

## Einführung in die Akustik: Lösungen II

### 1 Wie kommt nach der Quelle-Filter-Theorie der Sprachschall zustande?

- Rohschallgenerierung an der Quelle
- Verformung durch nachgeschaltetes Filter
- *Folien II(2)*

### 2 Was sind die zentralen Annahmen der Quelle-Filter-Theorie? Treffen sie wirklich zu?

- Filter ist ein LZI-System (linear, zeitinvariant, dynamisch)
  - Linearität: Filter verändert nicht die Frequenzen der einlaufenden Schwingungen. Trifft weitgehend zu
  - Zeitinvarianz: Filter reagiert auf ein gegebenes Inputsignal stets auf dieselbe Weise. Nur bezogen auf sehr kurze Signalabschnitte innerhalb eines Lautsegments gültig
  - Dynamik: Systemantwort überdauert Inputsignal. Trifft zu.
  - *Folien II(4)*
- Quelle und Filter sind voneinander unabhängig.
- Unabhängigkeit genaugenommen nicht gegeben: z.B. bestimmt die Kehlkopfhöhe sowohl Grundfrequenz (Quelle) sowie Resonanzeigenschaften (Filter)
- *Folien II(4, 18)*

### 3 Wie werden Quelle und Filter im Frequenz- und Zeitbereich verknüpft?

- Frequenzbereich: Multiplikation des Spektrums des an der Quelle erzeugten Rohschalls mit der Übertragungsfunktion des Filters.
- Zeitbereich: Faltung des Zeitsignals des Rohschalls mit der Systemantwort des Filters. Hintergrund: Da das Filter dynamisch ist (s.o.) ist der Output des Filters nicht nur durch die aktuelle Systemantwort gegeben, sondern es werden auch die vergangenen Systemantworten, die noch nicht abgeklungen sind, daraufaddiert (Integral).

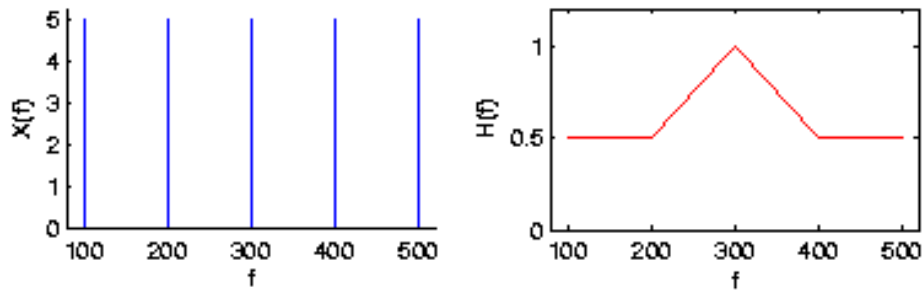
$$y(t) = x(t) * h(t)$$
$$y(t) = \int_T x(\theta) \cdot h(t - \theta) d\theta$$

- *Folien II(5-8)*

### 4 Gib die Quelle an für Vokale, stimmhafte Plosive, stimmlose Frikative und Nasale

- Vokale: Glottis
- stimmhafte Plosive: Glottis, Verschlusssprennung (transiente Anregung)
- stimmlose Frikative: geräuschverursachende Enge im Artikulationstrakt
- *Folien II(9-12)*

- 5 Wie hoch sind die Amplituden der spektralen Komponenten im Spektrum  $Y$ , das sich durch Verformung des Spektrums  $X$  mittels der Transferfunktion  $H$  des (linearen) Filters ergibt?



- die neuen Amplituden ergeben sich durch Multiplikation des Spektrums  $X$  mit der Übertragungsfunktion  $H$ .
- $Y(100) = 5 \cdot 0.5 = 2.5$
- $Y(200) = 5 \cdot 0.5 = 2.5$
- $Y(300) = 5 \cdot 1 = 5$
- $Y(400) = 5 \cdot 0.5 = 2.5$
- $Y(500) = 5 \cdot 0.5 = 2.5$

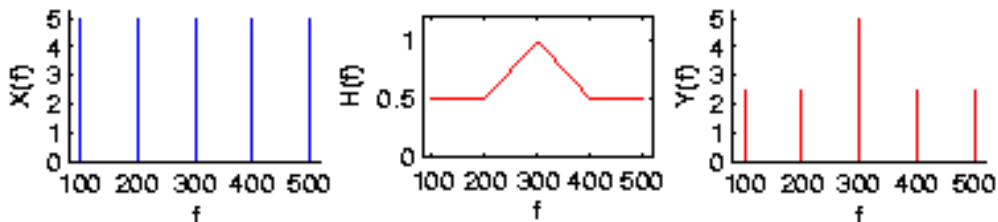


Abbildung 1: Spektrum  $Y(f)$  als Ergebnis der Multiplikation des Quellspektrums  $X(f)$  mit der Übertragungsfunktion  $H(f)$  des Filters.

