

Akustische Phonetik

Teil 2

Uwe Reichel, Phil Hoole
IPS, LMU München

Inhalt

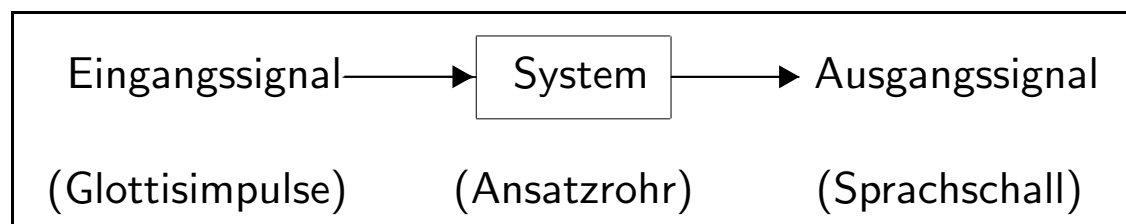
- Quelle-Filter Theorie
- Quelle
 - Arten der Rohschallerzeugung
 - Myoelastisch-aerodynamisches Modell der Phonation
- Filter
 - stehende Wellen, Resonanzen
 - Formanten
 - akustische Modelle des Vokaltrakts
 1. Drei-Rohr-Modell
 2. Formantverschieber

Quelle-Filter-Theorie (Fant, 1960)

- Sprachschall: **Rohschall (Quelle)**, der durch einen nachgeschalteten **Resonator (Filter)**, moduliert wird
- **Quelle:**
 - Glottis (stimmhafte Laute)
 - Enge im Artikulationstrakt (sekundär, Frikative)
 - Verschlusssprennung im Artikulationstrakt (Plosive)
 - Kombination von Quellen bei stimmhaften Konsonaten
- **Filter:** Artikulationstrakt (= **Ansatzrohr**)

Exkurs Systemtheorie

- **System:**



- **Systemantwort:**

Umwandlung des Eingangs in das Ausgangssignal.

- Bezogen auf Sprachproduktion:

- Die Glottisimpulse (**Eingangssignal**) versetzen die Luftmoleküle im Ansatzrohr in Schwingungen
- Je nach Stellung der Artikulationsorgane werden bestimmte Frequenzen verstärkt, andere gedämpft (**Systemantwort**).
- Die Systemantwort ist abhängig von den **resonatorischen Eigenschaften** des Artikulationstrakts (= **Ansatzrohr**, s.u.)
- An der Mundöffnung wird Sprachschall abgestrahlt (**Ausgangssignal**).

- Das **Ansatzrohr** wird vereinfachend als ein **lineares zeitinvariantes (LZI) System** beschrieben.
 - **linear**: Wird eine Sinoidalschwingung an das System angelegt, so kann es Phase und Amplitude der Schwingung ändern, nicht aber deren Frequenz.
Entsprechend gilt für komplexe Schwingungen, dass die Frequenzen ihrer Einzelschwingungen unverändert bleiben (**Superpositionsprinzip**).
 - **zeitinvariant**: Die Systemantwort auf ein Eingangssignal ändert sich nicht über die Zeit. Dies trifft auf das Ansatzrohr eigentlich **nicht** zu, da es permanent seine Systemantwort ändert (durch Artikulationsbewegungen), wird aber jeweils bezogen auf die Dauer von Lausegmenten angenommen.

Weiteres Merkmal

- **dynamisch**: die Systemantwort dauert länger an als das Eingangssignal, wodurch sie ausgelöst wurde (**Ein- und Ausschwingen**)

Mathematische Verknüpfung von Quelle und Filter

- im **Frequenz-** und im **Zeitbereich** möglich
- im Frequenzbereich: Multiplikation des **Rohschallspektrums** $X(f)$ mit der **Übertragungsfunktion** des Filters $H(f)$:

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

- nötige Voraussetzung: Linearität des Filters

(Hinweis: Funktionen der Frequenz werden i.d.R. mit Großbuchstaben, Zeitfunktionen mit Kleinbuchstaben gekennzeichnet.)

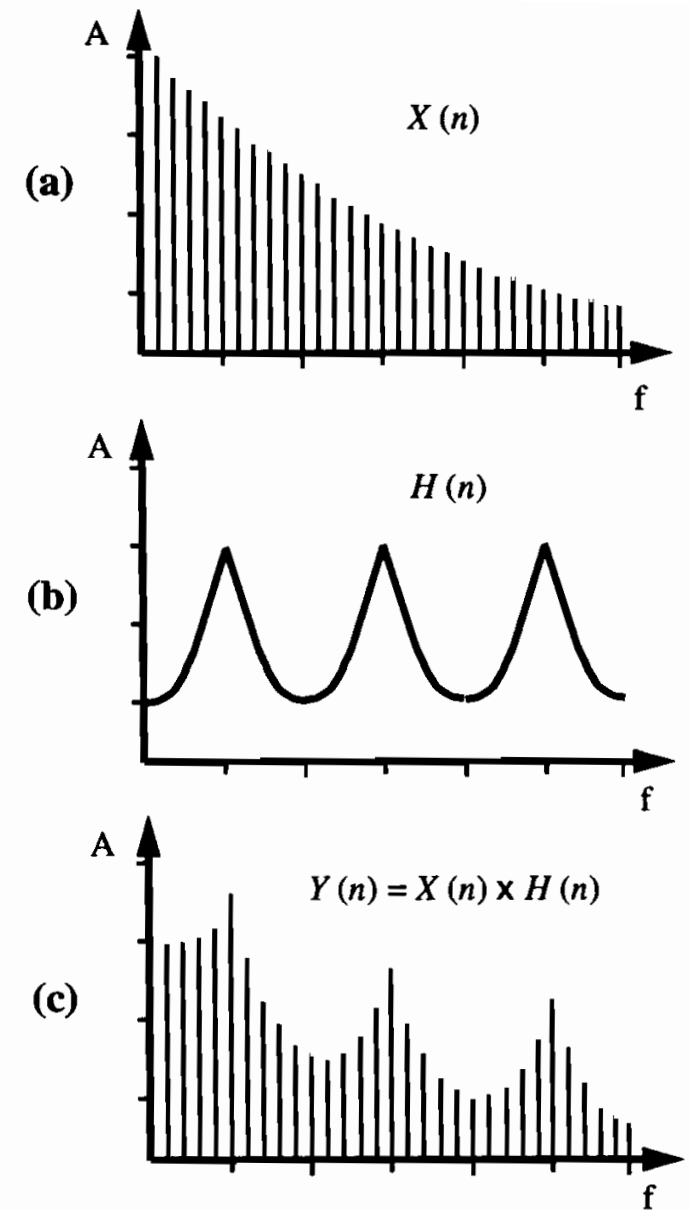
Verknüpfung von Quelle (a) und Filter (b)
im Frequenzbereich:

Multiplikation des Rohschallspektrums mit
der Übertragungsfunktion des Filters.

Ergebnis (c): Sprachschall

(n: Index über spektrale Anteile)

Abb. 51 aus Pompino-Marschall



- im Zeitbereich: **Faltung** von Quellsignal $x(t)$ mit der Systemantwort $h(t)$ des Filters.
- **Faltung**: Integral über dem Produkt von x mit einer verschobenen Version von h .

