Einführung in die Signalverarbeitung

Phonetik und Sprachverarbeitung, 2. Fachsemester, Block Sprachtechnologie I

Florian Schiel

Institut für Phonetik und Sprachverarbeitung, LMU München

Signalverarbeitung - Teil 7

Allgemeines

- Unterrichtssprache ist Deutsch (englische Fachbegriffe in Klammern)
- Fragen am besten sofort; besser einmal zuviel gefragt
- Literatur:
  - Jurafsky D, Martin J H (2000): Speech and Language Processing. Prentice Hall, Kap I.7.
  - Schrüfer E (1980): Signalverarbeitung
  - Pfister B, Kaufmann T (2008): Sprachverarbeitung - Grundlagen und Methoden der Sprachsynthese und Spracherkennung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
  - Rabiner, Lawrence R., Schafer R W (1978): Digital Processing of Speech Signals. Prentice-Hall, New Jersey, USA.
  - Hess W (1993): Digitale Filter. Teubner Studienbücher, B.G.Teubner, Stuttgart.
  - Harrington J, Cassidi St (1999): Techniques in Speech Acoustics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London.

Sprachsignalverarbeitung III

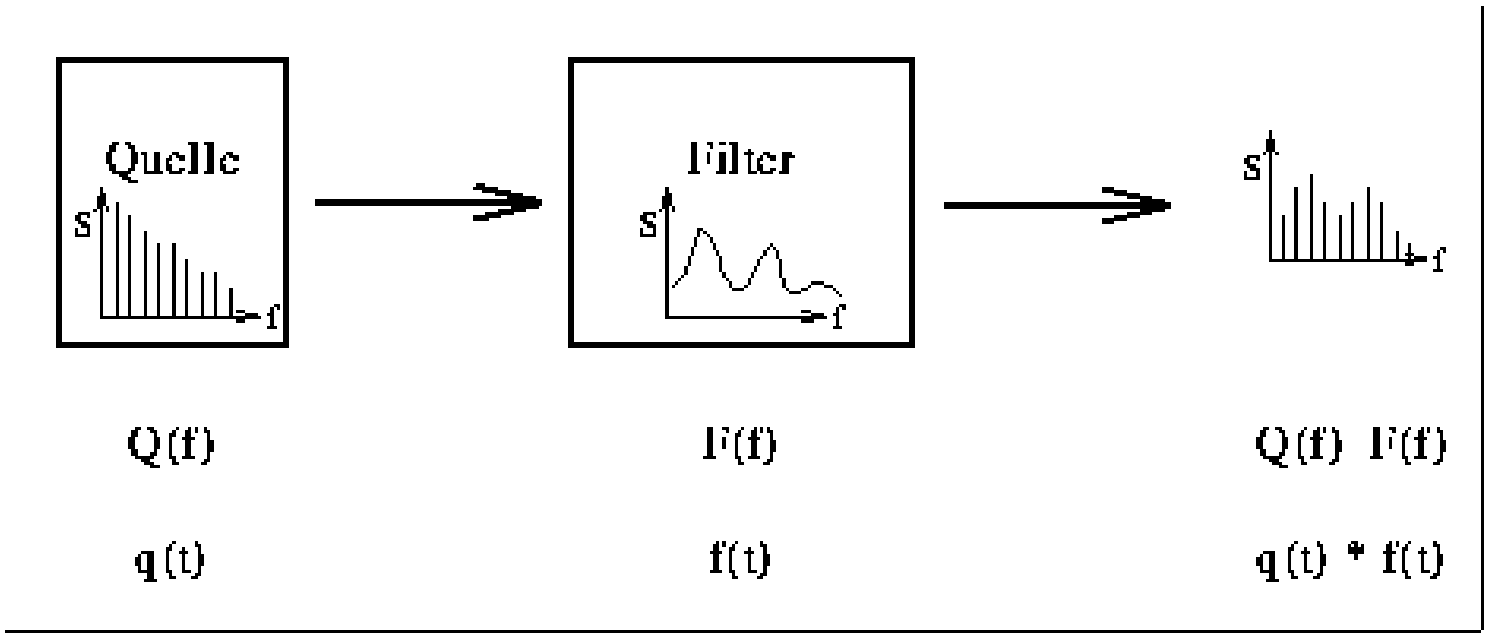
Anwendung der Methoden auf die Verarbeitung von Sprache.