- Folien II(6)

## 6 Wie entsteht Rauschen?

- Eine laminare Luftströmung (Teilchen schwingen auf parallelen Bahnen) schlägt an einer Verengung oder an einem Hindernis um in einer turbulente Strömung (Teilchen geraten durcheinander).
- Rauschen bezeichnet die damit einhergehenden quasi chaotischen Luftdruckschwankungen.
- *Folien II(11-12)*

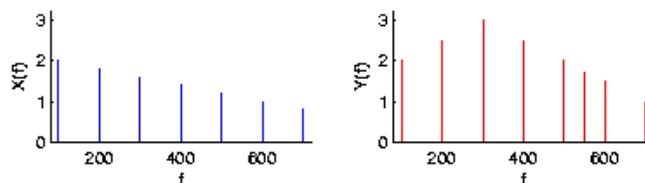
## 7 Wie entstehen stehende Wellen?

- Stehende Wellen besitzen ortsfeste Schwingungsknoten und -bäuche.
- Sie bilden sich, wenn zwei Wellen gleicher Frequenz und Phase einander entgegenlaufen.
- Dies ist beispielsweise der Fall, wenn eine Cosinuswelle mit Phase 0 an der Glottis reflektiert wird.
- *Folien II(14-15)*

## 8 Was sind die Kennzeichen eines Ansatzrohrs?

- gerades und kreiszylindrisches Rohr
- Querschnittsfläche klein gegenüber der Länge
- schallharte Wände
- einseitig schallhart geschlossen
- geschlossenes Ende: Glottis, offenes Ende: Mundöffnung
- *Folien II(13)*

## 9 Gegeben sind Spektrum $X$ des Eingangssignals, Spektrum $Y$ des Ausgangssignals. Ist das Filter, das $X$ in $Y$ umgeformt hat, linear? Sind die zu den Spektren gehörenden Schwingungen periodisch?



- Das Filter ist nicht linear, da  $Y(f)$  eine neue spektrale Komponente enthält mit einer Frequenz von 550 Hz, die in  $X(f)$  nicht gegeben ist.

- Das zu  $X$  gehörige Zeitsignal ist periodisch, da  $X$  harmonisch ist (die Frequenzen der Obertöne sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz).
- Das zu  $Y$  gehörige Zeitsignal ist **auch periodisch**. Die Grundfrequenz ( $f_0$ ) ist allgemeiner formuliert der **größte gemeinsame Teiler ggT** der Frequenzen der Obertöne, hier also gleich 50 Hz.
- Die  $f_0$ -Schwingung muss also selbst nicht im Signal vorhanden sein.
- **Kontinuierliche Spektren:** bei chaotischen Ereignisfolgen und einmaligen Ereignissen (Frikatives Rauschen, Plosiv-Bursts) treten keine (systematischen) Wiederholungen auf. Dies lässt sich als Schwingung mit unendlich langer Periodendauer  $T$  verstehen. Einer unendlich langen Periodendauer entspricht als Kehrwert eine gegen 0 gehende Grundfrequenz ( $f = 1/T$ ). Ein infinitesimal kleiner ggT wiederum bedeutet, dass der Abstand zwischen den Obertönen ebenfalls infinitesimal klein ist (also gegen 0 geht). Aus einem Linienspektrum wird somit ein kontinuierliches Spektrum.

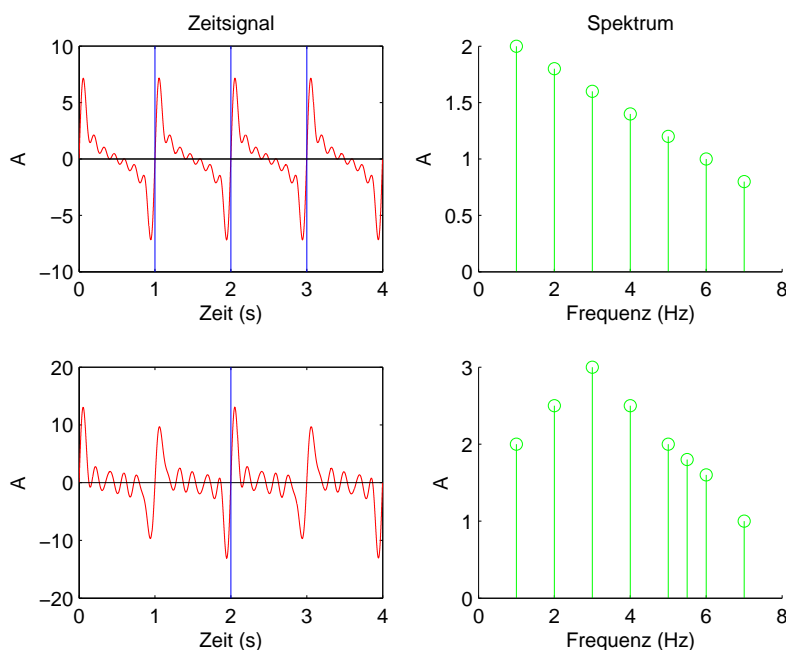


Abbildung 2: Zeitsignale (**links**) und zugehörige Spektren (**rechts**). Die Schwingungsperioden sind in den Zeitsignalen mittels senkrechter Linien segmentiert. Im unteren Zeitsignal ist die Schwingung mit der Grundfrequenz (0.5 Hz) nicht enthalten, ergibt sich aber als ggT aus der Lage der Harmonischen.

