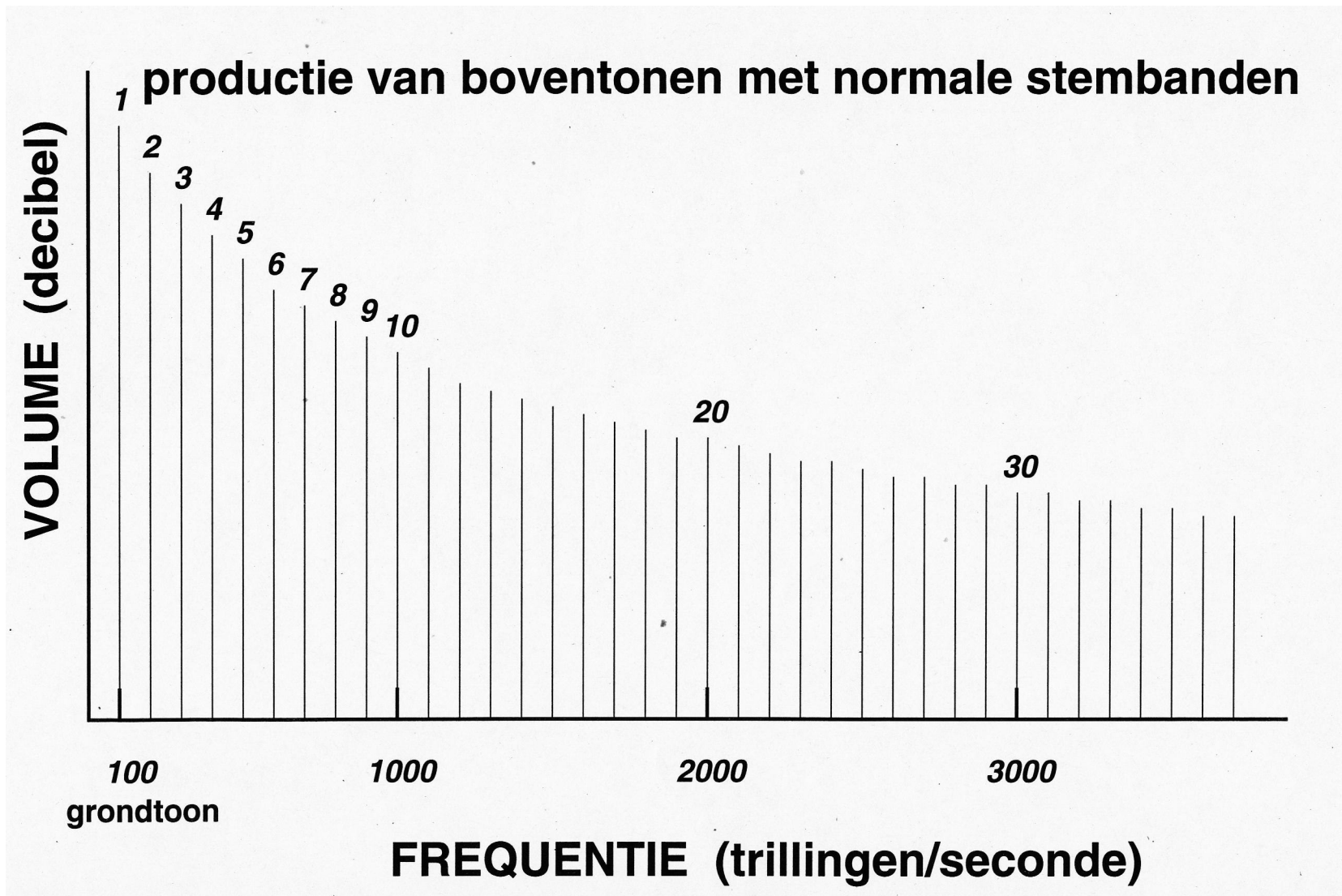
## Grondtoon en boventonen (harmonischen)

- Naast grondtoon wordt ook een reeks boventonen geproduceerd
- Frequentie van boventoon is veelvoud van die van de grondtoon  
 $n = 2, 3, 4, 5, 6, \dots$

$$F_0 = 100 \text{ Hz}$$

boventonen: 200, 300, 400, 500, ...5000

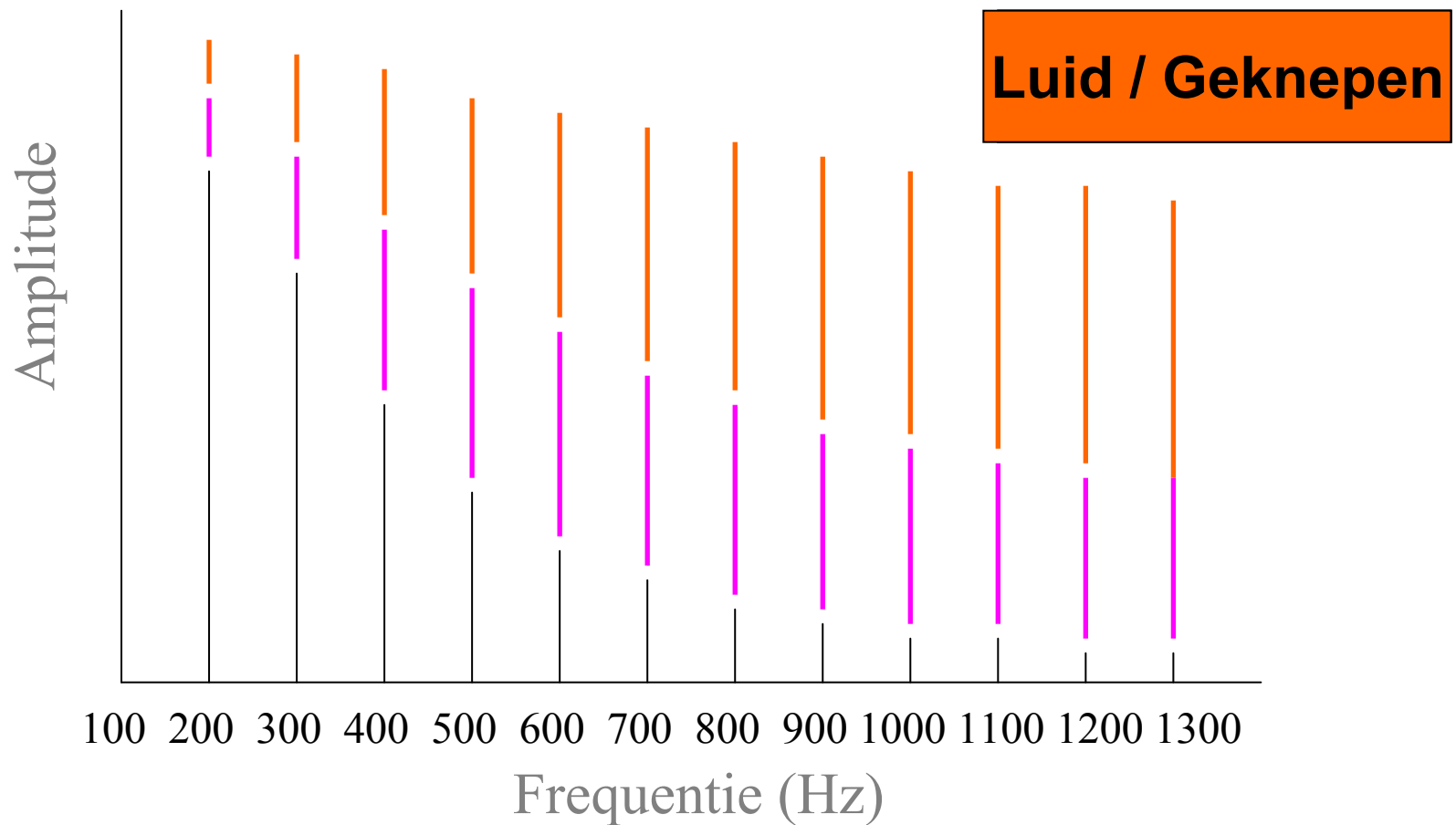
# spectrum van stembron



## Bronspectrum en stemplooitrilling

- De sterkte van de boventonen hangt af van de manier waarop de stemplooiën sluiten
  - zwak (zacht, falsetto)
  - normaal
  - krachtig (luid)

# Frequentiespectrum van de stem





## Stem: luidheid

Wordt bepaald door hoe **abrupt** de stemplooiën keer op keer sluiten (vorm van de stemplooiënpuls, komt later)

Ook articulatie speelt een rol  
(bespreken we later)

Varieert tussen 45 dB en 120 dB  
(op 30 cm van de mond )

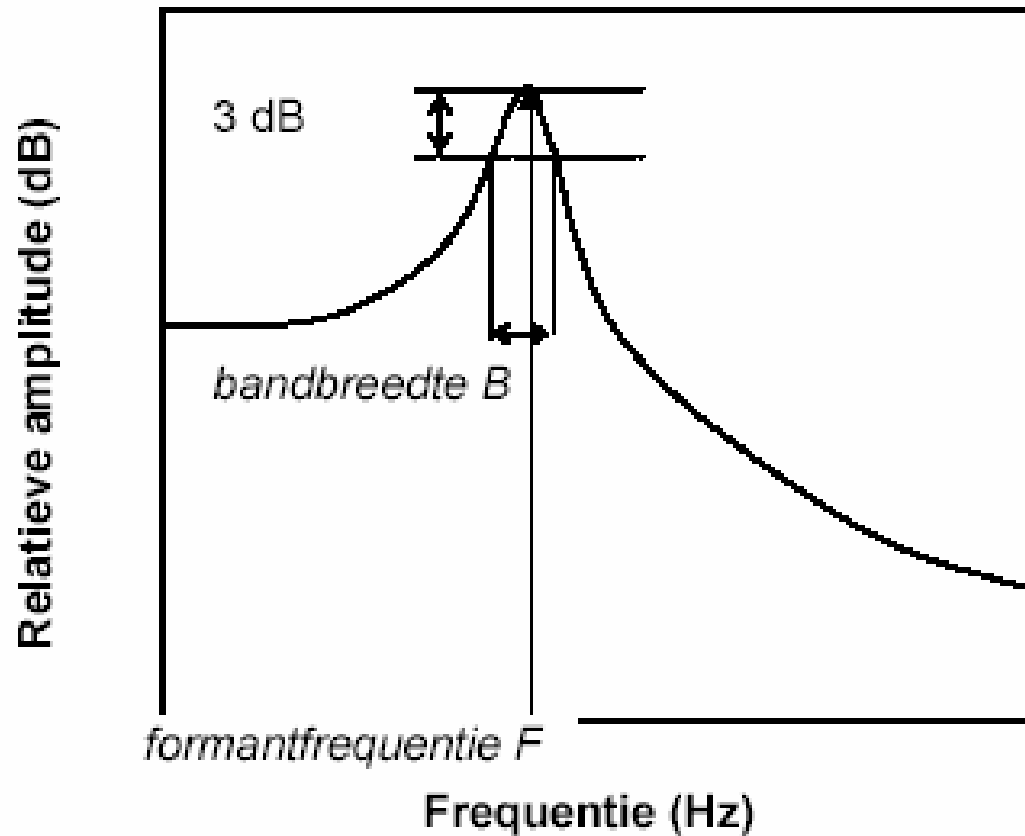
# Resonantie

- Stemweg is een ingewikkelde resonator
  - eigenschappen afhankelijk van de vorm (articulatie)
- Wat doet een resonantie?
  - behoud (akoestische) energie rond een bepaalde frequentie
    - vergelijk een schommel:
      - op het juiste moment beetje duwen -> steeds hoger
      - op verkeerde momenten duwen -> gebeurt bijna niets