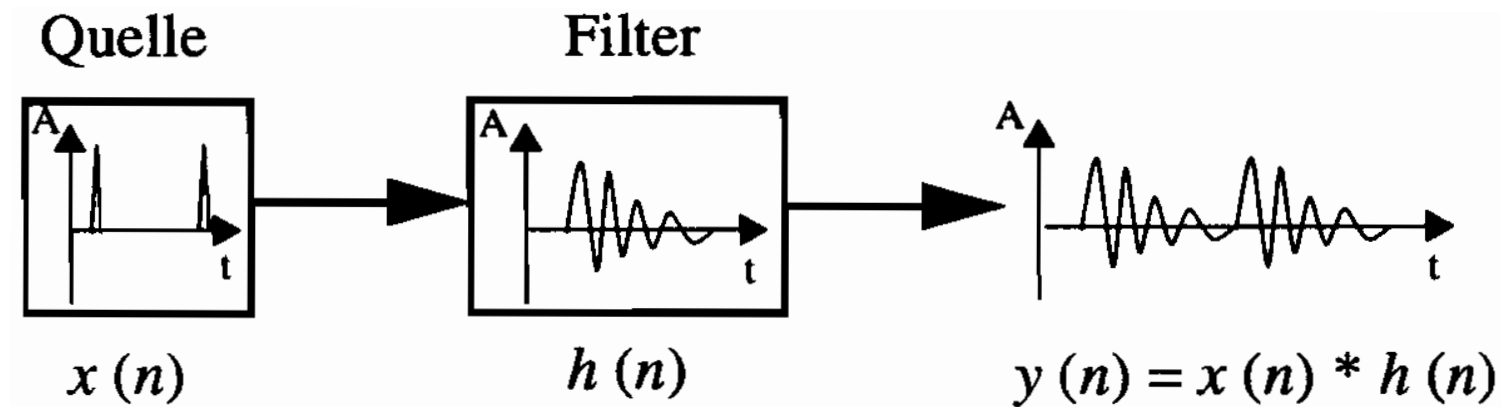


Abb. 50 aus Pompino-Marschall

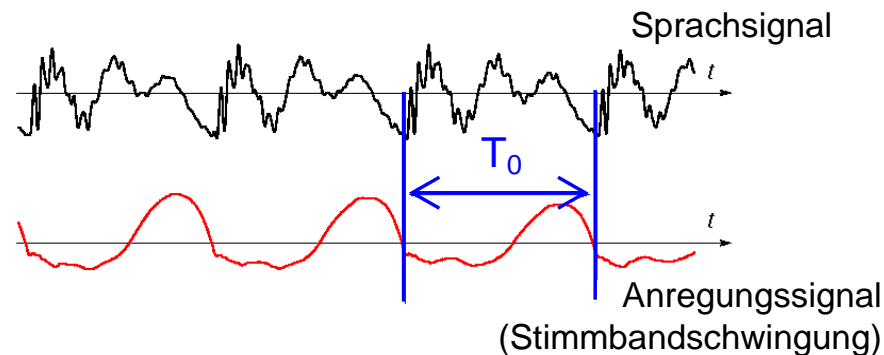
- Die Systemantwort des Ansatzrohrs überdauert jeweils den sie auslösenden glottalen Impuls (vgl. **dynamisches System**).
- Daraus ergibt sich, dass Systemantworten auf vergangenen Input noch in die Berechnung des aktuellen Outputs miteinfließen.
- Je stärker die **Dämpfung** desto schneller reißt der Einfluss vorangegangener Eingangssignale auf die aktuelle Systemantwort ab.
- Voraussetzung für die Faltung: **Zeitinvarianz** des Systems.

Quelle

Arten der Rohschallerzeugung

- **Phonation: Quelle an der Glottis (stimmhafte Laute)**

Der quasi-periodisch wiederkehrende glottale Verschluss (blaue Linien) bewirkt impulsartige Störungen des Luftdrucks, die sich durch das Ansatzrohr fortpflanzen (vgl. Führungsamplitude im Zeitsignal).



Myoelastisch-aerodynamisches Modell der Phonation

1. Unterhalb der geschlossenen Stimmlippen baut sich ein subglottaler Luftdruck auf, der den Verschluss schließlich sprengt.
2. Der Strom der nun zwischen den Stimmlippen fließenden Luft wird aufgrund deren Form beschleunigt und bewirkt dadurch einen Sog (**Bernoullikräfte, Aerodynamik**), der gemeinsam mit den elastischen Rückstellkräften der Stimmlippen (**Myoelastizität**) dazu führt, dass sie sich wieder abrupt schließen. Die damit einhergehende impulsartige Druckschwankung (vergleichbar mit einer zuschlagenden Tür) pflanzt sich durch das Ansatzrohr fort.
3. Der Zyklus wiederholt sich.

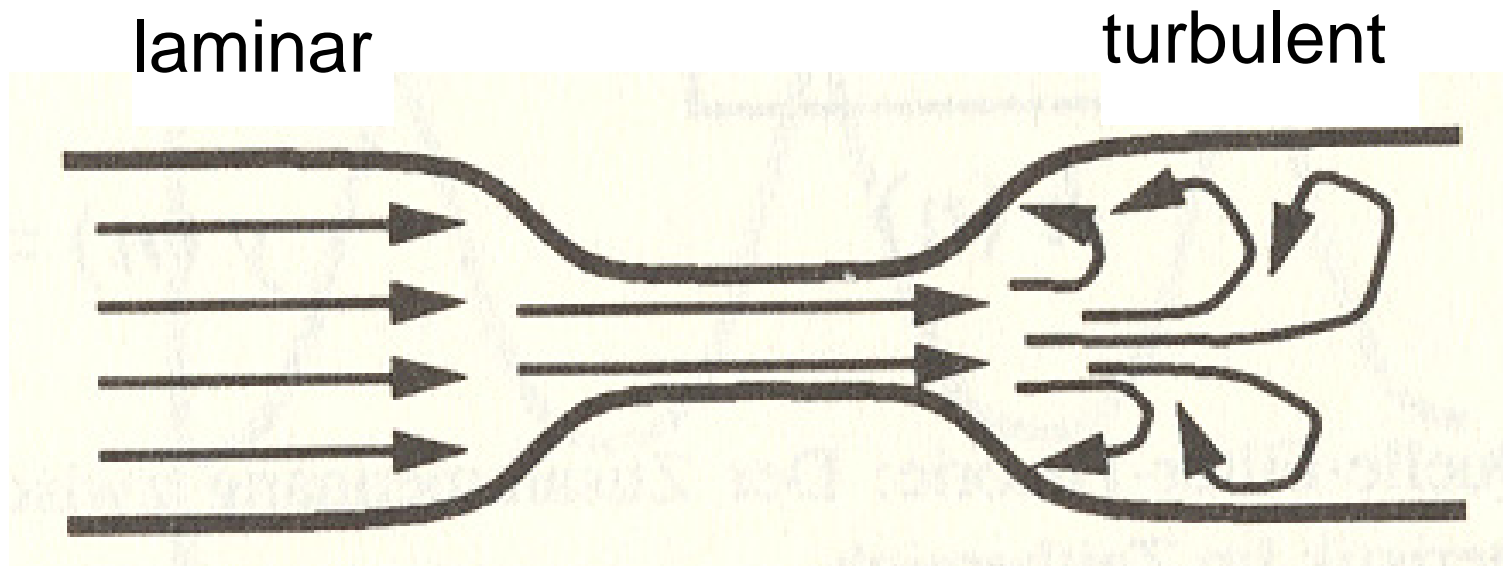
- **Engebildung im Artikulationstrakt(Frikative)**

Ohne Engebildung ist die Luftströmung **laminar**: die Luftmoleküle bewegen sich weitgehend auf parallelen Bahnen.

Wird aber das Ansatzrohr verengt, kommt es in der Verengung zu einem Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit der Moleküle
===> Anstieg der sog. **Reynold'schen Zahl**.

Verhältnis von Trägheitskräften zu Viskositätskräften
(Viskosität: (hier) die inneren Reibungskräfte der Luftmoleküle)

Überschreitet die Reynold'sche Zahl einen kritischen Wert, schlägt die laminare Strömung um in eine **turbulente**. Die Luftmoleküle geraten durcheinander, und die mit diesen chaotischen Bewegungen einhergehenden Luftdruckschwankungen führen zu **Rauschen**.



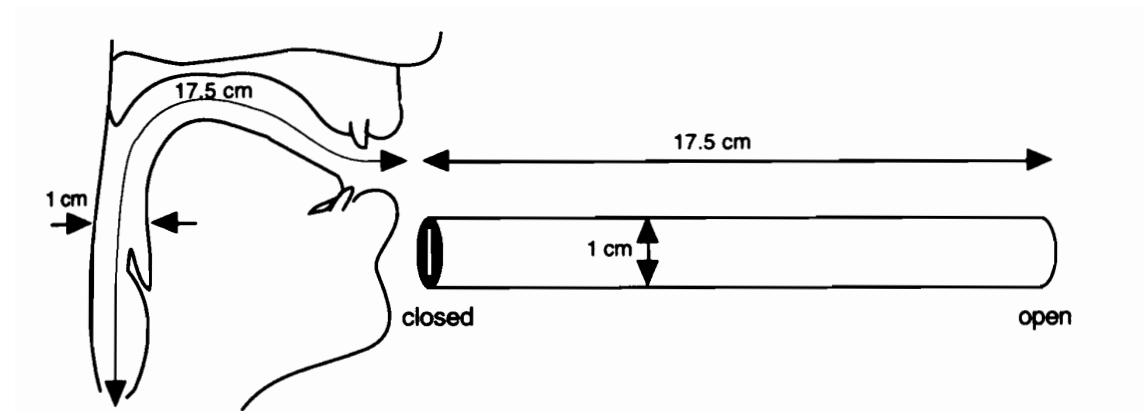
Pompino-Marschall, Abb. 49

- **Transiente Anregung (Plosive)**
Einmalige impulsartige Störung des Luftdrucks durch Verschlussprengung
- **Stimmhafte Konsonanten**
Kombination der Phonation (glottalen Quelle) mit einer supraglottalen Quelle.
- **Flüstern**
Stimm lippen sind weitgehend geschlossen.
Geräuschverursachende Enge zwischen den Aryknorpeln (Flüsterdreieck) ==> Rauschen als glottales Quellsignal

Filter

Resonanzfrequenzen

- Frequenzen, die durch ein System (z.B. Vokaltrakt) besonders verstärkt werden
- Die Lage der Frequenzen ergibt sich über die Geometrie des Vokaltrakts
- Vokaltrakt in neutraler (Schwa)-Position modelliert als **Ansatzrohr**



Ladefoged, 1996, Fig. 8.2

- Ansatzrohr verläuft gerade und kreiszylindrisch
- sein Durchmesser ist gegenüber der Länge gering (damit sich keine Wellen quer zum Rohrverlauf ausbilden)
- gleichbleibende Querschnittsfläche
- geschlossenes Ende: Glottis, schallhart
- offenes Ende: Mundöffnung, “schallweich”
- Resonanzfrequenzen = Frequenzen der **stehenden Wellen** im Ansatzrohr
- **stehende Welle**: Welle mit konstanten Positionen von Schwingungsknoten und -bäuchen; der Geometrie des Ansatzrohrs angepasst.