- Lineare Prädiktion
- Cepstrum

Lineare Prädiktion (LP, linear prediction)

Quelle-Filter-Modell (Fant 1960)

Sprachsignal entsteht durch Signal der Quelle (z.B. Glottis) gefiltert von einem linearen Filter (z.B. Ansatzrohr).



Lineare Prädiktion (LP, linear prediction)

Ziel der *linearen Prädiktion* (linear prediction):
Trennung von Quellsignal $q(t)$ und Filterfunktion $F(f)$

Für allgemeine Quellensignale nicht möglich!

Annahme: Quellensignal ist ein Impulssignal
$\rightarrow$ Trennung ist möglich durch *lineare Prädiktion*

Idee der linearen Prädiktion:
Für ein Signalstück (Fenster) suche das Filter $P(f)$, welches das Signal in ein minimales Signal (Impulse) wandelt. Das inverse Filter von diesem Filter ist das gesuchte Vokaltraktfilter.

$$F(f) = P^{-1}(f)$$

Lineare Prädiktion (LP, linear prediction)

1. Signal fenstern; für jedes Fenster tue:
2. Prädiktorformel versucht, *den nächsten Abtastwert aus den K vorangegangenen Abtastwerten vorherzusagen:*

$$s'(t_n) = -a_1 s(t_{n-1}) - a_2 s(t_{n-2}) - \cdots - a_K s(t_{n-K})$$

$$s'(t_n) = -\sum_{k=1}^{K} a_k s(t_{n-k})$$

3. Voraussage kann nicht optimal sein. Der Fehler ist:

$$e(t_n) = s(t_n) - s'(t_n) = s(t_n) + \sum_{k=1}^{K} a_k s(t_{n-k}) = \sum_{k=0}^{K} a_k s(t_{n-k})$$

4. Wiederholung für alle Abtastwerte im Fenster der Länge N $\rightarrow (N - K)$ Gleichungen $e(t_n)$ mit K Unbekannten $a_0, a_1, a_2, \ldots, a_K$

Lineare Prädiktion (LP, linear prediction)

5. Überspezifiziertes Gleichungssystem ($N \gg K$)
   $\rightarrow$ keine analytische Lösung, aber Optimierungsverfahren (root mean square minimization) liefern die LP Koeffizienten (LP coefficients, LPC), welche ein minimales Fehlersignal $e(t_n)$ im ganzen Fenster ergeben
   $\rightarrow$ K LP-Koeffizienten a_k *für jedes Fenster* in Signal
   $\rightarrow$ sog. *inverses Filter* pro Fenster:

$$e(t_n) = \sum_{k=0}^{K} a_k s(t_{n-k}) \qquad \text{(FIR-Filter)}$$

6. Die Z-Transformierte dieses *inversen Filters* ist ein einfaches Polynom nach z:

$$P(z) = \sum_{k} a_k z^{-k} \qquad E(z) = P(z)S(z)$$

Lineare Prädiktion (LP, linear prediction)

7. Invertierung dieses Filters = geschätzte Filterfunktion des Ansatzrohres zum Zeitpunkt des Fensters im Signal. Invertieren im Frequenzbereich: Kehrwert bilden

$$F(z) = P^{-1}(z) = \frac{1}{\sum_k a_k z^{-k}}$$

8. Das Fehlersignal $e(t_n)$, also die Filterung von $s(t_n)$ im Fenster mit $P(z)$ ist das gesuchte Anregungssignal $q(t)$