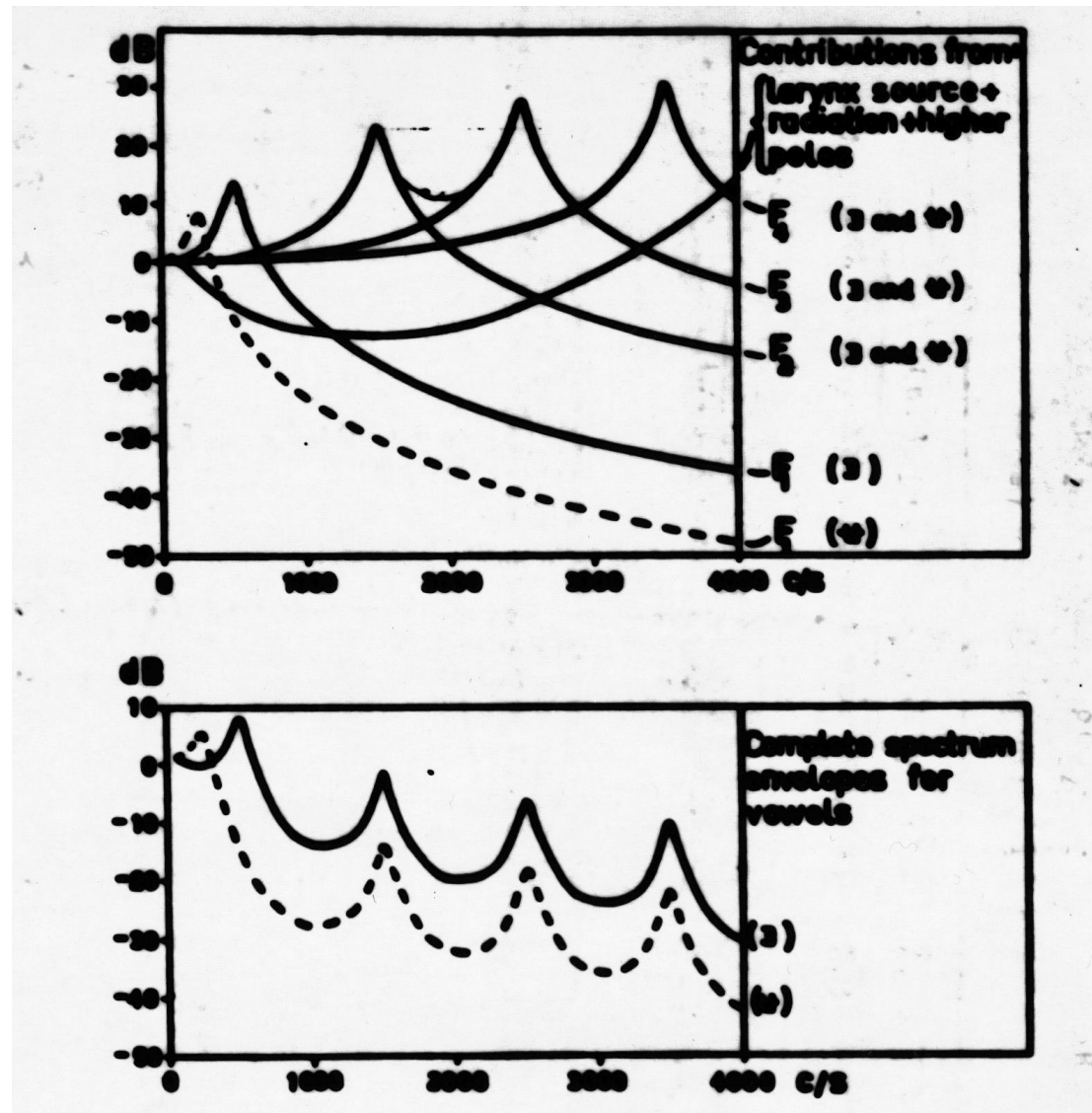
# spraakresonantie

- Stemplooi drukploffjes (grondtoon en boventonen) zijn “duwtjes”
- Stemweg zijn resonatoren
  - Hoe groter de resonator, hoe lager de resonantiefrequentie (vgl lengte van schommel)
  - Ongeveer 5 resonanties (formanten) in stemweg

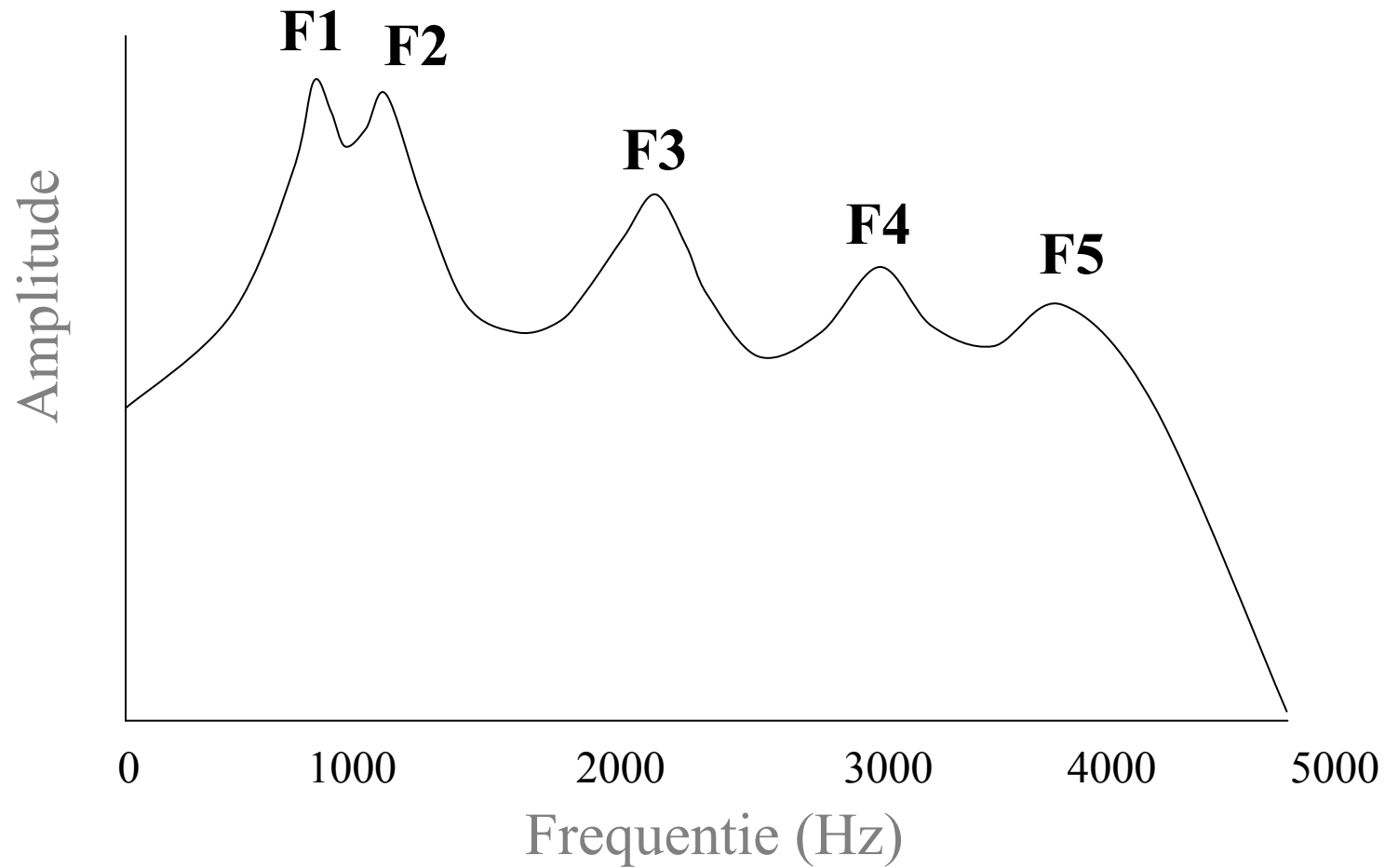
# frequentieoverdrachtsfunctie van een formant



# meerdere formanten samen



# 5 formanten in spraak



## Let op!

- Formanten (en hun frequenties) zijn **eigenschappen van de stemweg**
- Zijn ***onafhankelijk*** van wat er in de **stembron** gebeurt
  - Is kern van de akoestische theorie van spraakproductie (Gunnar Fant)



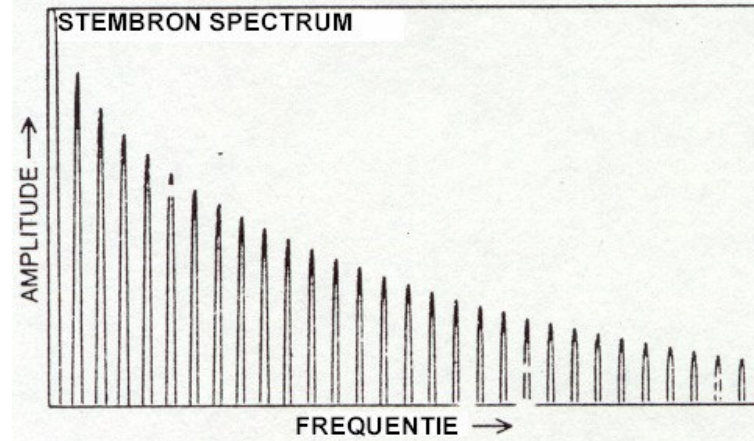
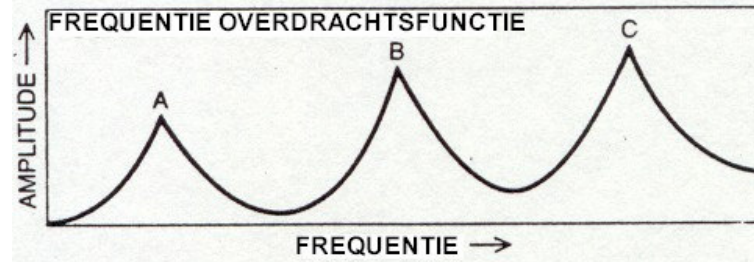
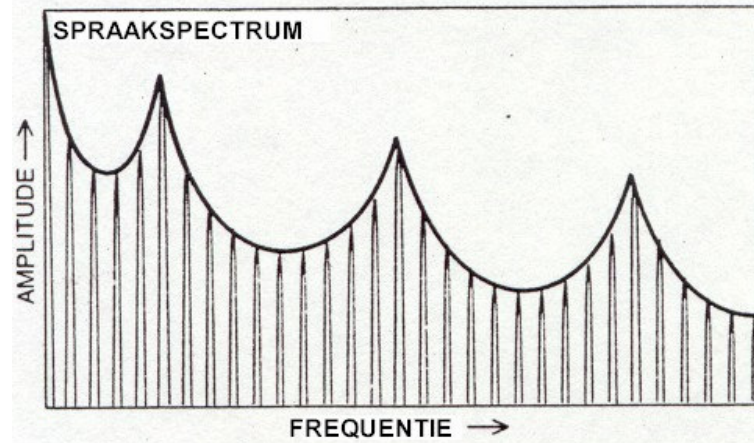