- Die stehende Welle kommt durch Reflexion und Überlagerung der sich nach vorne und hinten ausbreitenden Schallwelle zustande. Reflexion sowohl an der schallharten Glottis als auch an der schallweichen Lippenöffnung.
- Im Ansatzrohr werden nur diejenigen Wellen, die dessen geometrische **Randbedingungen** erfüllen, so reflektiert, dass sich stehende Wellen ausbilden.

Randbedingungen im neutralen Ansatzrohr

Am geschlossenen Ende (Glottis):

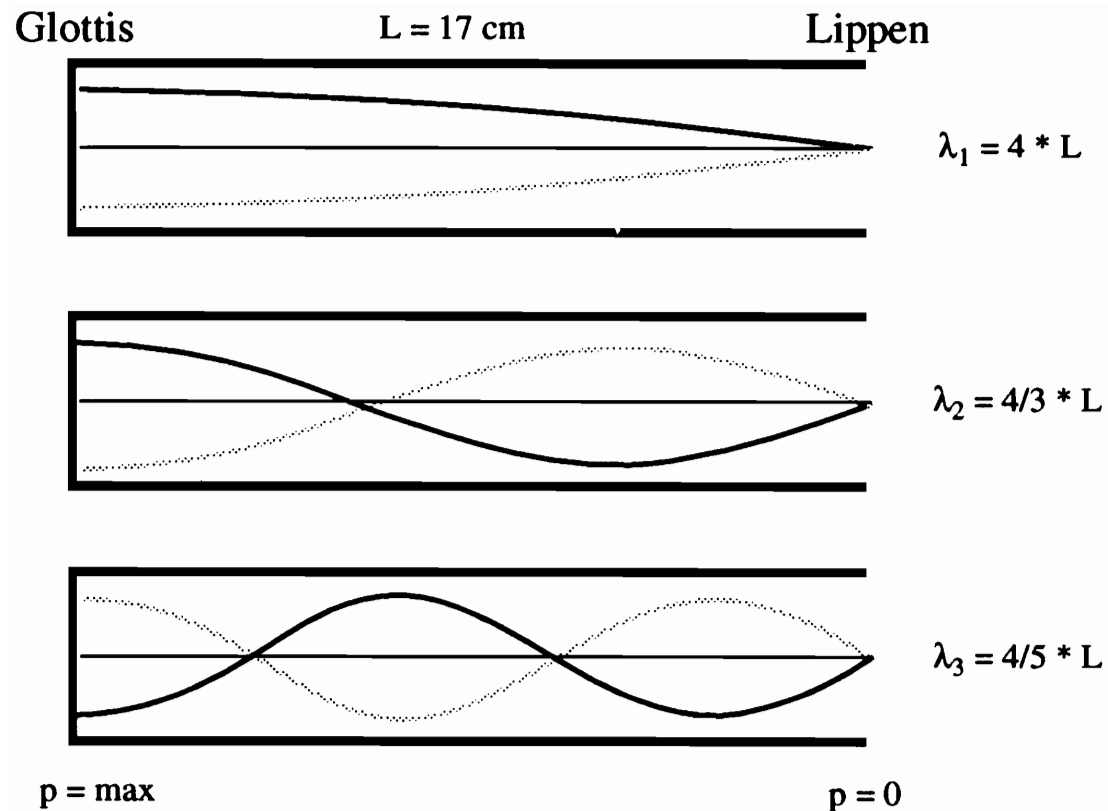
Extremwert des Drucks (Druckmaximum oder -minimum)

= Schwingungsbauch

Am offenen Ende (Lippen):

atmosphärischer Druck (Druck = 0)

= Schwingungsknoten



Die ersten drei stehenden Wellen im neutralen Ansatzrohr, d.h die ersten drei Wellenformen, die die **Randbedingungen** erfüllen. “Stehend” heisst **nicht**, dass nichts passiert! Die Welle oszilliert zwischen den mit durchgezogener vs. gestrichelter Linie gezeigten Extremzuständen. (aus Pompino-Marschall, Abb. 52)

Von der Wellenlänge zur Frequenz

Frequenz einer Welle: $f = c/\lambda$

c: Schallgeschwindigkeit (ca. 34000 cm/s); λ : Wellenlänge

für L=17 cm:

$$\lambda_1 = 4 \cdot L = 68 \text{ cm}$$

$$f_1 = c/\lambda_1 = 34000/68 = 500 \text{ Hz}$$

$$\lambda_2 = (4/3) \cdot L = 22.667 \text{ cm}$$

$$f_2 = c/\lambda_2 = 34000/22.6667 = 1500 \text{ Hz}$$

$$\lambda_3 = (4/5) \cdot L = 13.6 \text{ cm}$$

$$f_3 = c/\lambda_3 = 34000/13.6 = 2500 \text{ Hz}$$

Allgemein: $f_n = c \cdot (2n-1) / 4L$

Formanten

- Frequenzbereiche erhöhter Energie, was auf die resonatorischen Eigenschaften des Ansatzrohrs zurückzuführen ist
- charakterisiert durch **Frequenzlage** und **Bandbreite** (=Frequenzumfang, perzeptiv weniger erheblich)
- für die Charakteristik von Sprachlauten sind die ersten drei Formanten F1 - F3 ausschlaggebend

Ein Problem?

Werden Resonanzen überhaupt zuverlässig von der Quelle (Rohrschall) angeregt?

Resonanzfrequenzen fallen nämlich nicht zwingend mit Obertönen zusammen.

Da aber die Resonanzen des Ansatzrohrs eine gewisse Bandbreite aufweisen, werden auch benachbarte Frequenzen verstärkt, also auch nah gelegene Obertöne. Daher sind die Formanten im Signal sichtbar, auch wenn sie nicht deckungsgleich mit Obertönen sind.

Diskussion der Quelle-Filter-Theorie

- Annahmen
 - Filter ist ein LZI-System
 - Quelle und Filter sind voneinander unabhängig

- Problem

Die Unabhängigkeitsannahme ist genaugenommen nicht zutreffend. Beispielsweise ist die **intrinsische Tonhöhe** von [i] höher als die von [a], was ein Zusammenwirken von glottalen und supraglottalen Mechanismen erkennen lässt. Intrinsische Tonhöhe und Vokalidentität sind über Höhe des Kehlkopfs miteinander korreliert.

Akustische Modelle des Vokaltrakts

- Abbildung der Artikulation auf die Akustik
- hier behandelt:
 - (1) **Rohren-Modelle**
 - (2) **Perturbationstheorie (Formantverschieber)**

vgl. Johnson Chap. 5 Vowels:

5.1 Tube models

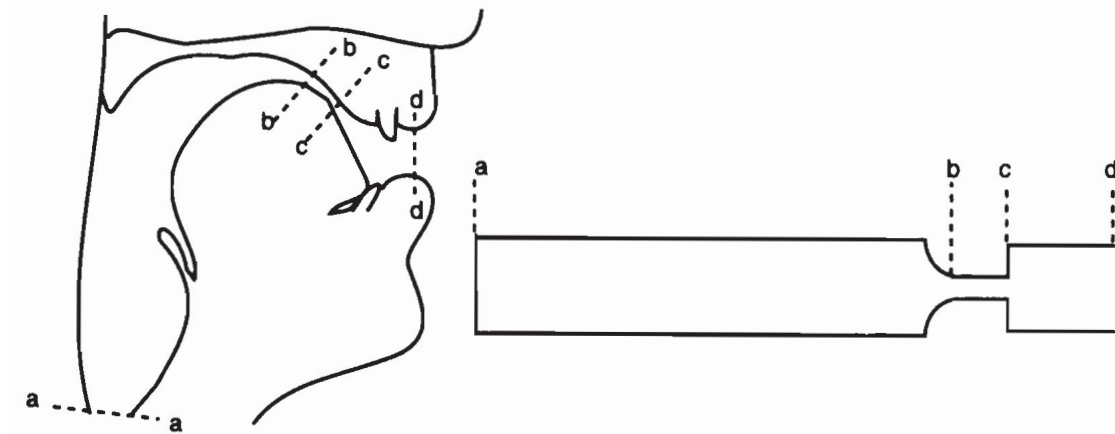
5.2 Perturbation theory

Akustische Modelle (1)

Drei-Rohr-Modell als Beispiel für Rohrenmodelle

(weitere Rohrsysteme werden in den Übungen behandelt)

- Aufteilung des Ansatzrohrs in aneinandergereihte akustisch ungekoppelte Rohre
- Jedes Rohr stellt einen Resonator dar, der jeweils zur Ausbildung entsprechender Formanten führt



Artikulation des Vokals [i], schematisch als Dreirohrsystem dargestellt

Drei Resonatorarten:

1. Vorderrohr (c-d); einseitig geschlossenes Rohr
2. Hinterrohr (a-b); beidseitig geschlossenes Rohr
3. Helmholtzresonator (Hinterrohr (a-b) + Verengung (b-c));
“Körper+ “Hals”

Welche Resonanzen haben diese drei Typen?