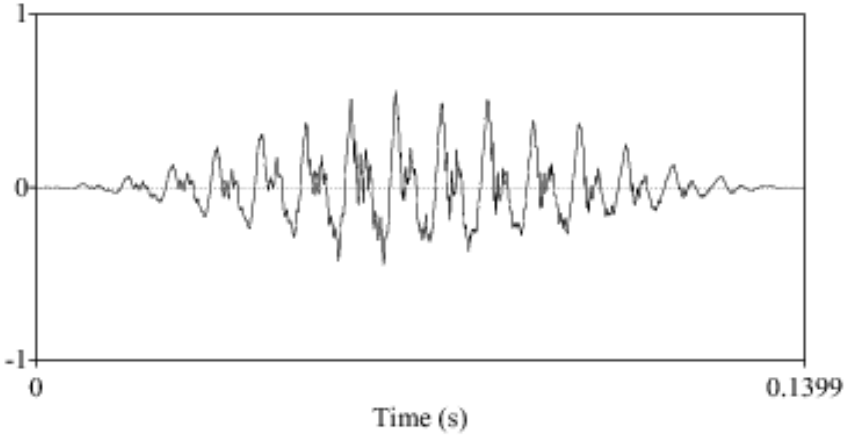
LPC-Analyse

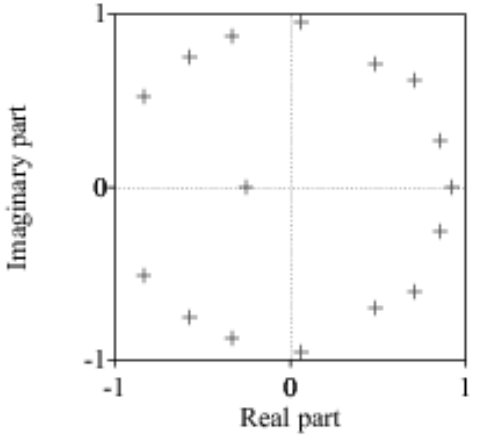
Die LPC-Analyse liefert für ein Sprachsignal pro Fensterung eine Schätzung für das Fant'sche Filter $F(f)$ und eine Schätzung für das Quellensignal $q(t)$ in diesem Fenster.

Lineare Prädiktion (LP, linear prediction)

Beispiel: LPC mit $K = 16$ in einem /u:/

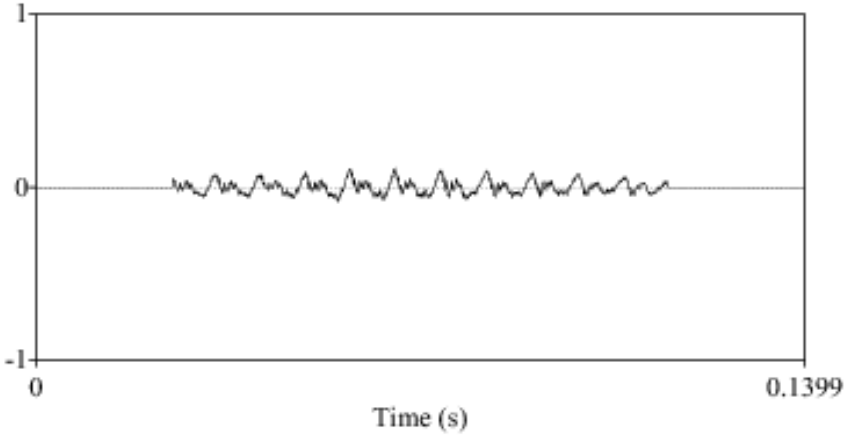
Signal $s(t)$

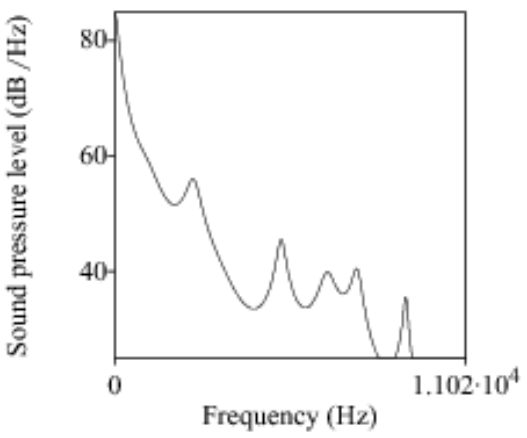




Pole in der z-Ebene

Anregung $q(t)$





Filter $F(f)$

Lineare Prädiktion (LP, linear prediction)