**SPRAAK  
GELUID**

**SPRAAK  
KANAAL**

**TRILLENDE  
STEMPLOOIEN**

**LUCHTDRIK IN  
LONGEN**



## Articulatie

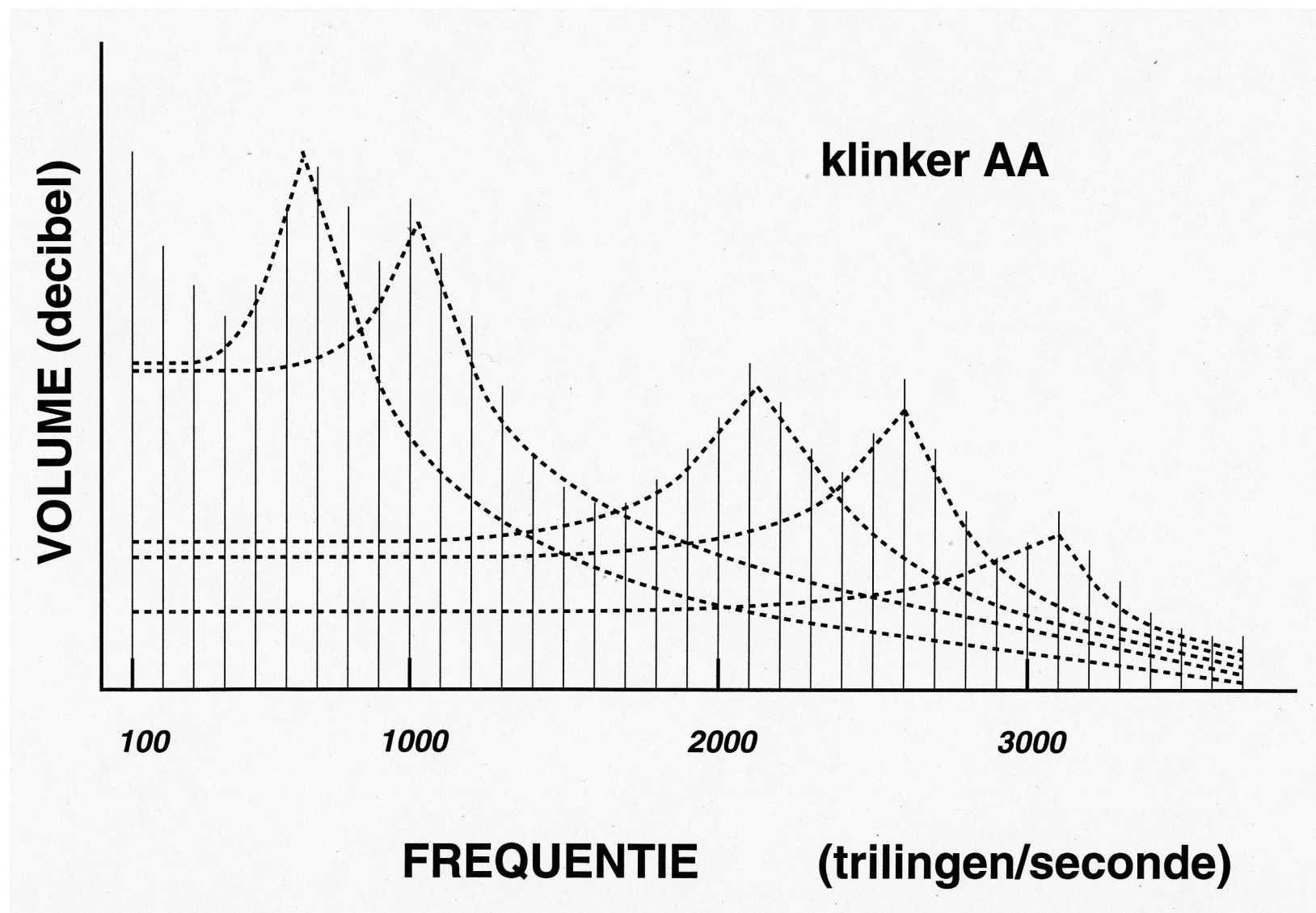
Door articulatie wordt de vorm en inhoud van de mond-keelholte veranderd.

De resonantie eigenschappen van de mond-keelholte veranderen daarmee.

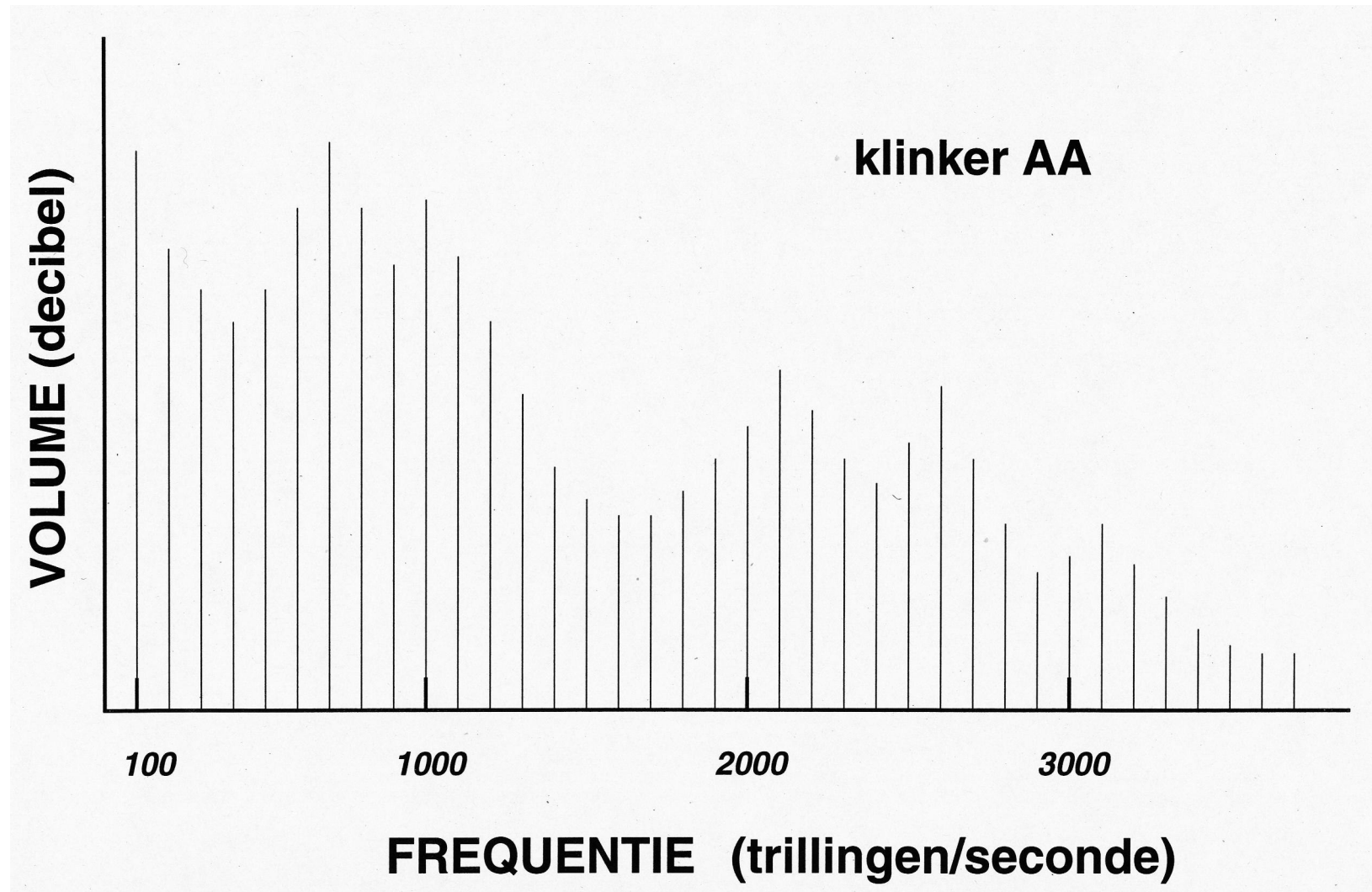
Formantfrequenties veranderen.