(c=Schallgeschwindigkeit, L=Rohrlänge)

1. Vorderrohr (einseitig geschlossen)

- bereits bekannt: $f_n = c \cdot (2n-1) / 4L$
- nur: Die Frequenzen sind viel *höher* als die oben ausgerechneten, weil das Vorderrohr viel *kürzer* als das gesamte Ansatzrohr ist.

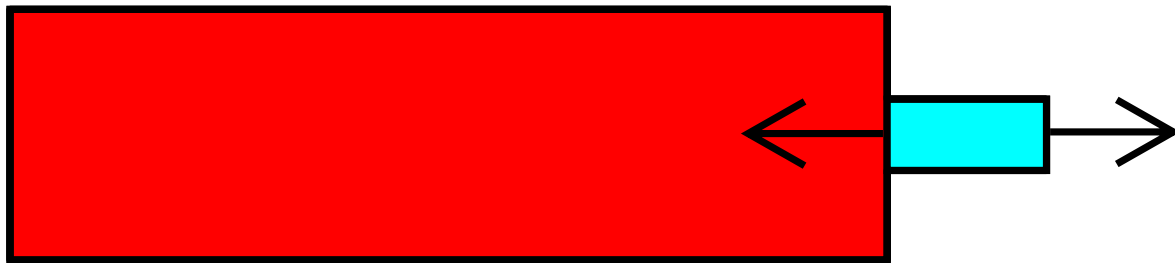
2. Hinterrohr (beidseitig geschlossen)

- Neue Randbedingungen!
- Die stehende Wellen müssen an **beiden** Enden des Rohrs einen Schwingungbauch besitzen
- Statt einviertel-Welle, dreiviertel-Welle usw, “passen” jetzt halbe Welle, ganze Welle usw.

Allgemein: $f_n = nc / 2L$

3. Helmholtzresonator

- Gebildet durch das hintere Rohr (Körper) und die Verengung (Hals): Die Luft im **Hals** (Masse) schwingt auf dem komprimierbaren Luftpolster im **Körper** (Feder).



$$F = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}}$$

A: Querschnittsfläche des Halses, V: Volumen des Körpers,
L: Länge des Halses

- nur eine Resonanz
- Frequenz hängt nicht von der Länge eines einzelnen Rohrstücks ab.
- Auch das Volumen der Rohrstücke spielt eine Rolle

Was war das dritte Rohr eigentlich?

Die Verengung.

Hat dieses Rohr keine eigenen Resonanzen?

Wenn doch, kennen wir schon ein passendes Modell für die Resonanzfrequenzen?

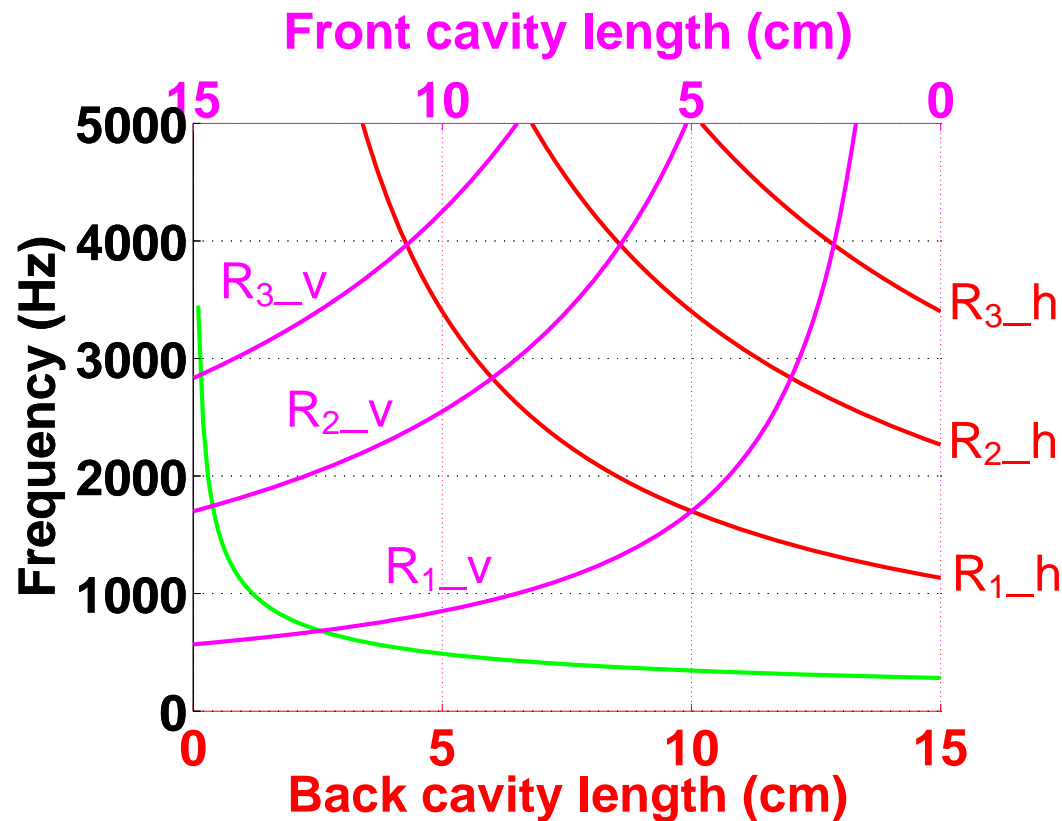
Warum spielen sie bei der Vokalartikulation keine Rolle?

Die Resonanzen des Drei-Rohr-Systems

Gesamtlänge: 17cm; Konstriktionslänge: 2cm

Nur relevant für Helmholtzresonanz:

Area (Konstriktion): 0.65cm^2 ; Area (Hinterrohr): 8cm^2



Hinterrohr-Resonanzen:

R_{n_h}

Vorderrohr-Resonanzen:

R_{n_v}

Helmholtzresonanz

Nomogramme

Allgemein:

Darstellung von Funktionswerten in Abhängigkeit mehrerer Variablen

Typische Anwendung in der akustischen Phonetik:

Lage der Formanten in Abhängigkeit der Längen des Hinter- und Vorderrohrs

(bei gegebener Länge der Konstriktion, sowie Gesamtlänge des Vokaltrakts)

Seit Fant wahrscheinlich die wichtigste Darstellungsform für die Beziehung zwischen Artikulation und Akustik.

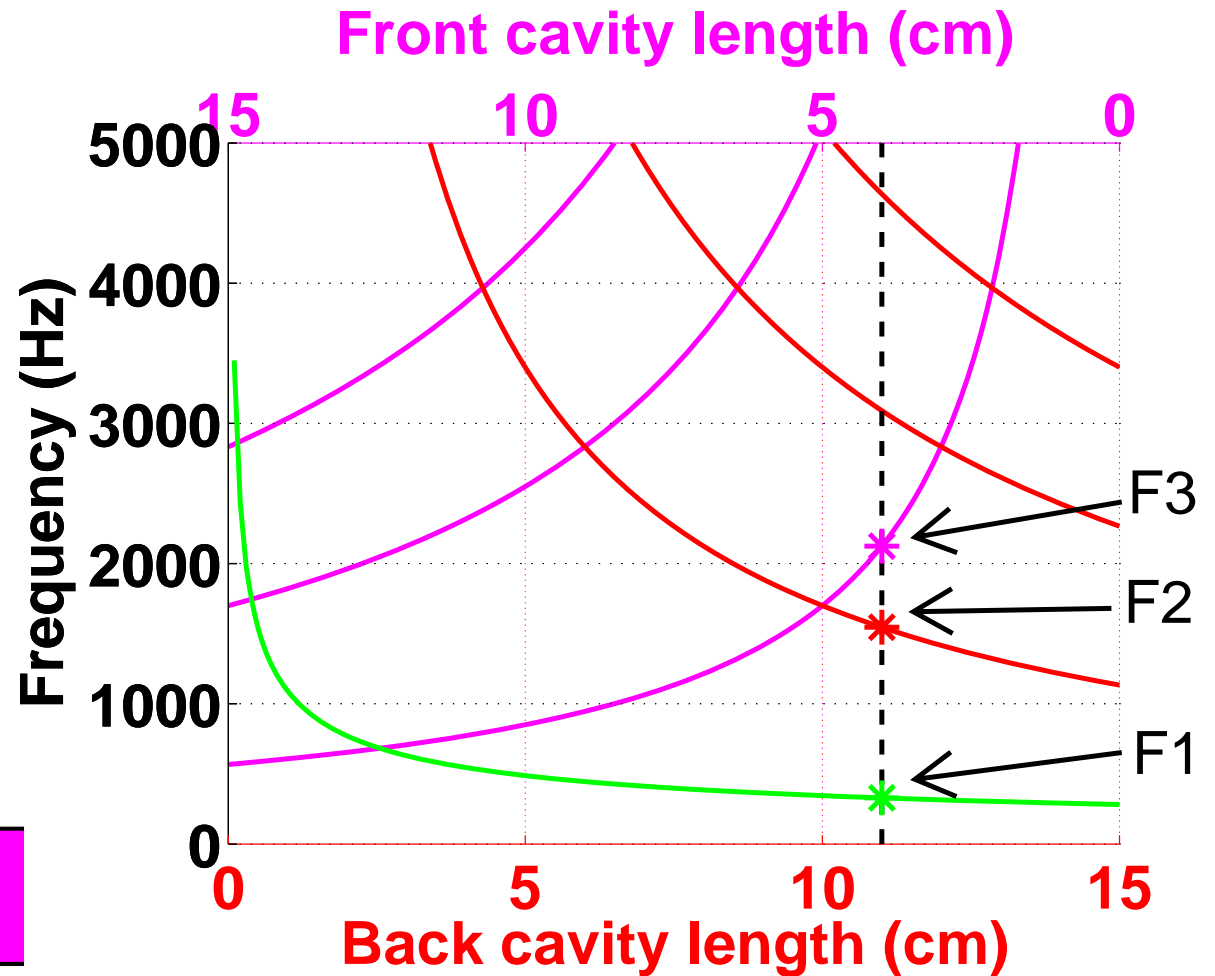
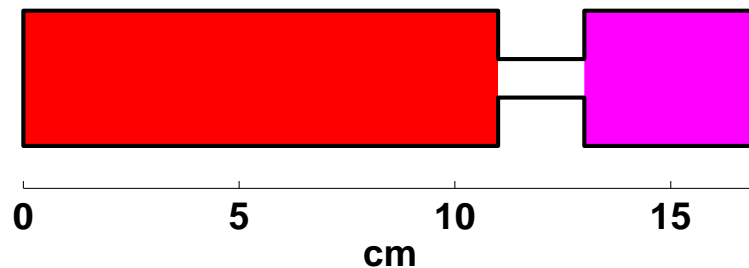
Zuordnung von Resonanzen zu Formanten