- Folien I(22-23), II(4)

## 10 Wie lassen sich die Resonanzfrequenzen im neutralen Ansatzrohr ermitteln?

- Resonanzfrequenzen = Frequenzen der **stehenden Wellen** (vgl. Frage 7) im Ansatzrohr
- Im Ansatzrohr der Länge  $L$  bilden alle Wellen stehende Wellen aus, die die geometrischen Randbedingungen des Rohrs erfüllen, also Wellen mit Schwingungsbauch (Schalldruckmaximum und -minimum) an der Glottis (dem geschlossenen Ende) und Schwingungsknoten (Schalldruck gleich 0, atmosphärischer Luftdruck) an der Mundöffnung (dem offenen Ende).
- Drücke die Wellenlänge  $\lambda_n$  in Form der Ansatzrohrlänge  $L$  aus: z.B.  $\lambda_1 = 4L$ .
- Ermittle mit der Formel  $f = \frac{c}{\lambda}$  ( $c$ : Schallgeschwindigkeit) die Frequenz der stehenden Wellen und somit die Resonanzfrequenzen.
- *Folien II(14, 16)*

## 11 Was sind Formanten?

- Frequenzbereiche erhöhter Energie, was auf die resonatorischen Eigenschaften des Ansatzrohrs zurückzuführen ist
- charakterisiert durch **Frequenzlage** und **Bandbreite**
- Resonanzfrequenzen fallen nicht zwingend mit Obertönen zusammen. Da aber die Resonanzen des Ansatzrohrs eine gewisse Bandbreite aufweisen, werden auch benachbarte Frequenzen verstärkt, also auch nahe gelegene Obertöne. Daher sind Formanten im Signal sichtbar, auch wenn die Resonanzen nicht genau den Obertönen entsprechen.
- *Folien II(17)*

## 12 Beschreibe die Resonatoren im Dreirohr- und Vierrohr-System (mit Skizzen). Nenne jeweils einen Vokal, der sich durch diese Systeme modellieren lässt

- **Dreirohr:** Hinterrohr (beidseitig geschlossen), Vorderrohr (einseitig geschlossen), Helmholtzresonator (Hinterrohr+Artikulationsstelle), /i/
- **Vierrohr:** Hinterrohr (beidseitig geschlossen), hinterer Helmholtzresonator (Hinterrohr+Artikulationsstelle), Vorderrohr (beidseitig geschlossen), vorderer Helmholtzresonator (Vorderrohr+gerundete Lippen), /u/
- *Folien II(19, 21)*

**13 Woran lässt sich in der Formel für die Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators ablesen, dass der erste Formant bei Vokalen mit wachsendem Öffnungsgrad steigt?**

- $R_{Helm} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}}$   
( $c$ : Schallgeschwindigkeit,  $A$ : Querschnittsfläche des Resonatorhalses,  $V$ : Volumen des Resonatorkörpers,  $L$ : Länge des Resonatorhalses)
- Die Helmholtzresonanz  $R_{Helm}$  entspricht meistens dem tiefsten Formanten, also F1 (vgl. Nomogramm).
- $A$  bezieht sich auf die Querschnittsfläche der Artikulationsstelle.
- Da  $A$  mit sinkender Zungenhöhe steigt, erhöht sich gemäß obiger Formel auch  $R_{Helm}$  und damit F1.
- vgl. akustisches Vokaltrapez
- *Folien II(19–23), III(3–4)*

**14 Was ist ein Nomogramm?**

- Die Darstellung einer Variablen in Abhängigkeit mehrerer anderer Variablen (z.B. die Helmholtzresonanz in Abhängigkeit der Länge von Vorder- und Hinterrohr).
- *Folien II(22)*

**15 Zeichne den Formantverschieber inklusive der Artikulationsstellen: bilabial, alveolar und velar.**

- bilabial: 8/8
- alveolar: 7/8
- velar: 5/8
- *Folien II(24), III(13)*

**16 Wie lautet die Vorhersage des Formantverschiebers bei [b@], hinsichtlich der Bewegungen der Formanten F1, F2 und F3?**

- Verengung im 8/8 des Vokaltrakts → F1, F2 und F3 fallen zum [b] hin und steigen zum folgenden [@].
- *Folien II(24, 27)*