# demonstratie buizen

# formanten en spectrum van /a/

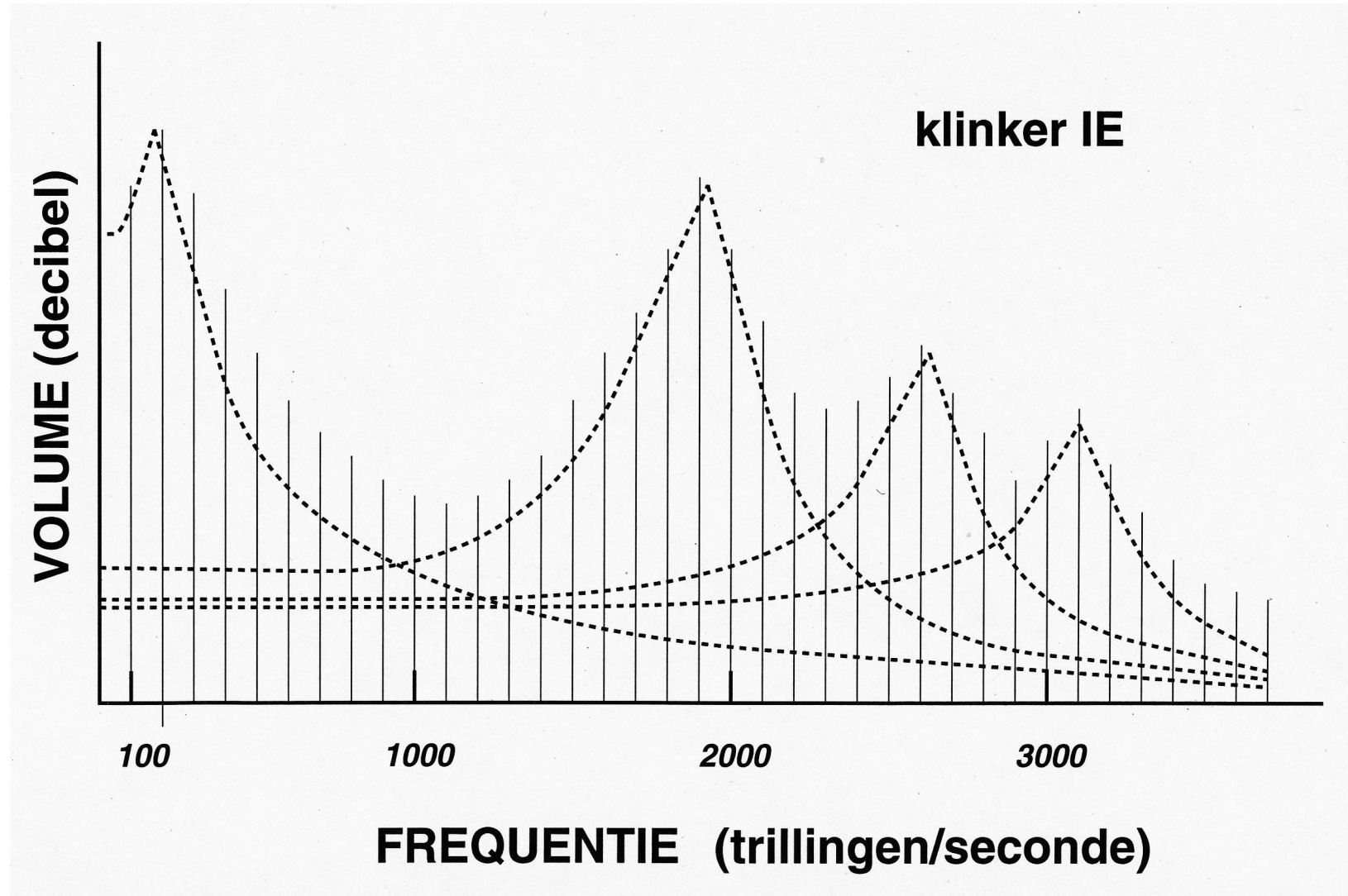


het gemeten frequentiespectrum:  
je ziet de formanten niet zo precies

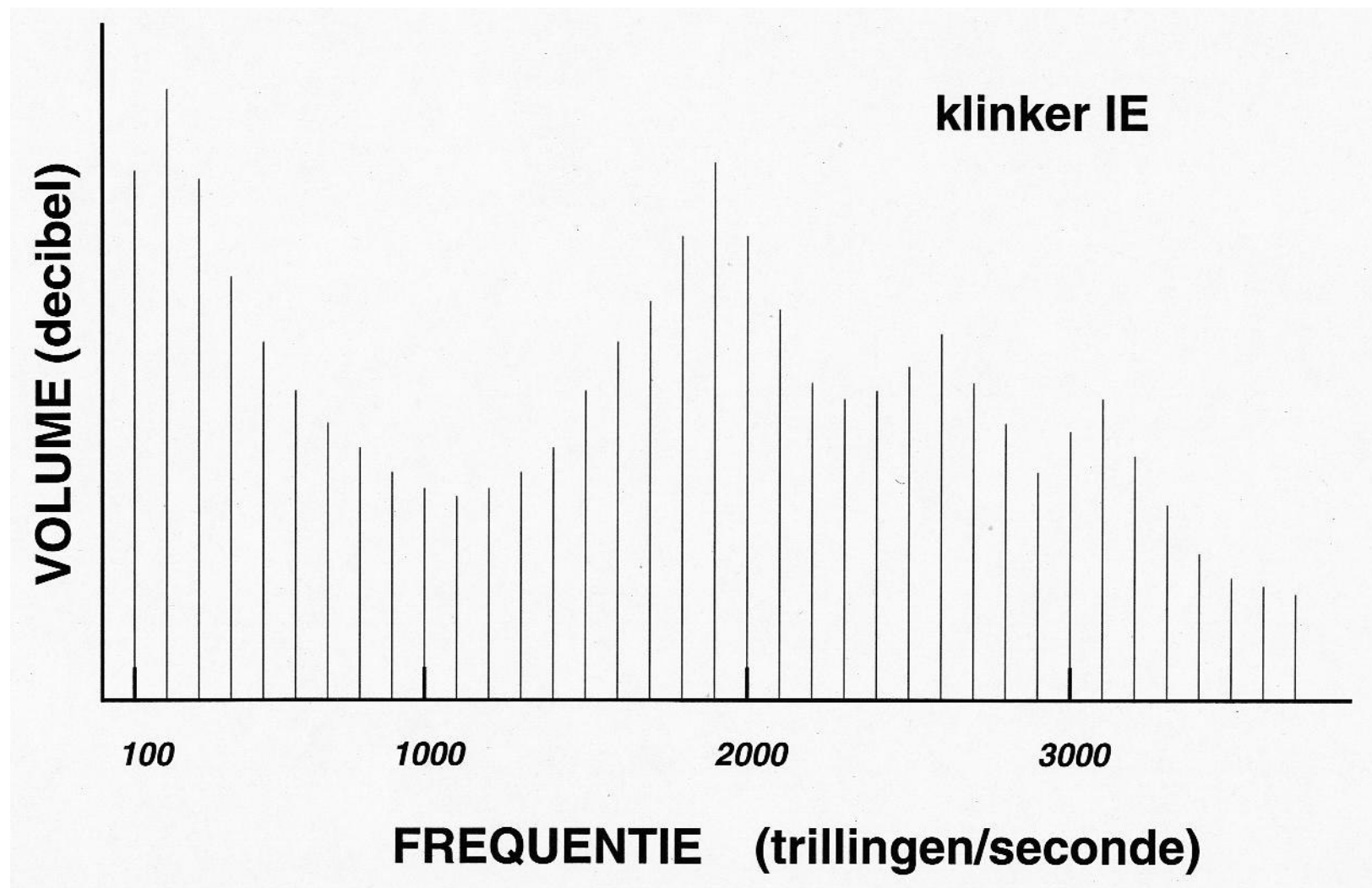




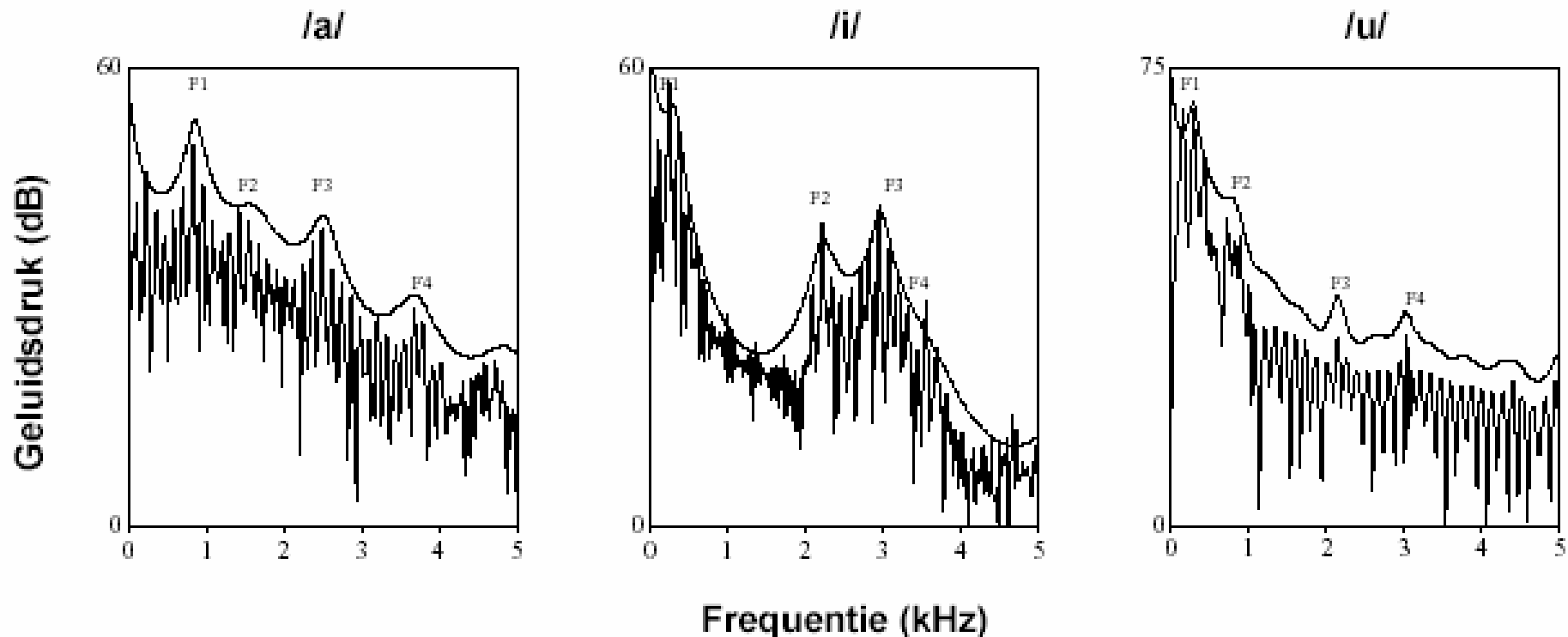
# formanten en spectrum van /i/



# frequentiespectrum van /i/



# echte klinkerspectra met door computer berekende omhullende



Waar is de grondfrequentie?

Hoeveel boventonen/harmonischen zie je tussen 0-1000 Hz?

Zou je zonder de getekende omhullende de formanten kunnen aanwijzen?

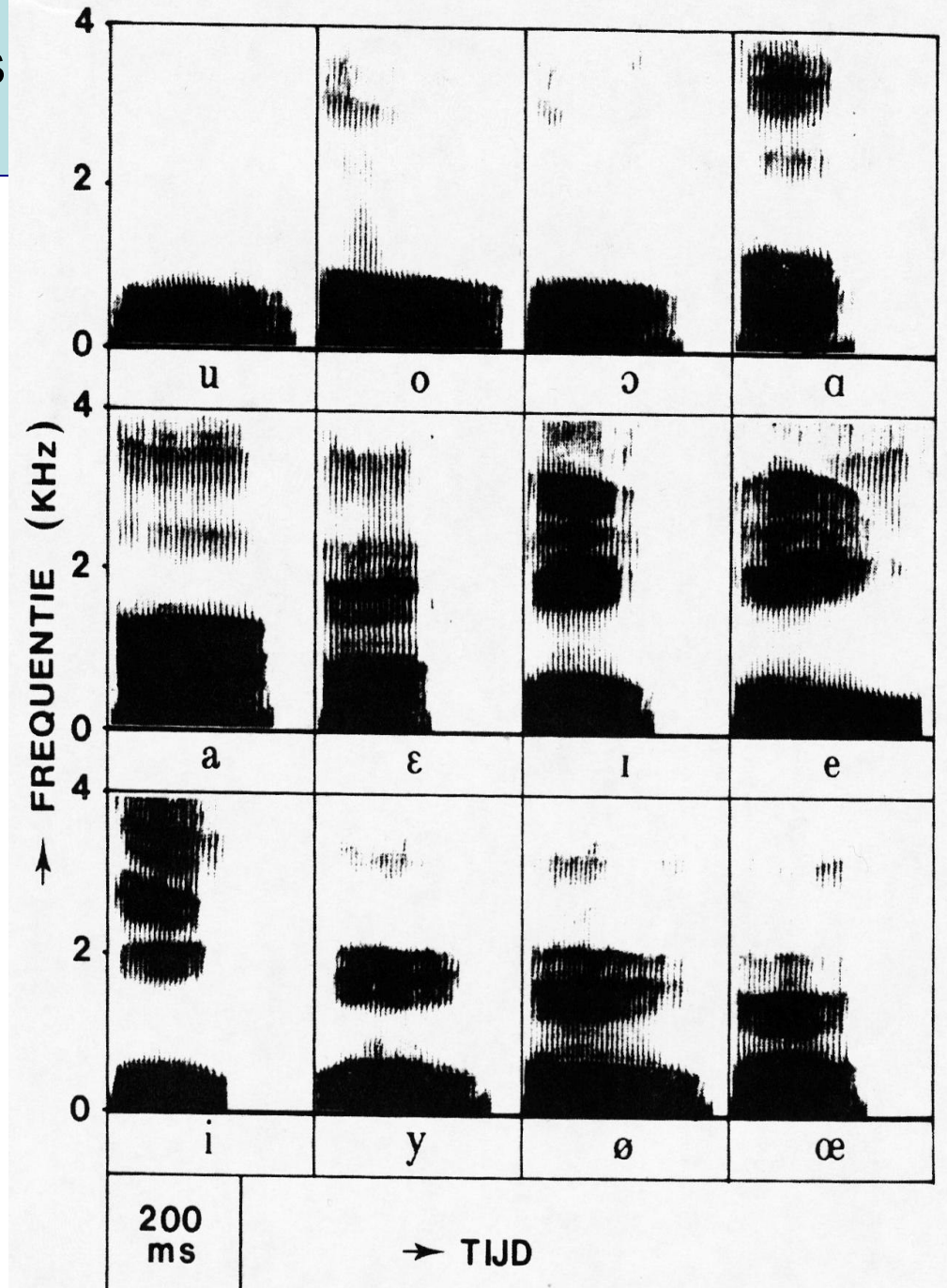


## Ons oor

- “herkent” pieken in het spectrum, en leidt daaruit een klinker af
- bij (automatische) spraakherkenning moeten we iets dergelijks doen!
- ook stemloze klanken hebben formanten!