Beispiel: Länge des Hinterrohrs 11cm (Vorderrohr=17-2-11=4cm)

F1: Helmholtzresonanz

F2: erste Resonanz des
Hinterrohrs

F3: erste Resonanz des
Vorderrohrs



Anmerkung:

In diesem Nomogramm werden einfach die Ergebnisse der Formeln für die drei Resonanztypen eingesetzt.

Wegen ***akustischer Koppelung*** zwischen den Rohrstücken weichen die tatsächlichen Resonanzen im Gesamtsystem etwas ab.

v.a dort, wo Resonanzen sich kreuzen.

z.B bei 10cm für Länge des Hinterrohrs kreuzen die ersten Resonanzen von Hinter- und Vorderrohr

Weitere Beispiele für Rohrmodelle in der akustischen Phonetik:

- Zwei-Rohr-Modell: beide einseitig geschlossen

vgl. erste Übung mit Rohrenmodellen

- Vier-Rohr-Modell: Das Drei-Rohr-Modell wird um ein viertes kurzes Rohrstück erweitert, um ein System mit unterschiedlichen Lippenöffnungen modellieren zu können.

vgl. Teil 2 der zweiten Übung mit Rohrenmodellen

Nachtrag zum Thema “cavity affiliations”

(Zuordnung von Formanten zu den Resonanzen der einzelnen Rohrstücke)

Im Beispiel oben:

Verengung bei 11cm Hinterrohrlänge:

F2 ==> erste Resonanz des Hinterrohrs

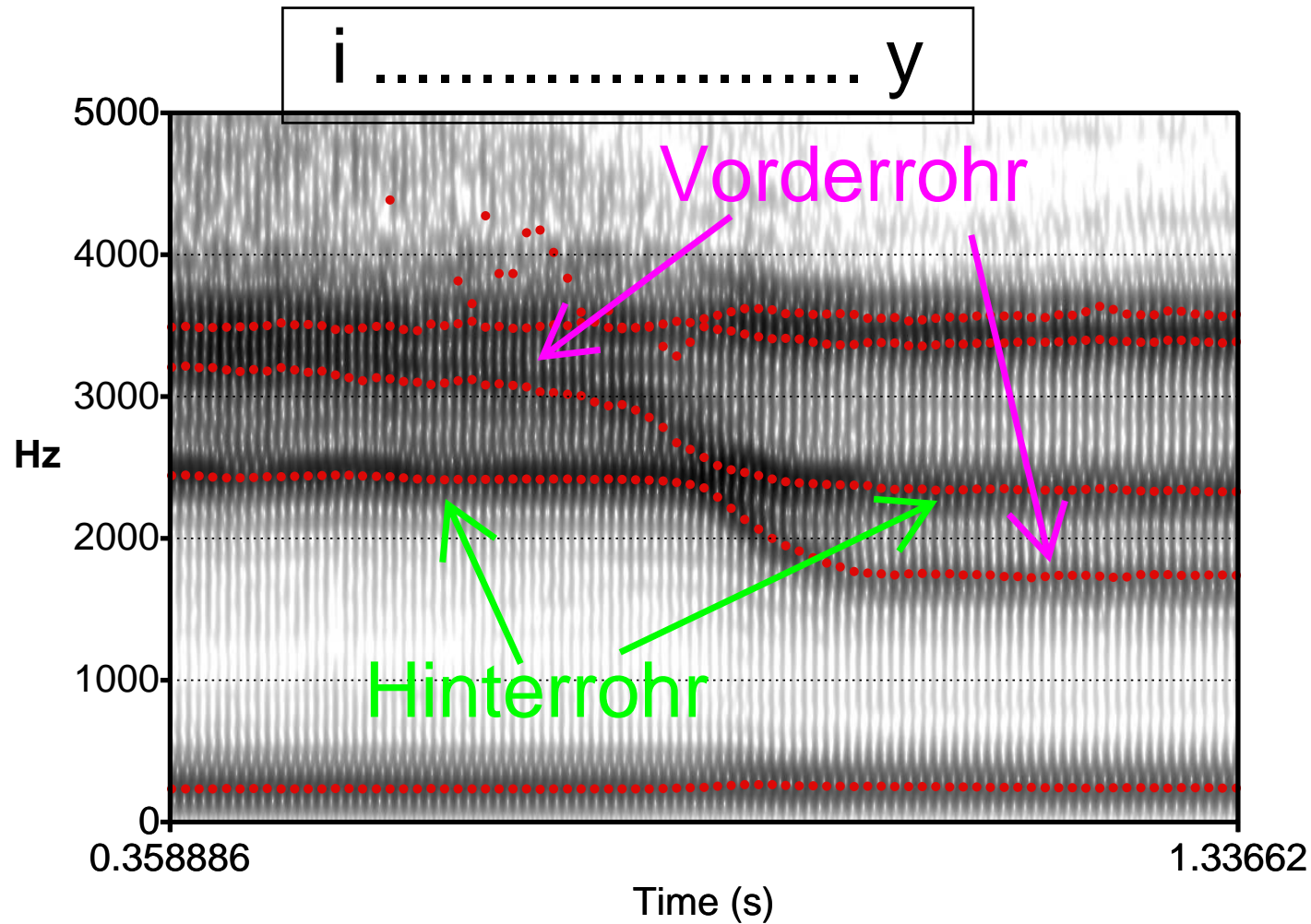
Verengung bei 9cm Hinterrohrlänge:

F2 ==> erste Resonanz des Vorderrohrs

Wechsel der “affiliation” bei 10cm Hinterrohrlänge

In der Übung Überprüfung der Zuordnung von F2 bei [i] zum Hinterrohr: Falls F2 dem Hinterrohr “gehört”, besonders starke Auswirkung auf F2 bei Manipulation in diesem Bereich.

Weiteres Beispiel, um eine Wechsel der Zuordnung von F2 und F3 sichtbar zu machen: Fließender Übergang von [i] nach [y]



Akustische Modelle (2)

Perturbationstheorie (Formantverschieber)

- Komplementärer Ansatz zu Rohrenmodellen
- Ausgangspunkt: das *neutrale Rohr* (schwa)
- Wie wirkt sich eine *lokale Erweiterung/Verengung* auf die Formantfrequenzen auf?

Perturbation: lokale “Störung” des neutralen Rohrs

Das Grundmuster des Formantverschiebers:

Einteilung des Vokaltrakts in 8 Regionen, um alle Kombinationen von Erhöhung und Absenkung von F1 bis F3 zu erfassen.