Diskussion des LP-Modells:

- Nach LP hat das Vokaltraktfilter nur Polstellen, keine Nullstellen; die Pole müssen in der z-Ebene innerhalb des Einheitskreises liegen, sonst Filter instabil
  $\rightarrow$ diese Modellannahme ist eher unwahrscheinlich; z.B. entstehen durch die Ankoppelung des Nasenraums *Antiformanten*, welche nur durch Nullstellen in der Filterfunktion modelliert werden können.
- Nach LP ist das Anregungssignal minimal
  $\rightarrow$ in der Realität besteht das Glottissignal nicht nur aus idealen Impulsen
  (durch ein Pre-emphase-Filter kann dies jedoch kompensiert werden; s. Pfister & Kaufmann, 2008, S. 87)
- LP-Modell funktioniert nicht bei impulsartigen oder stochastischen Anregungssignalen.

Lineare Prädiktion (LP, linear prediction)

Warum macht man (trotzdem) LPC-Analyse?

- Grundfrequenzbestimmung: leichter aus dem Anregungssignal (weil Impulssignal)
- Bestimmung der Formanten: leichter aus der Filterfunktion, weil Obertöne nicht mehr vorhanden
- Kompression: leichter das Anregungssignal und das Filter zu einem Handy zu übertragen als das Sprachsignal
- Manipulation: durch Veränderung der Anregung und anschließender Re-synthese lässt sich z.B. die Intonation ändern (z.B. für Sprachsynthese)
- Spracherkennung: leichter Sprache aus der Filterfunktion zu erkennen als aus dem Spektrum, weil Obertöne nicht mehr stören

Lineare Prädiktion (LP, linear prediction)

Demo: *Praat - Signal-Manipulation*

- *Signal laden*
- *To Manipulation* : LPC, Grundfrequenz wird bestimmt
- *Edit Manipulation* : Abstände der Impulse im Anregungssignal werden manipuliert
- *Play (LPC)* : LPC-Resynthese mit manipuliertem Anregungssignal
- *Manipulation : Extract Pulses* : erzeugt Pulsfolge aus Anregung (Point process)
- *Point Process : To Sound (hum)* : Resynthese mit neutralem Vokaltrakt

Cepstrum

Cepstrum

Das Cepstrum eines Signals beschreibt die Energie von periodische Formen ('Welligkeiten') im Amplitudenspektrum.

Cepstrum = **Spec**trum mit invertiertem 'spec'

Spektrum : N Spektralwerte (DFT)
Cepstrum : N cepstrale Werte

$$C(q_0), C(q_1), C(q_2), \ldots C(q_{N-1})$$

wobei die $q_n, \quad n = 0 \ldots N-1$ hier keine diskreten Frequenzen bezeichnen sondern *quefrencies* (gemessen in $\frac{1}{Hz}$)

Cepstrum

Jede *quefrency* steht für eine bestimmte trigonometrische Form im Spektrum:

Die quefrency q_0 bezeichnet einen 'unendlich langen Cosinus', also den *Gleichanteil* im Spektrum (= Gesamtenergie).
q_1 steht für eine Welligkeit, die einer halben Cosinus-Schwingung über das ganze Spektrum entspricht (= abfallendes Spektrum).
q_2 steht für eine Welligkeit, die einer ganzen Cosinus-Schwingung über das ganze Spektrum entspricht, also ein Spektrum in Form einer Senke u.s.w.

Cepstrum = spektrale Grobstruktur (Filter) bei niedrigen quefrencies + spektrale Feinstruktur (Quelle) bei hohen quefrencies

Cepstrum

Cepstrum entspricht *qualitativ* einer Discrete Cosine Transform (DCT) des logarithmierten Amplitudenspektrums.