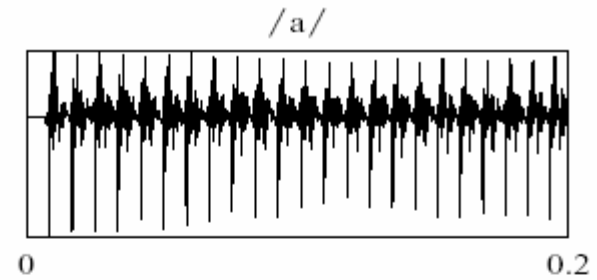
# Spectrogrammen van klinkers



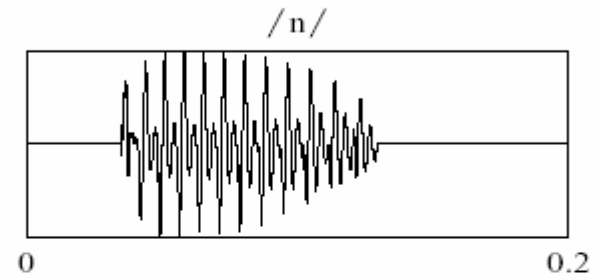
# EIGENSCHAPPEN VAN SPRAAKKLANKEN

# golfvormen van spraak

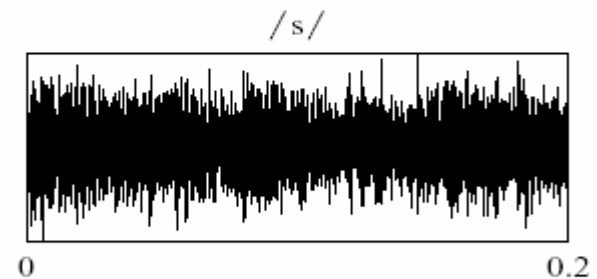
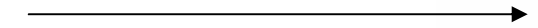
Klinkers  
(periodiek)



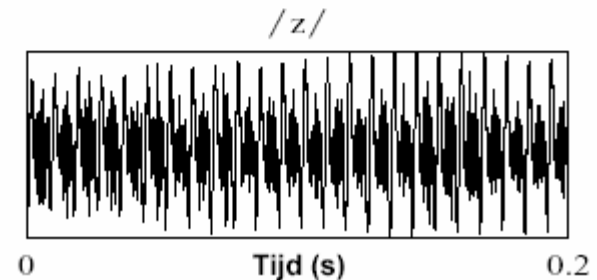
Nasalen  
(periodiek)



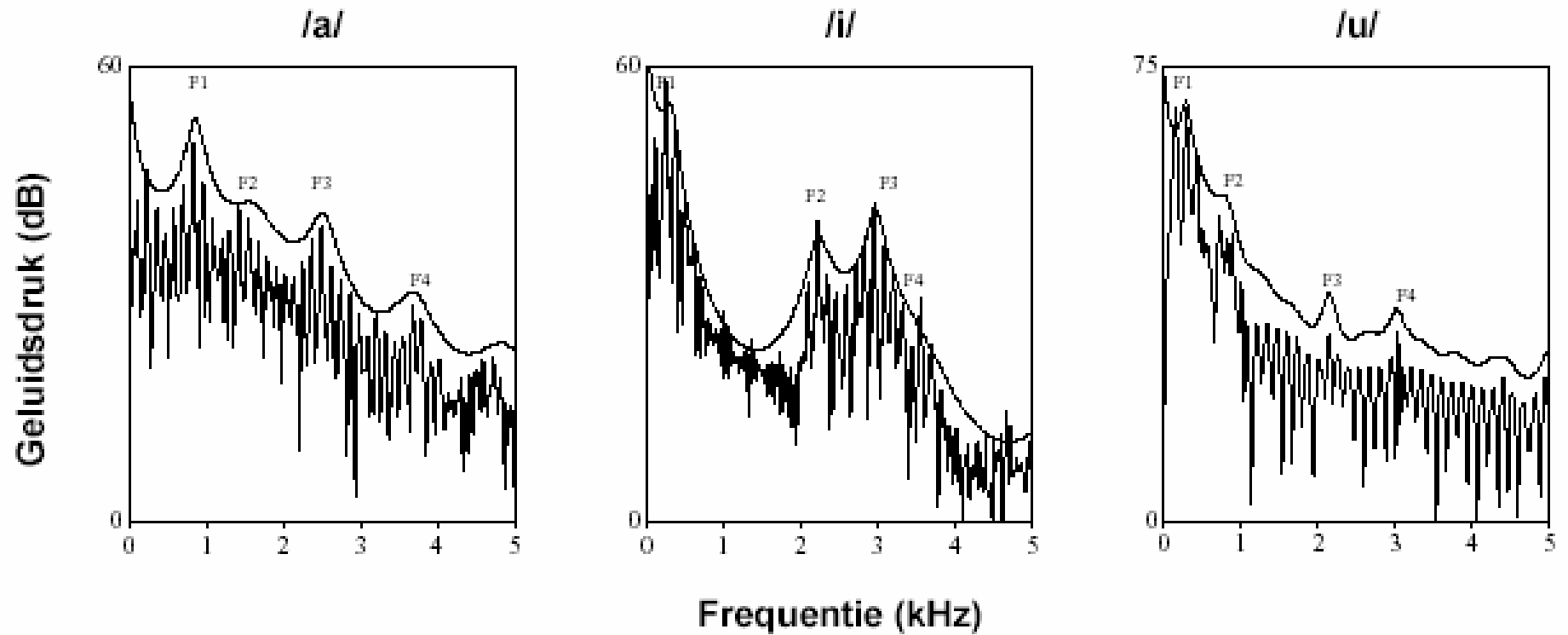
Fricatieven  
(stemloos, ruis)



Fricatieven  
(stemhebbend, periodiek, ruis)  
[plosieven, tweeklanken]