Länge aller Regionen: ganzzahliges Vielfach von $L/30$

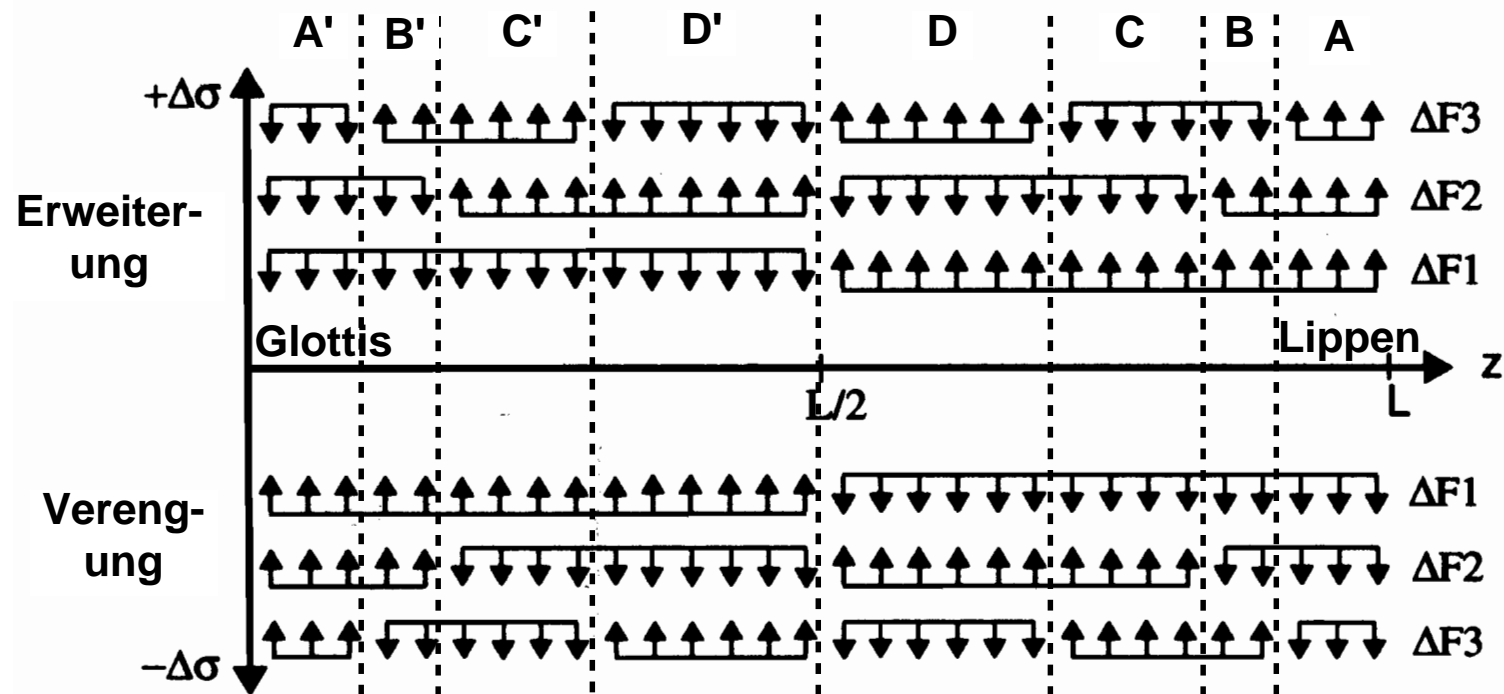


Abb. 55 aus Pompino-Marschall; s.a Tillmann; Ungeheuer; Carré & Mrayati

Zurück zu Schalldruck und Schallschnelle

Die Grundgesetzmäßigkeit der Perturbationstheorie:

Bei Verengung an Stellen maximaler Schallschnelle:

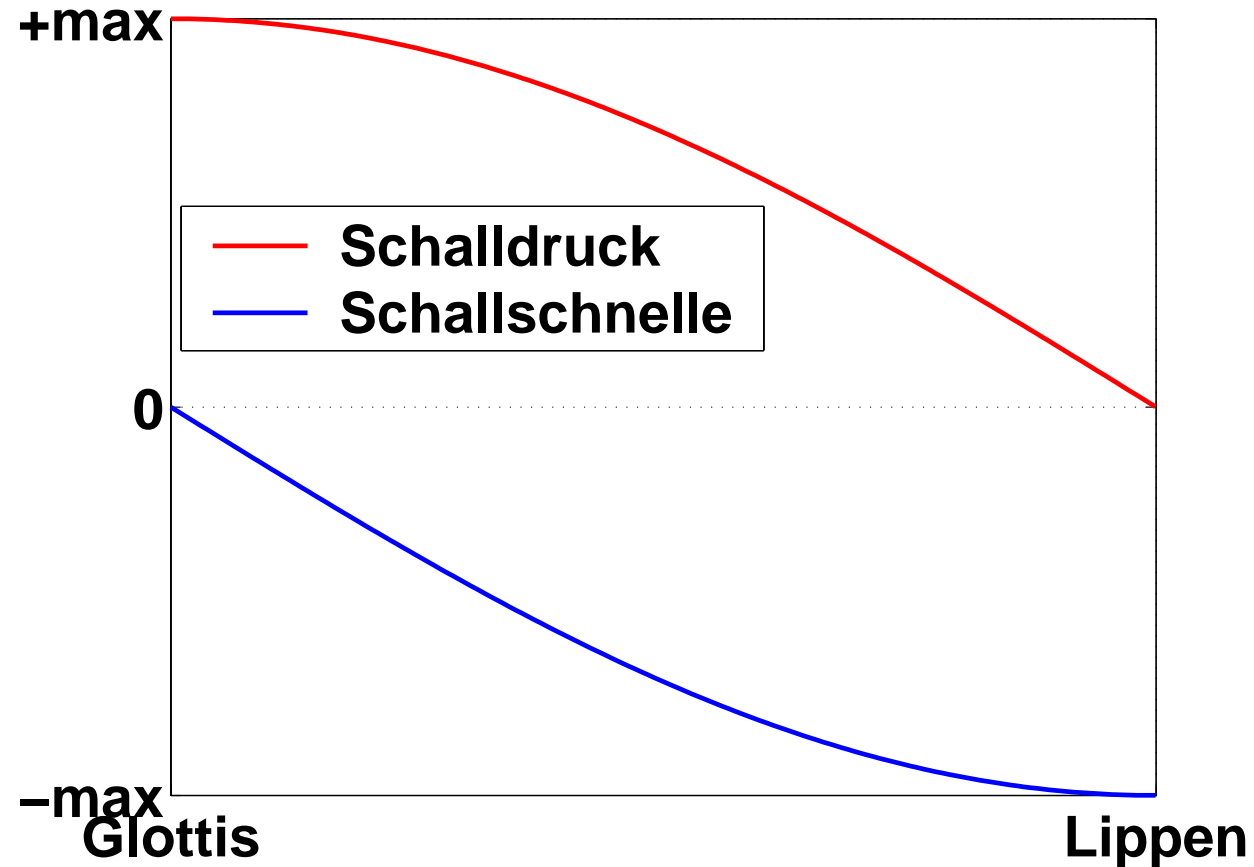
Resonanzfrequenz *sinkt*

Bei Verengung an Stellen maximalen Schalldrucks:

Resonanzfrequenz *steigt*

Zur Erinnerung: Schalldruck und Schallschnelle sind um $\pi/2$ phasenverschoben (Folien 1, 22)

Hier für die erste stehende Welle im neutralen Rohr



Beispiel für die Umsetzung dieses Prinzips:

Verengung an den Lippen (z.B bilabialer Plosiv)

====> **alle** Formanten sinken

weil

- an der Mundöffnung Druck = 0 = Schwingungsknoten für **alle** stehenden Wellen
- Schalldruckknoten entspricht Maximum der Schallschnelle

Veranschaulichung der Gesetzmäßigkeit (nach Johnson; Chiba & Kajiyama)

Bei Druckknoten (Druck = 0)

Schallschnelle hoch, kinetische Energie hoch

Verengung verhindert die Teilchenbewegung

====> Frequenz sinkt

Bei Druckbauch (Druck hoch)

potentielle Energie hoch

Verengung unterstützt Teilchenbewegung

====> Frequenz steigt

(s.a. Iskarous, "An intuitive approach to articulatory-acoustic relations")

Abgestufte Wirkung lokaler
Perturbationen.