Häufige Interpretationen der niedrigen Cepstralkoeffizienten:

q_0 : Gesamtenergie des Signals : immer ≥ 0
q_1 : Neigung des Spektrums : $> 0 \Rightarrow$ fallend, $< 0 \Rightarrow$ steigend
q_2 : Krümmung des Spektrums : $> 0 \Rightarrow$ Senke/Tal, $< 0 \Rightarrow$ Berg
q_3 : Assymmetrie des Spektrums : $> 0 \Rightarrow$ mehr Energie bei hohen Frequenzen, $< 0 \Rightarrow$ mehr Energie bei tiefen Frequenzen

Cepstrum

Berechnung des Cepstrums

1. Berechne das Amplitudenspektrum

$$|S(f_n)| = |\mathcal{F}\{s(t_n)\}|$$

2. Logarithmiere das Spektrum (jeder einzelne Spektralwert wird logarithmiert)

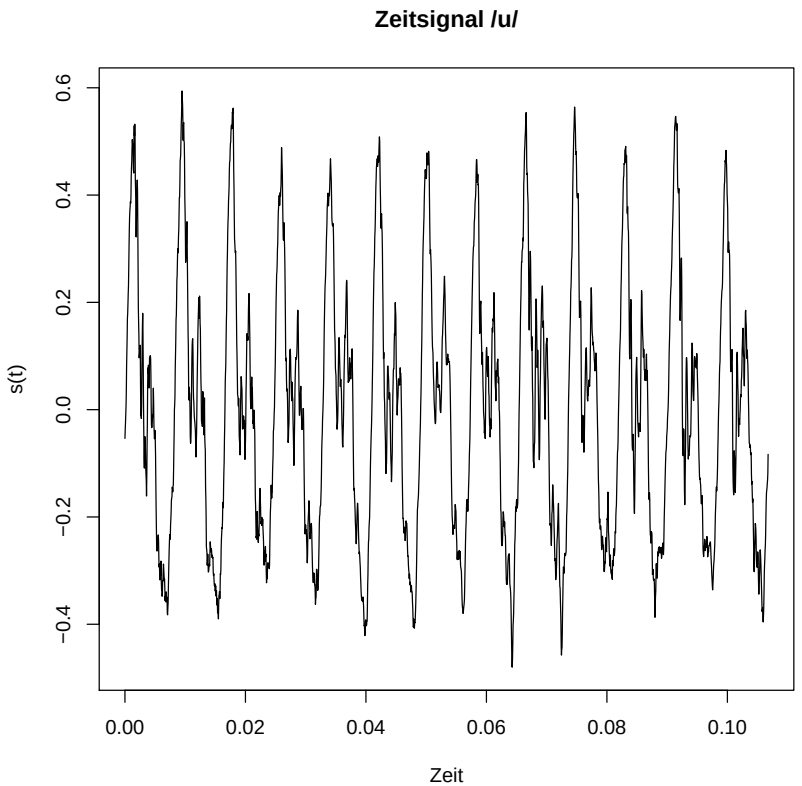
$$\log[|S(f_n)|]$$

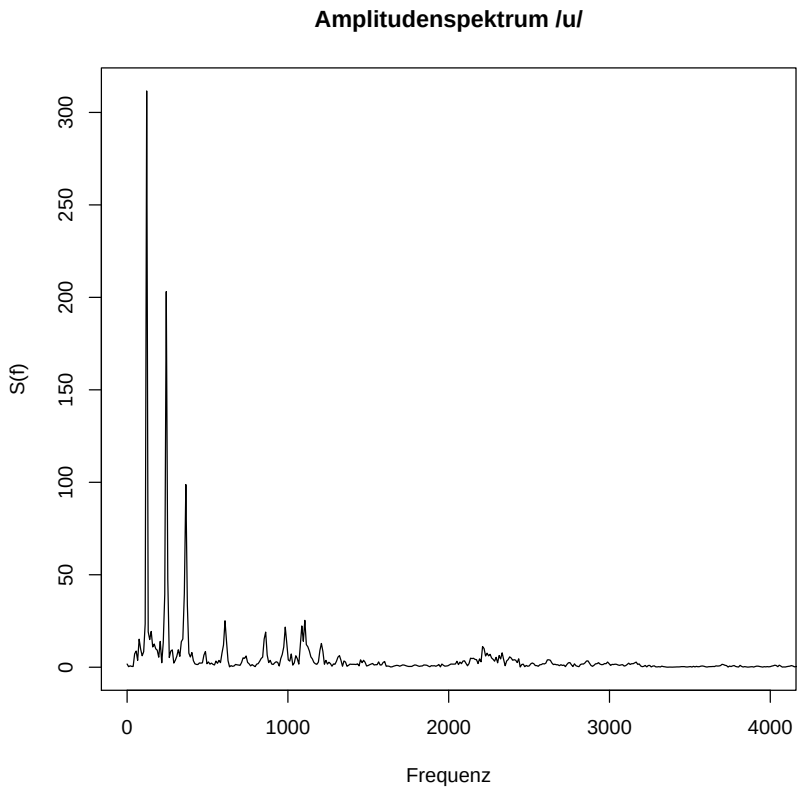
3. Inverse Fouriertransformation