# klinkerspectra

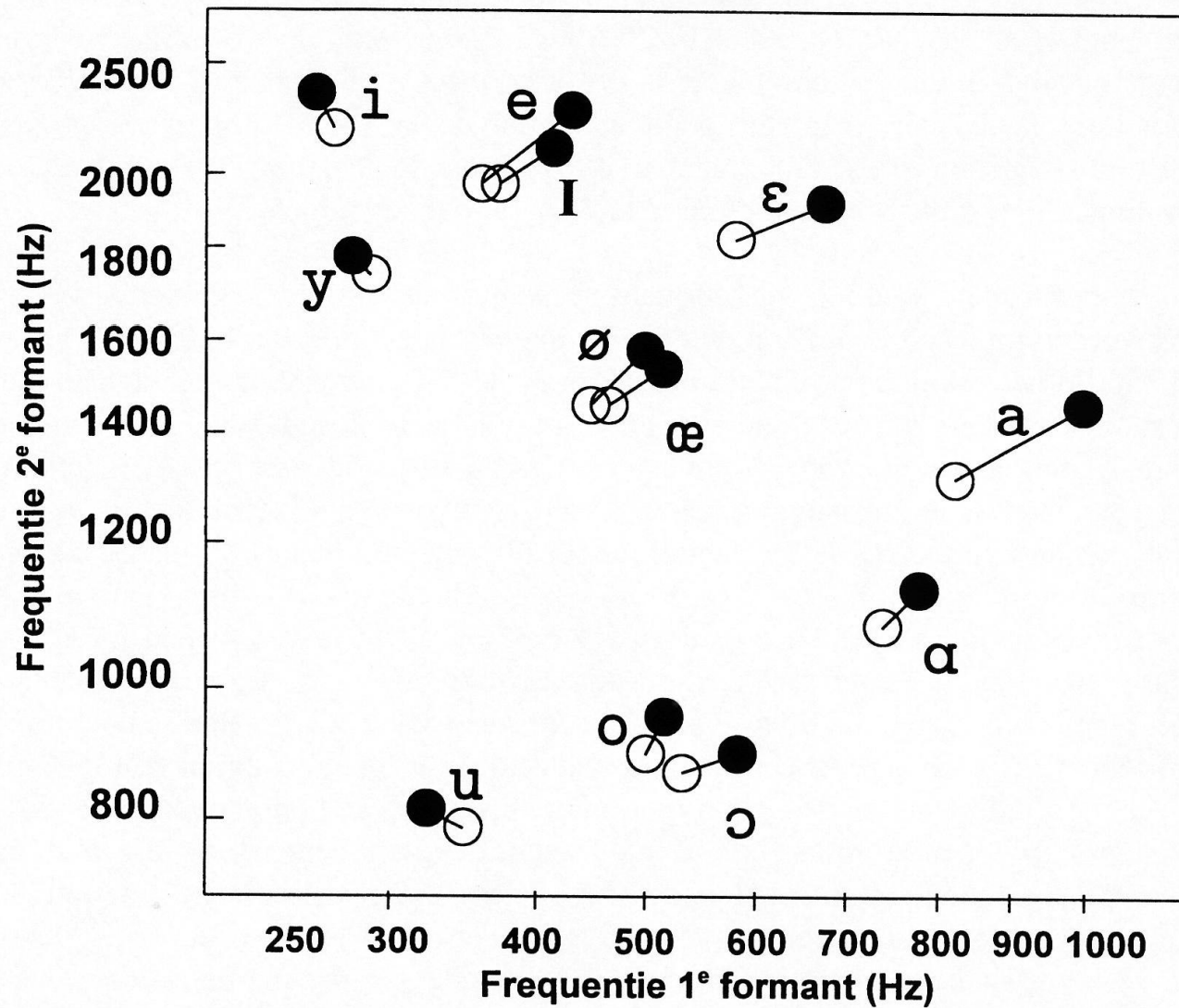


# Formantfrequenties van klinkers

	F1	F2
• /a/	~600	~1200
• /i/	~300	~2200
• /u/	~300	~600

Grafisch -> formantvlak

# Formantvlak $F_1 - F_2$

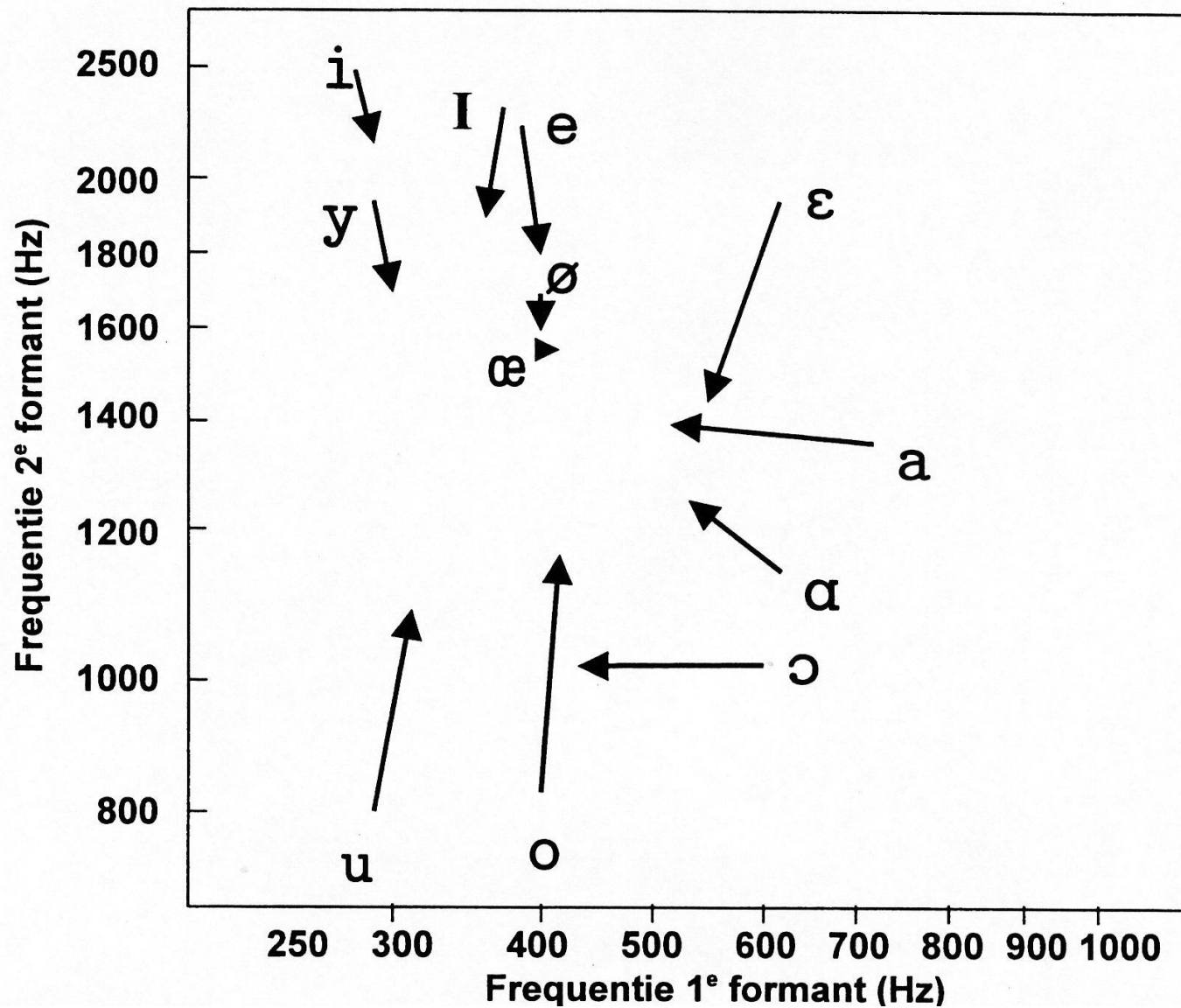


Open: mannen  
Gesloten: vrouwen

~15% verschil

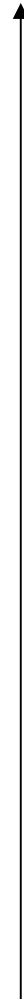


# Klinkerreductie bij slordige spraak



# Ruwe relaties formanten en articulatie

- Eerste formant
- Tweede formant
- Derde formant
- Vierde en vijfde formant

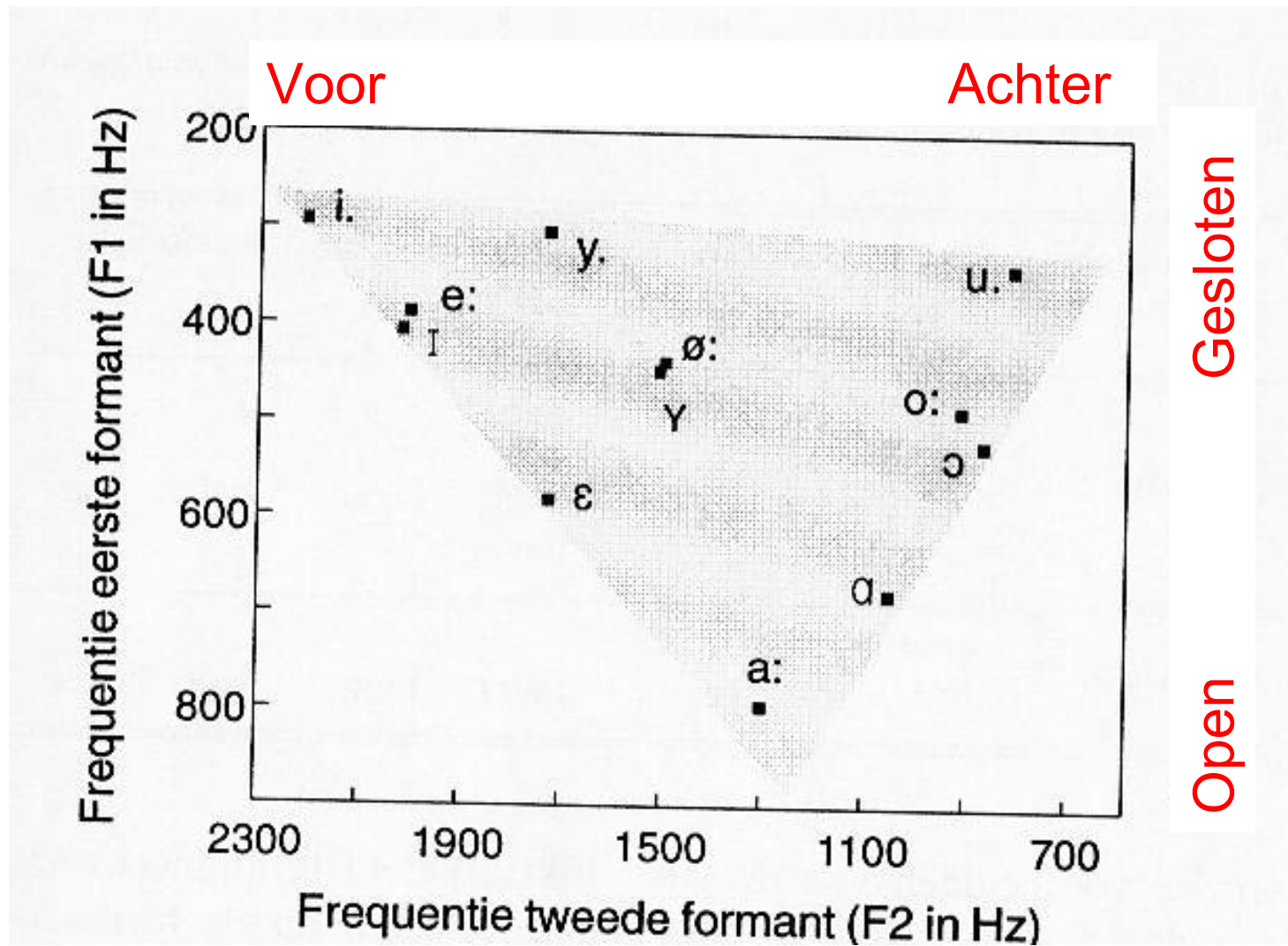


GROOT VOLUME

- Mondopening
- Plaats van tongvernauwing
- Liprondding en ruimte achter de lippen, keelholte
- Kleine holtes

KLEIN VOLUME

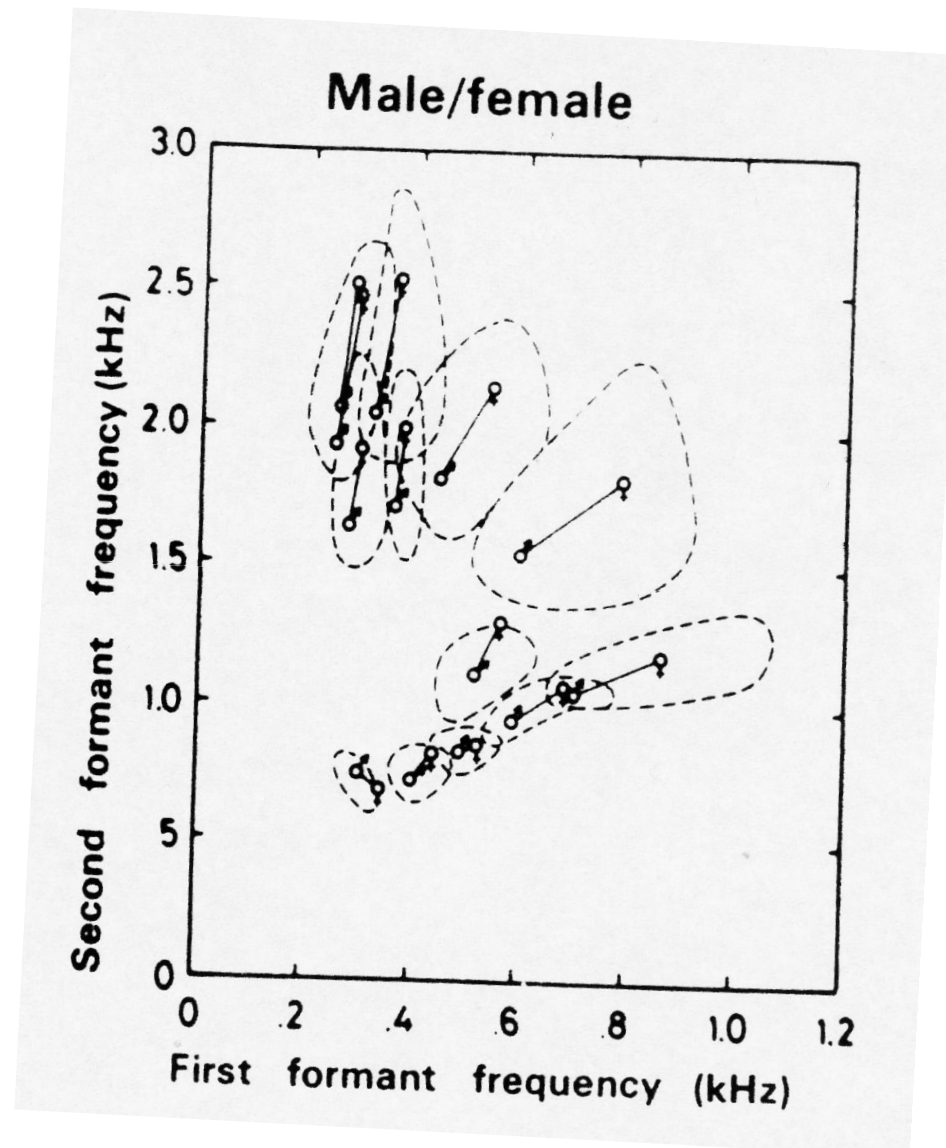
# Plaats van articulatie en formantvlak



# Formanten en **LENGTE** van stemweg

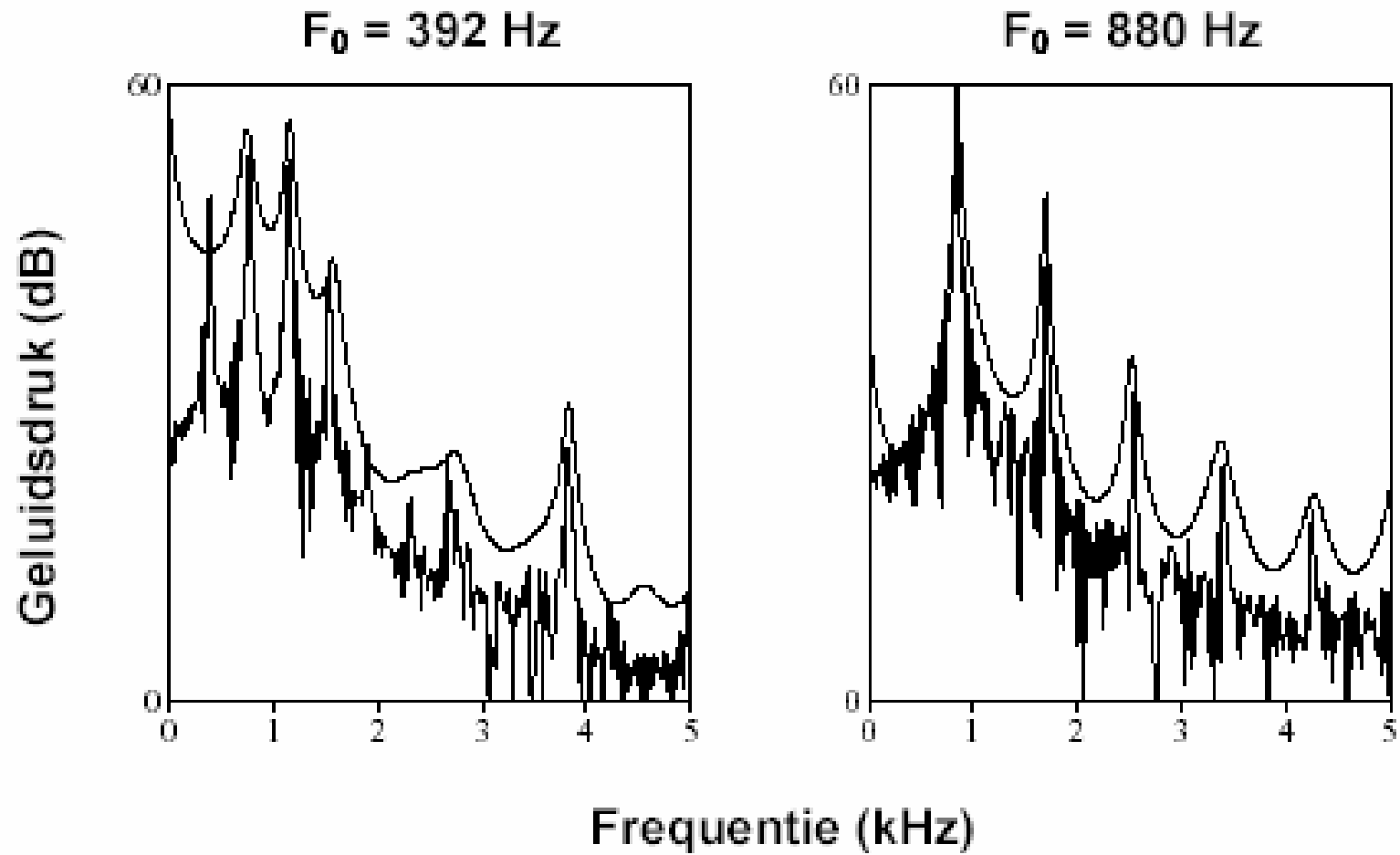
- Hoe korter de stemweg, hoe hoger alle formantfrequenties
- Lengte
  - Vrouwen ~17 cm
  - Mannen ~19 cm
- 10% hogere  $F_n$  voor vrouwen
- Analoog voor kinderen
- Maar ook tussen bassen en tenoren
- Minder tussen alten en sopranen