Bezogen auf die stehenden
Wellen für F1 bis F3

In jeder Teilabbildung:
Oben, Erweiterung
Unten, Verengung

aus Pompino-Marschall

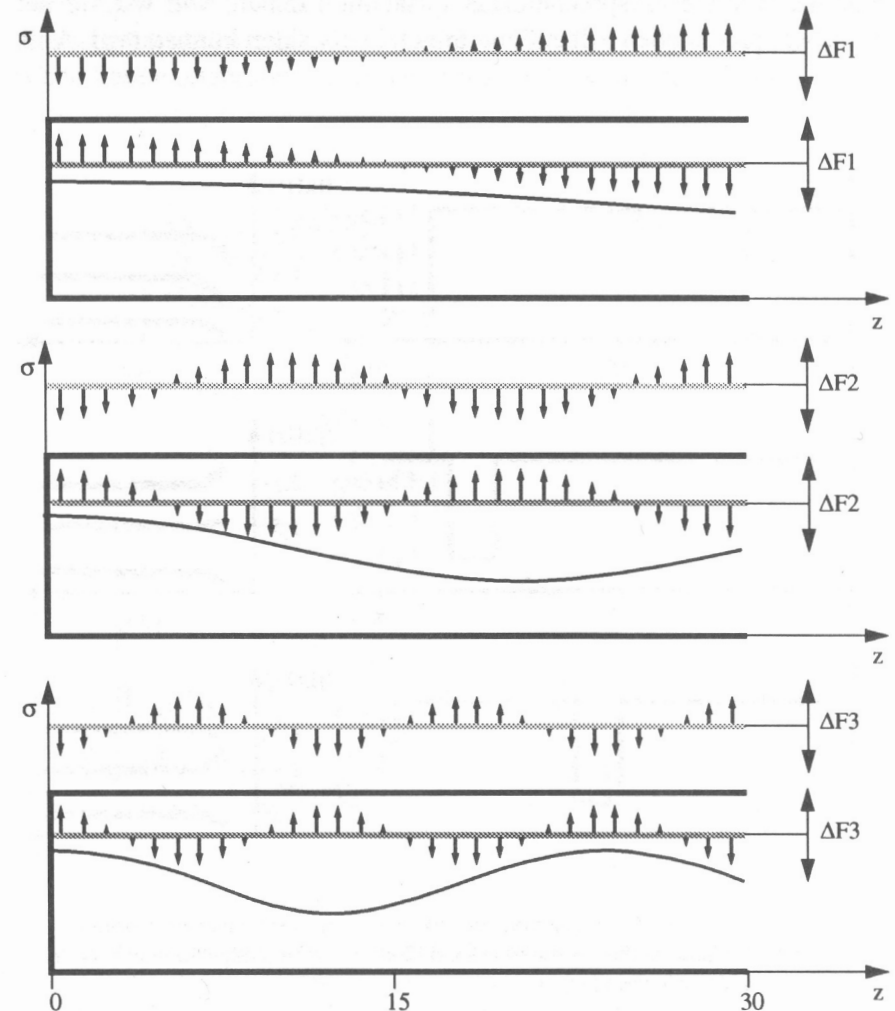


Abb. 56: Die abgestufte Wirkung lokaler Querschnittsflächenänderung gegenüber dem neutralen Rohr (schwarz, mit den eingezeichneten stehenden Wellen): bei Vergrößerung (nach oben, hellgrau); Verkleinerung (nach unten, dunkelgrau) als Frequenzverschiebung (Pfeile) gegenüber dem Neutralvokal [ɤ].

Zwischen jedem Schalldruckknoten (Schallschnellemaximum) und jedem Schalldruckbauch (positives oder negatives Druckmaximum) wechselt die Perturbation von maximaler Absenkung zu maximaler Anhebung des Formanten.

Wo ist die Perturbation Null?

Halbe Strecke zwischen Druckknoten und Druckbauch

====> die Welligkeit des Perturbationsmusters ist doppelt so schnell wie die zugrundeliegende stehende Welle

Vom Druckknoten zum nächsten Druckbauch = Viertelwelle

Beim entsprechenden Perturbationsmuster = halbe Welle

====> Bei Kenntnis der stehenden Wellen sind die Perturbationsmuster rekonstruierbar

Vorhersage des
Formantverschiebers
für Transitionen von
verschiedenen
Artikulationsstellen
nach Schwa

aus Pompino-Marschall

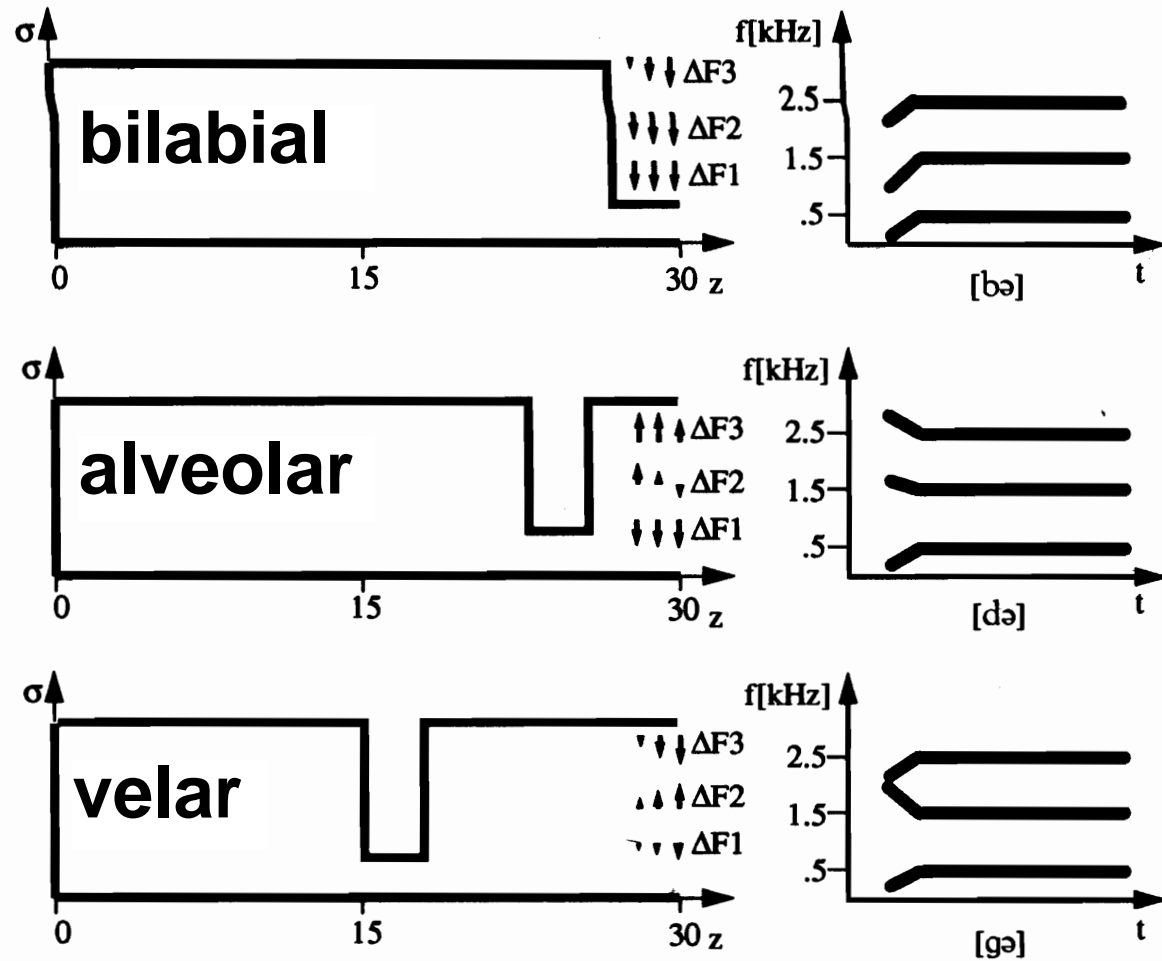


Abb. 57: Durch den Übergang von der links mit ihrer Formantverschiebungswirkung (Pfeile) dargestellten Ansatzrohrkonfiguration zur Neutralposition bewirkten Formanttransitionen (rechte Seite).

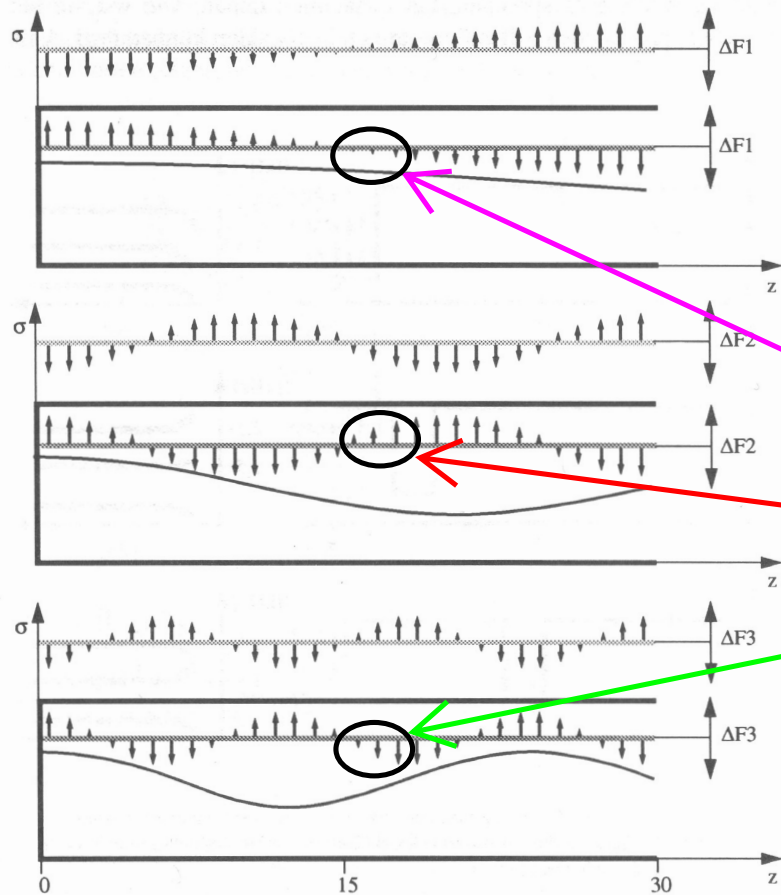


Abb. 56: Die abgestufte Wirkung lokaler Querschnittsflächenänderung gegenüber dem neutralen Rohr (schwarz, mit den eingezeichneten stehenden Wellen): bei Vergrößerung (nach oben, hellgrau); Verkleinerung (nach unten, dunkelgrau) als Frequenzverschiebung (Pfeile) gegenüber dem Neutralvokal [ɤ].