$$C(n) = \mathcal{F}^{-1}\{\log[|S(f_n)|]\}$$

Cepstrum

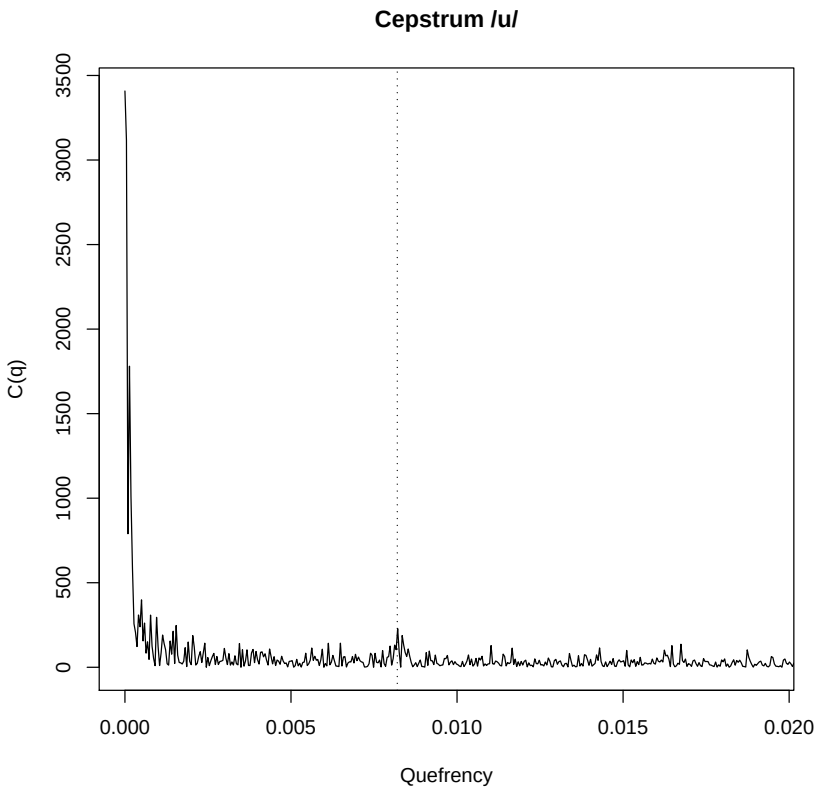
Beispiel



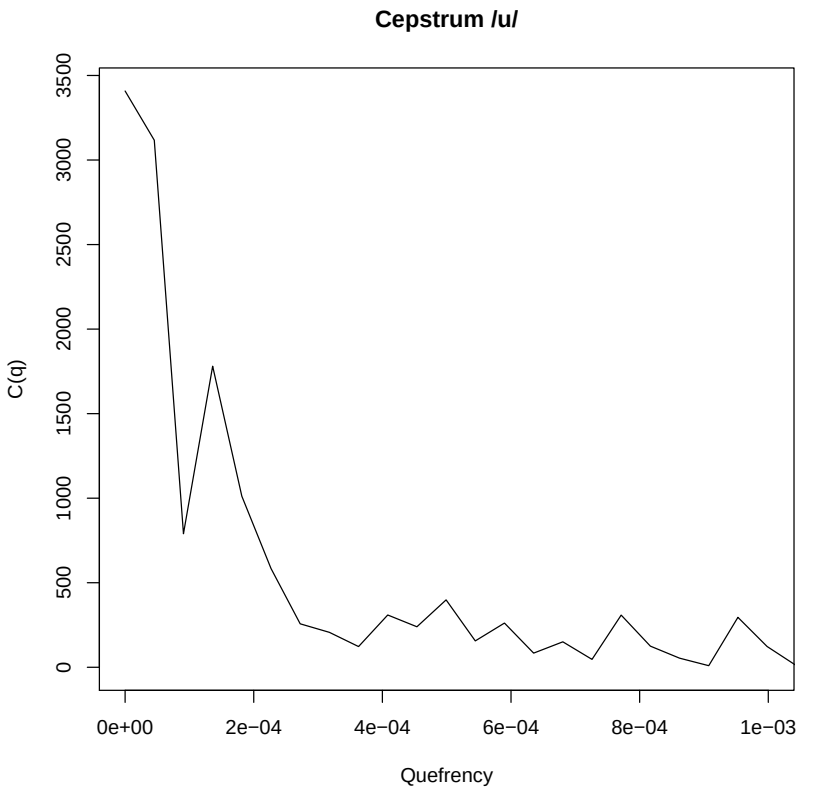


Cepstrum

|Cepstrum| $q = 0 \ldots 0.02 \frac{1}{Hz}$



|Cepstrum| $q = 0 \ldots 0.001 \frac{1}{Hz}$



Das Maximum bei $q_f = 0.008 \frac{1}{Hz}$ stammt von der Grundfrequenz ($f_0 = \frac{1}{q_f} \approx 120 Hz$).

Der Wert bei $q = 0 \frac{1}{Hz}$ ist die logarithmierte Gesamtenergie.

Der hohe Wert bei q_1 entsteht durch das stark abfallende Spektrum.

Cepstrum

Motivation für das Cepstrum

Quelle-Filter-Modell (Fant 1960)

Sprachsignal entsteht durch Signal der Quelle (z.B. Glottis) gefiltert von einem linearen Filter (z.B. Ansatzrohr).

$\rightarrow$ Sprachspektrum ist Produkt aus Quelle und Filter

$$S(f) = Q(f) \cdot F(f)$$

Logarithmus: Multiplikation wird zu Addition

$$\log[S(f)] = \log[Q(f)] + \log[F(f)]$$

Cepstrum

Inverse Fouriertransformation: Addition bleibt erhalten (weil lineares System):

$$\mathcal{F}^{-1}\{\log[S(f)]\} = \mathcal{F}^{-1}\{\log[Q(f)]\} + \mathcal{F}^{-1}\{\log[F(f)]\}$$

$\rightarrow$ im Cepstrum sind Quelle und Filter additiv verbunden und nicht mehr gefaltet.
$\rightarrow$ ungewünschte Teile können einfach subtrahiert werden
$\rightarrow$ *liftering* (abgeleitet on **fil**tering)

D.h. man kann z.B. im Cepstrum die Werte bei hohen quefrencies (= Quelle) einfach löschen, das Cepstrum zurück in ein Spektrum transformieren und erhält die Übertragungsfunktion des Ansatzrohres (= Filter).