# Formantverschillen tussen mannen en vrouwen



# Klinker, klankkleur, verstaanbaarheid

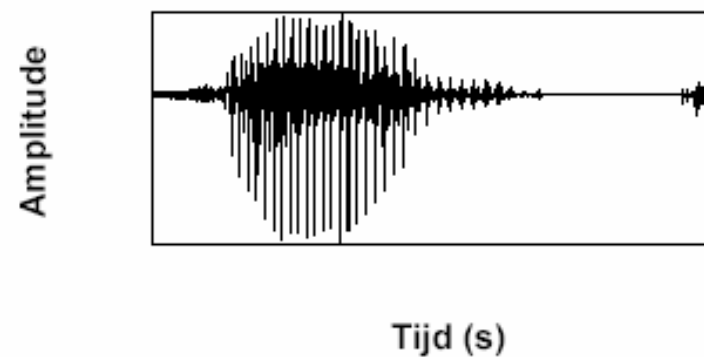
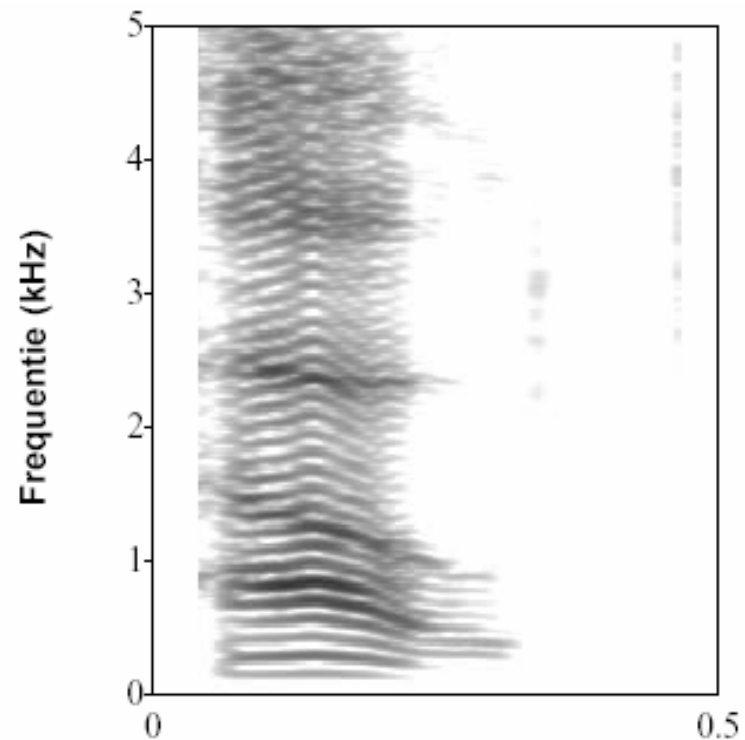
# /a/ op verschillende toonhoogten