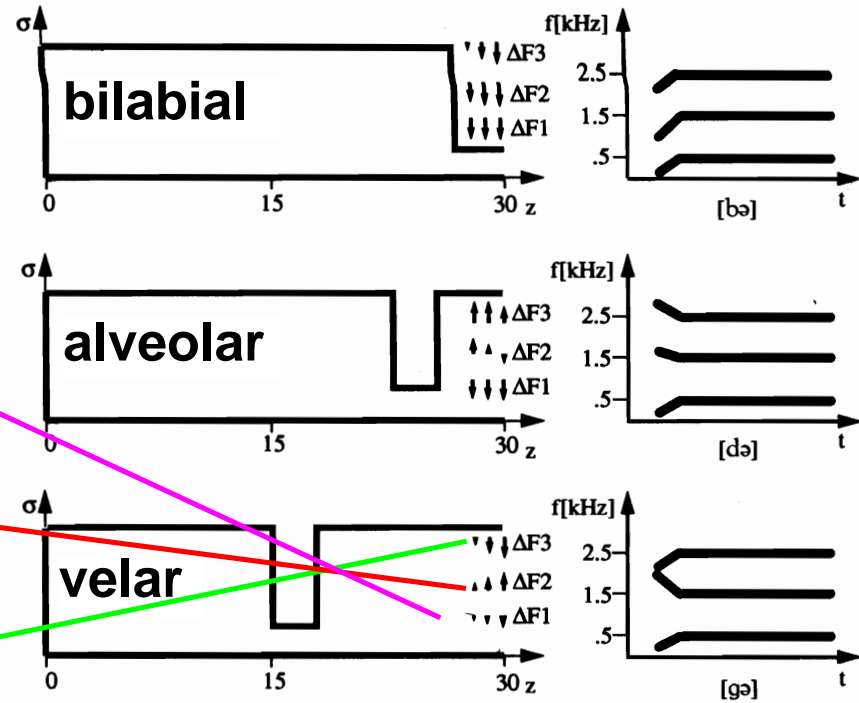


Abb. 57: Durch den Übergang von der links mit ihrer Formantverschiebungswirkung (Pfeile) dargestellten Ansatzrohrkonfiguration zur Neutralposition bewirkten Formanttransitionen (rechte Seite).

Weitere Konsequenzen des Modells:

- Die Wirkung einer Verengung an einer Stelle in Vokaltrakt kann durch gleichzeitige Verengung an anderer Stelle **aufgehoben** werden.

vgl. oben die Einteilung des Vokaltrakts in acht Regionen:

die Regionen A bis D, sowie ihre Gegenstücke A' bis D'

Region A (Lippenende) senkt alle Formanten ab

Region A' (Glottisende) erhöht alle Formanten

- Wirkung einer Verengung in Region A kann aber durch **Erweiterung** in Region A' **verstärkt** werden.

- je höher der Formant, desto schneller die Welligkeit der Perturbationsmuster
Die Verformbarkeit der Zunge ist begrenzt
Deswegen gezielte artikulatorische Steuerung der höheren Formanten ($> F_3$) kaum möglich



Lokalisation der Bereiche maximaler Schallschnelle im Vokaltrakt.

Hervorgehoben:
gleichzeitige labiale, palatale und pharyngeale Verengung
====> maximale Absenkung von F3

typisch für amerikanisches /r/

(palatale Verengung kann auch retroflex sein)

Abbildung aus Johnson

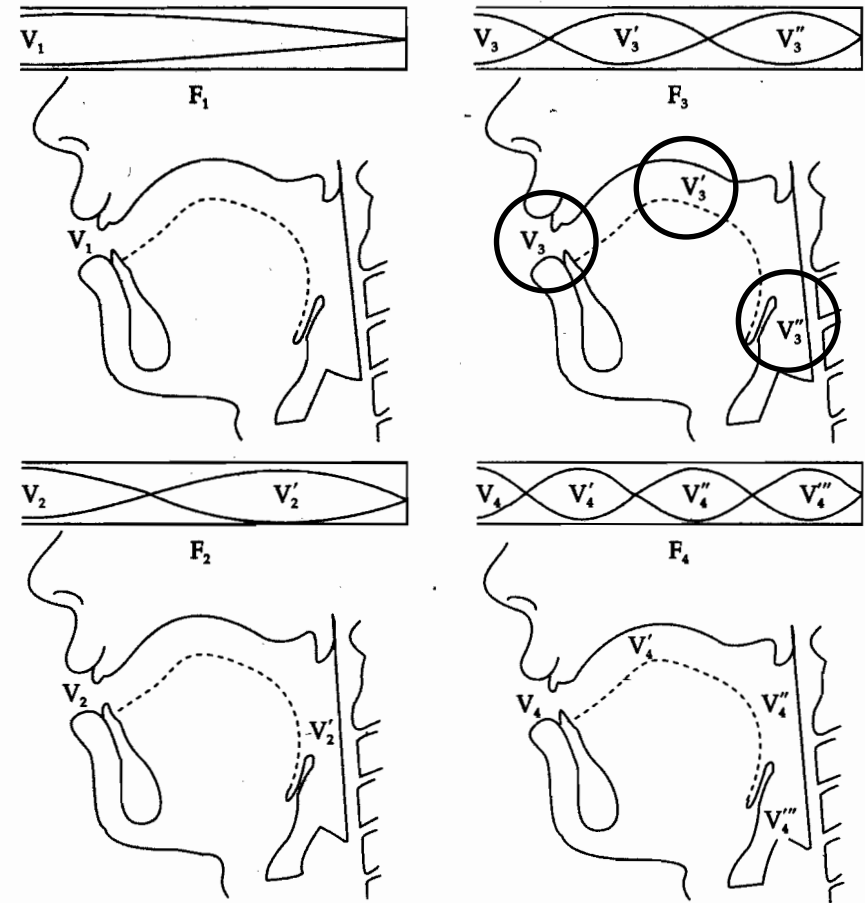


Figure 5.7 Locations of velocity nodes (points of maximum velocity) and antinodes (points of maximum pressure) in a straight tube open at one end and in the unconstricted vocal tract. Points of maximum velocity are labeled V_n (numbered by primes from the front of the vocal tract), and points of maximum pressure are indicated by the intersections of the sine waves in the uniform tube. Velocity nodes and antinodes are shown in separate graphs for each of the first four formants (labeled F_n). After Chiba and Kajiyama, 1941.

Zusammenführen von Rohren-Modellen und Perturbationstheorie

Ergebnisse oft äquivalent

Beispiel (1). F1 und F2 für [a]

Zwei-Rohr-Modell (vgl. Übung):

Ganz gute Annäherung (hoher F1, tiefer F2) bei etwa gleich langem hinterem Rohr (eng) und vorderem Rohr (breit)

Perturbationstheorie:

Bei Verengung in der gesamten hinteren Hälfte:

F1 steigt und F2 (im Schnitt) fällt

Beispiel (2). F2 für [i]

Drei-Rohr-Modell:

Hoher F2, wenn Verengung bei ca. 2/3 der Strecke von Glottis zu Lippen (hinteres Rohr etwa doppelt so lang wie vorderes Rohr)

Perturbationstheorie:

Bei 2/3 der Strecke von Glottis zu Lippen, Druckmaximum in der stehenden Welle für F2 ==> Erhöhung von F2

Die zwei Modelle im Vergleich

Rohrenmodelle

leichter einsetzbar bei starker Verengung (bei klarer Trennung der einzelnen Rohrstücke)

Perturbationstheorie

leichter einsetzbar bei schwacher Verengung
oder bei mehrfachen Verengungen (z.B. amerikanisches /r/)

also im Grunde komplementär

Das inverse Problem

Eindeutige aber keine *eineindeutige* Zuordnung zwischen Artikulation und Akustik.

Eine gegebene Artikulationskonfiguration lässt sich genau auf ein zugehöriges akustisches Signal abbilden (Eindeutigkeit).

Aber ausgehend vom akustischen Signal gelangt man nicht mehr zu genau einer artikulatorischen Konfiguration.

Die Abbildung Akustik \implies Artikulation ist also mehrdeutig.

Ein Beispiel kennen wir schon:

Eine Verengung nahe der Mundöffnung bewirkt genauso wie eine Erweiterung nahe der Glottis ein Absinken von F_1 , F_2 und F_3 .

Einschränkung des Problems durch artikulatorische Constraints:

In unserem Beispiel: Erweiterung nahe der Glottis viel eingeschränkter möglich als Verengung bei den Lippen.

Vor allem aber: Vom Mensch produzierte Artikulationsbewegungen können keine Sprünge aufweisen.