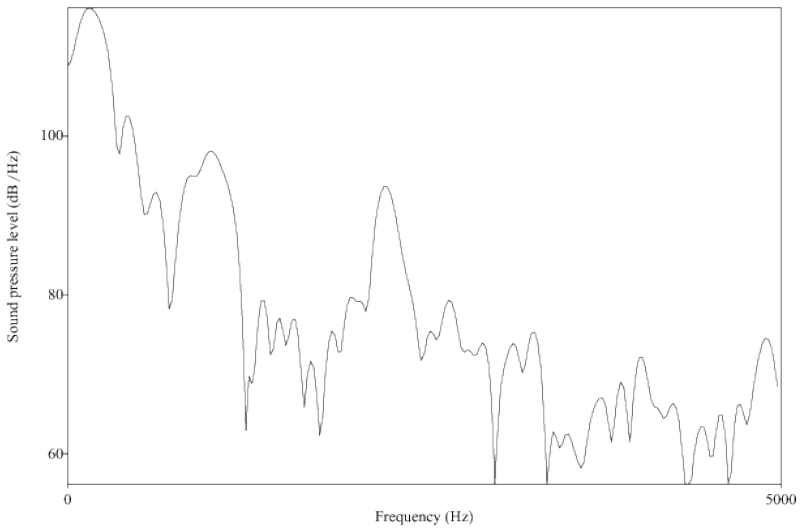
Cepstrum

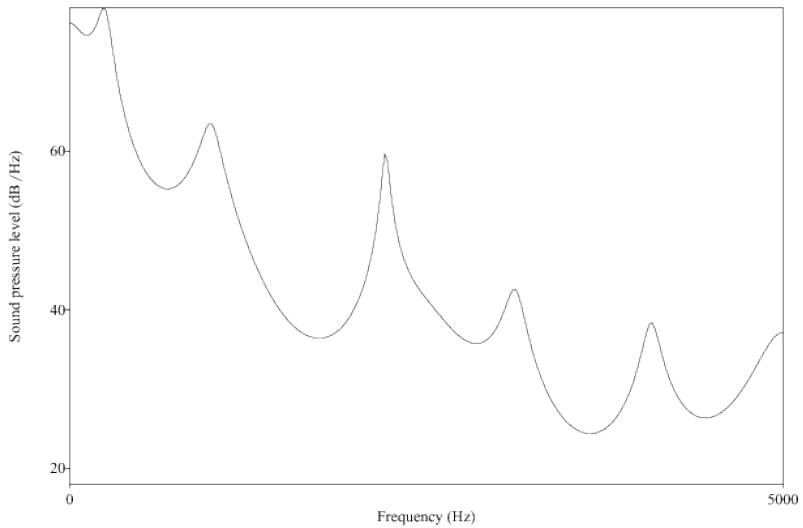
Wofür verwendet man das Cepstrum?

- Bestimmung der Grundfrequenz (= Position des Maximums)
- Cepstrale Glättung (cepstral smoothing):
  Im Cepstrum werden die Werte bei hohen quefrencies entfernt (= *liftering*) und wieder zurücktransformiert
  $\rightarrow$ Spektrum ohne Obertöne
- Automatische Spracherkennung:
  Cepstral-Werte bei niedrigen quefrencies eignen sich sehr gut als Muster (weil sie die Grobstruktur des Spektrums beschreiben);
  noch besser: *Mel Frequency Cepstral Coefficients* (MFCC):
  Cepstrum berechnet aus einer Mel-Filterbank.

Cepstrum

Beispiel: Sprachsignal /u:/
Normales Spektrum und cepstral geglättetes Spektrum
(liftering der ersten 16 cepstralen Koeffizienten)





Fragen

Was versucht die sog. Prädiktorformel der Linearen Prädiktion?

Warum verwendet die LP ein Optimierungsverfahren, um die LP-Coeffizienten zu bestimmen?

Sie haben ein Sprachsignal mit 1sec Länge und eine Fensterfunktion mit 50msec Länge (nicht-überlappend). Sie machen eine cepstrale Analyse und liftern auf die ersten 16 Cepstral-Koeffizienten. Welche/wieviele Daten erhalten Sie aus Ihrer Analyse?

Was unterscheidet das Cepstrum vom Sprachsignal?

Warum funktioniert cepstrale Glättung besser als eine einfache Glättung des Spektrums?