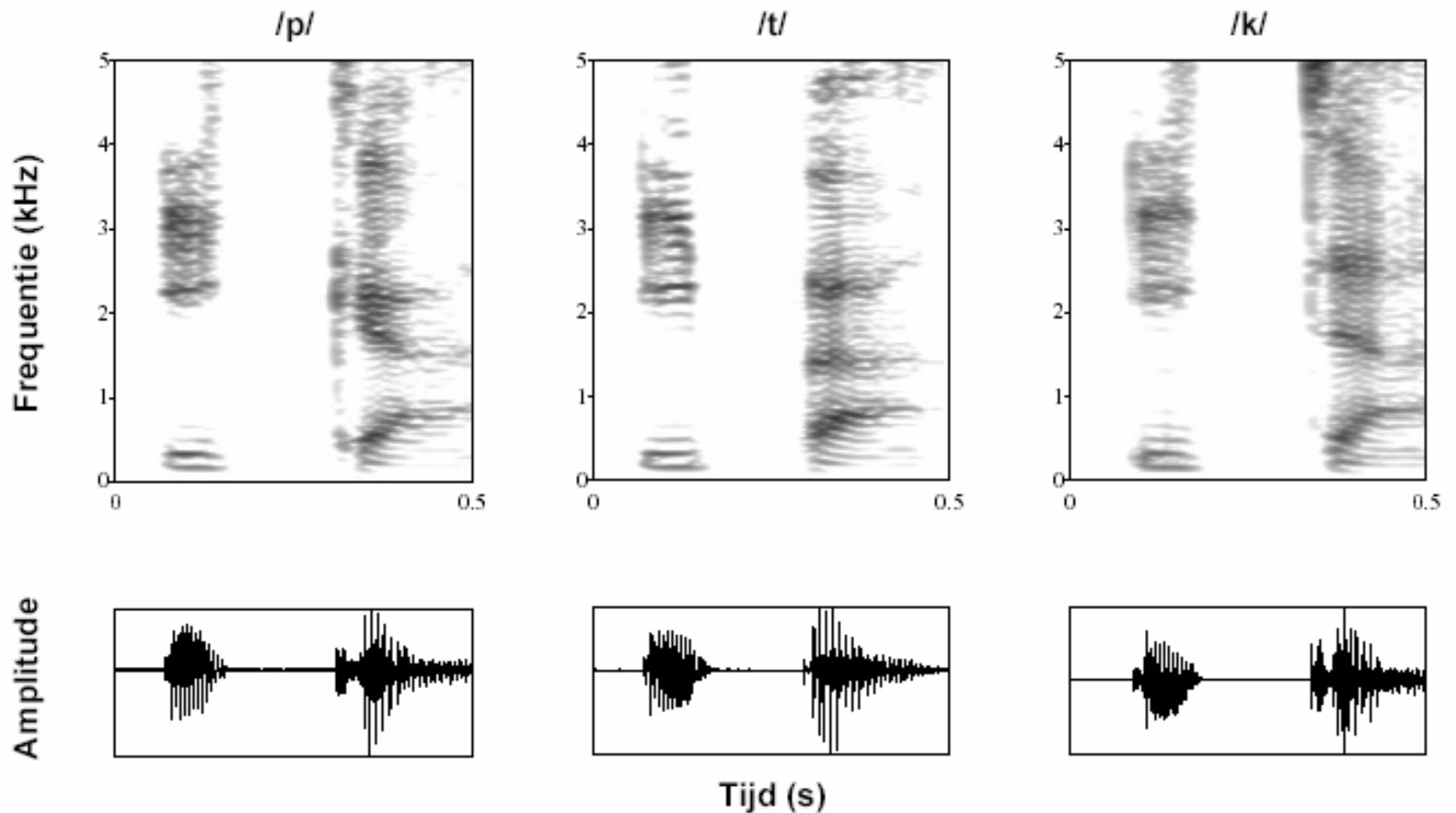
# Meer spraakklanken



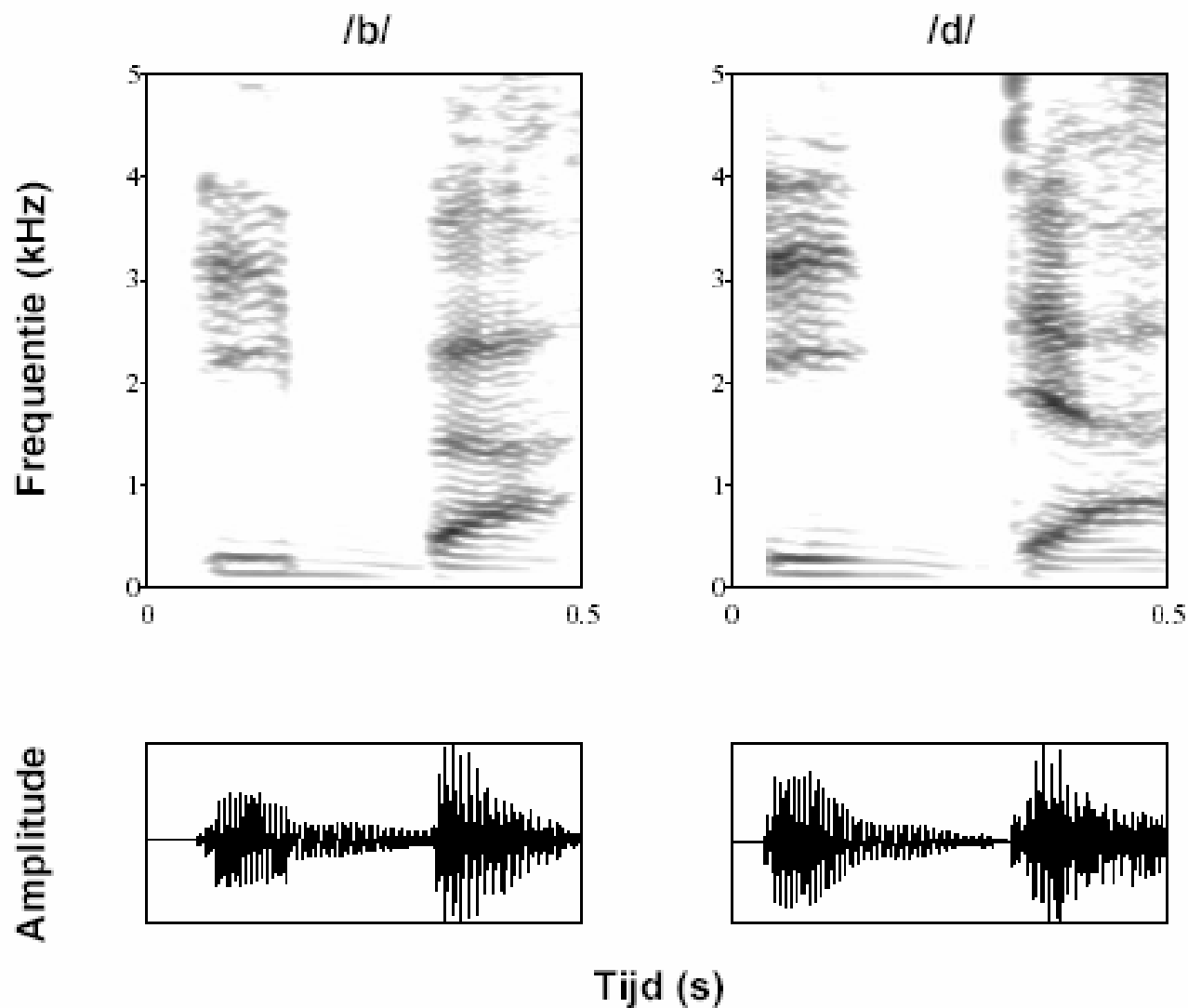
# Tweeklank: Spectrogram van /Ei/



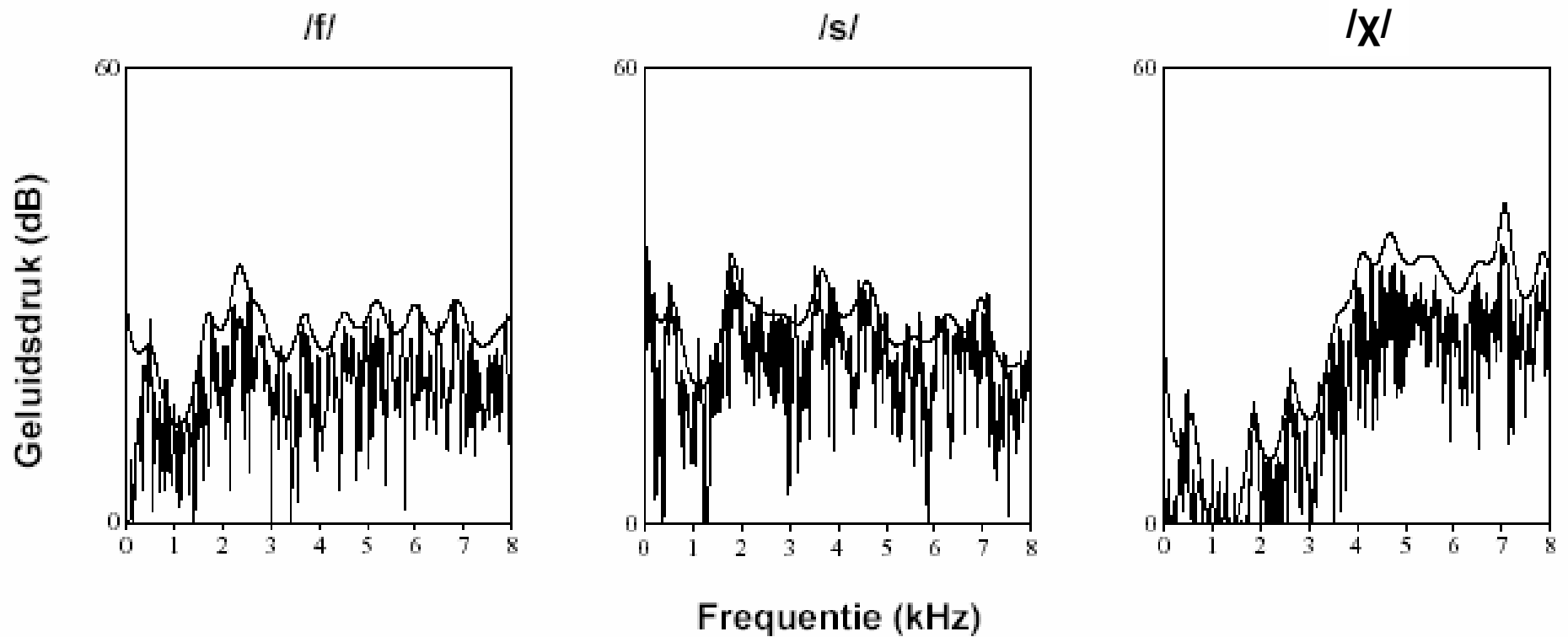
# spectrogrammen van de stemloze plosieven: Plosief+/a/



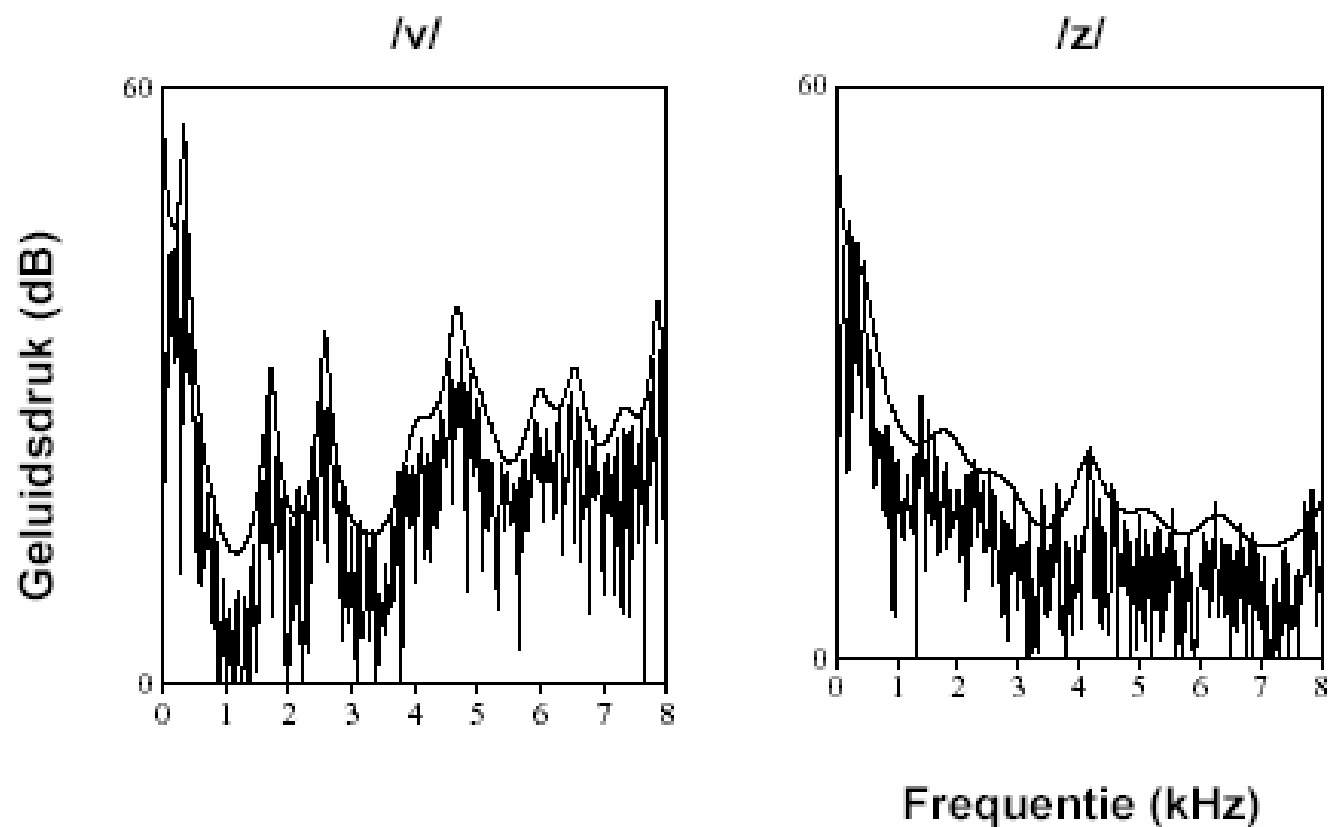
# spectrogrammen van de stemhebbende plosieven



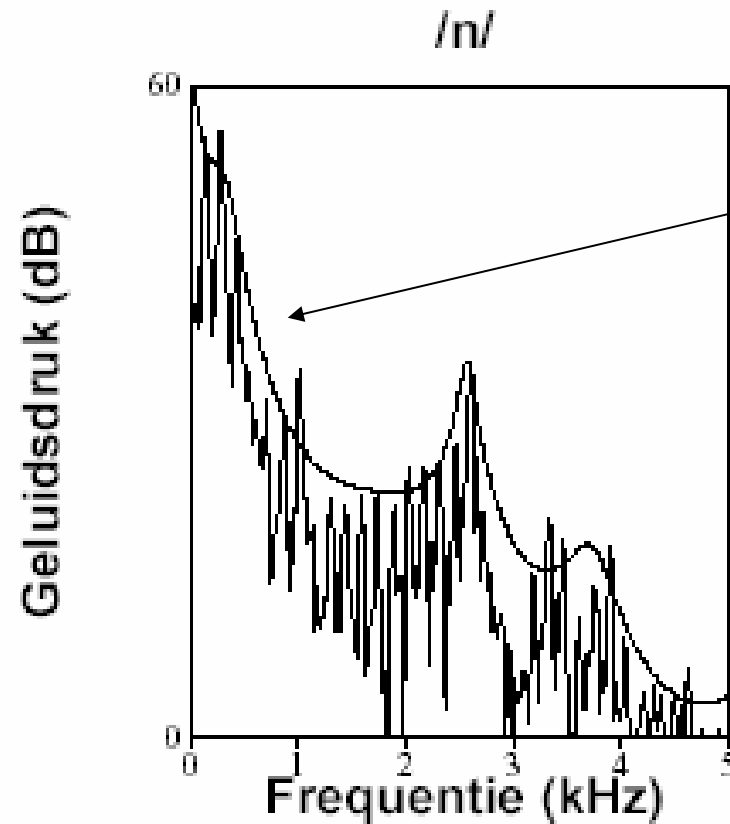
# spectra van stemloze fricatieven



# spectra van stemhebbende fricatieven



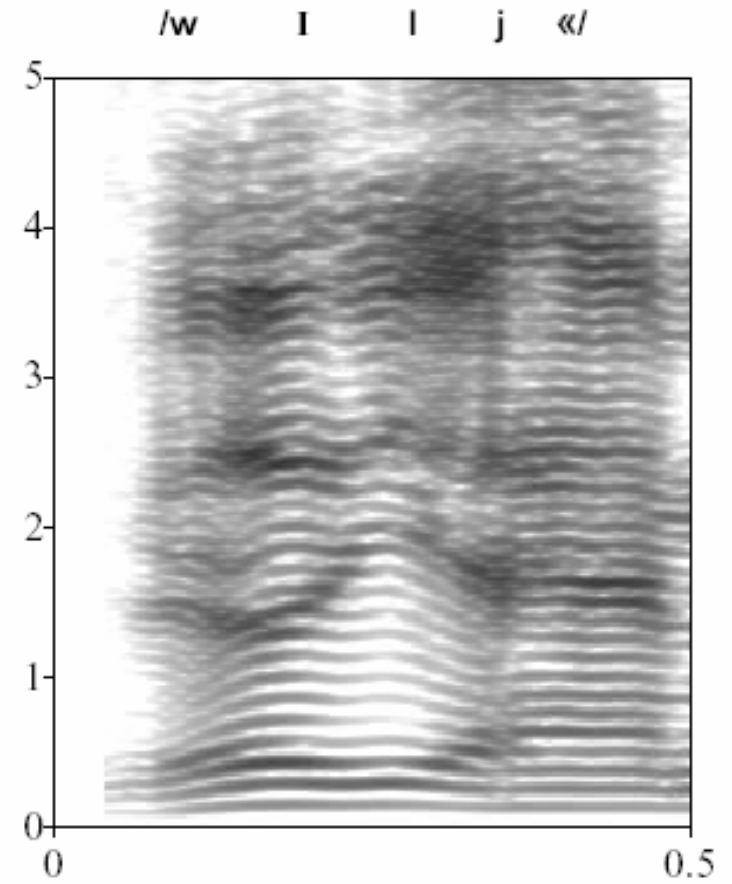
# spectrum van /n/



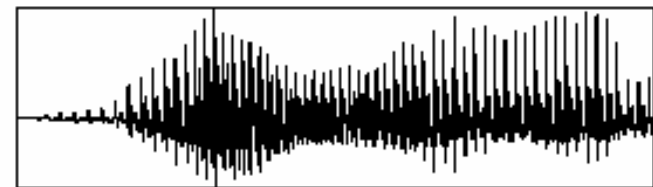
Door **anti-resonantie**  
verzwakt de eerste  
formant sterk

# spectrogram van halfvokalen

Frequentie (kHz)



Amplitude



Tijd (s)