Sprachsynthese: Prosodie-Modellierung

Uwe Reichel
Institut für Phonetik und Sprachverarbeitung
Ludwig-Maximilians-Universität München
reichelu@phonetik.uni-muenchen.de

12. Januar 2023

Inhalt

- Prosodische Struktur
  - Phrasengrenzen
  - Akzente
- Intonation
  - Tonsequenzmodell
  - Fujisaki-Modell
- Segmentdauern
  - Klatt-Modell

Prosodische Struktur

Phonetische Korrelate

- **Phrasengrenzen**
  - Pausen
  - *Prefinal lengthening*
  - *Pitch Reset*
- **Akzente**
  - F0-Bewegung
  - Längung
  - erhöhte Intensität

Vorhersage von Phrasengrenzen: Interpunktion, Wortarten

Interpunktion

- Satzzeichen $\longrightarrow$ Phrasengrenze
- v.a. bei Lesesprache adäquat

Wortart: Chink-Chunk

- Liberman et al. (1992)
- Einteilung der Wortarten danach, ob sie überwiegend phraseninitial auftreten (*Chinks*: Determiner, Konjunktionen, Präpositionen ...) oder nicht (*Chunks*: Nomen, Verbpartikeln, ...)
- prosodische Phrase: *CHINK* CHUNK**

Vorhersage von Phrasengrenzen: Syntax

Syntaktische vs. prosodische Phrasen

- Prosodische Struktur i.d.R. **flacher** als syntaktische Struktur
  This is [*the cat that caught* [*the rat that stole* [*the cheese*]$_{NP}$]$_{NP}$]$_{NP}$.
  [*This is the cat*]$_{IP}$ [*that caught the rat*]$_{IP}$ [*that stole the cheese*]$_{IP}$. [1]

- Suche nach einer prosodisch motivierten syntaktischen Struktur

[1] aus Nespor&Vogel, 1986; NP: Nominalphrase, IP: Intonationsphrase

Vorhersage von Phrasengrenzen: Syntax

Performance-Struktur (Gee et al., 1983; Bachenko et al., 1990)

- empirisch abgeleitet von gemittelten Pausendauern zwischen benachbarten Wörtern
- ϕ-**Phrase**: Segmentierung des Satzes hinter jedem Inhaltswort, das den Kopf einer syntaktischen Konstituente bildet
- Ausnahmen: attributive Adjektive
- **Beispiel:**

  [**John**] [**asked**] [*the strange young* **man**] [*to be* **quick**] [*on the* **task**]

Vorhersage von Phrasengrenzen: Syntax

Chunk-Parser (Abney, 1991)

- **Chunks:** *major head*-fähige Inhaltswörter + zugehörige Funktionswörter + dazwischenliegende Inhaltswörter
- attributive Adjektive sind nicht *major head*-fähig
- **Beispiel:**
  [**John**] [**asked**] [*the strange young* **man**] *and* [**nodded**]
- Eingliederung unverknüpfter Wörter (**orphan nodes**; *'and'* im obigen Beispiel) in den nachfolgenden Chunk $\longrightarrow$ ϕ-Phrasen

Vorhersage von Phrasengrenzen: Statistische Ansätze

Statistischer Ansatz (Taylor&Black, 1998)

$$\begin{aligned} \hat{G} &= \arg\max_{G} \left[P(G|W) \right] \\ &= \arg\max_{G} \left[P(W|G) \cdot P(G) \right] \end{aligned} \tag{1}$$

- analog zu *Noisy-Channel*-Modell (*vgl. POS-Folien*)
- G: (binäre) Sequenz von Grenzlabels (ein Label je Wort; *"Grenze folgt"*, *"folgt nicht"*)
- W: POS-Sequenz
- Suche nach der Grenzlabelsequenz, die der beobachteten POS-Sequenz am wahrscheinlichsten zugrundeliegt

Vorhersage von Akzenten: Fokus

Fokus

- **Fokus = Informationszentrum** eines Satzes
- z.B. neue Information, Kontrastierung
- **weiter vs. enger** Fokus:
  - *Was gibt's Neues?* [*Connie hat ihrem Sohn die* Haare *geschnitten*]. (Bem.: **All-New-Satz, neutraler Akzent**)
  - *Was hat Connie getan? Connie hat* [*ihrem Sohn die* Haare *geschnitten*].
  - *Was hat Connie mit ihrem Sohn gemacht? Connie hat ihrem Sohn* [*die* Haare *geschnitten*].
  - *Was hat Connie ihrem Sohn geschnitten? Connie hat ihrem Sohn* [*die* Haare] *geschnitten.*

Vorhersage von Akzenten auf Silben

Simpel: nach **Wortarten**

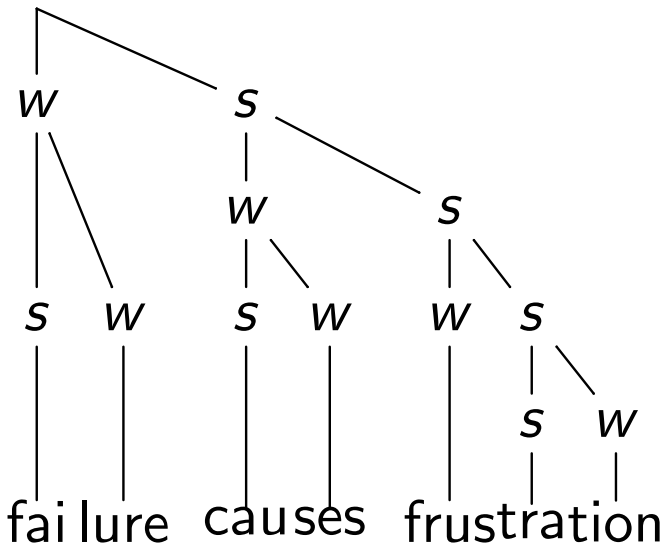
- Funktionswörter sind i.d.R. unakzentuiert

Durch **Syntaktisch-phonologische Ansätze**

- **metrische Phonologie** (Liberman, 1975; Liberman et al., 1977)
- Vorhersage des **neutralen Akzents** (bei weitestmöglichem Fokus)
  geg. (deutsche) Konstituente $[AB]_C$:
  Nucleus Stress Rule (NSR): Ist C eine Phrase, so ist B *strong s*.
  Compound Stress Rule (CSR): Ist C ein Wort oder Teil eines Wortes, so ist B *strong*, wenn es sich weiter verzweigt, ansonsten ist A *strong* und B *weak w*

Vorhersage von Akzenten: Syntax

- Akzentuierungsverhältnisse in Form **metrischer Bäume** oder **metrischer Gitter**



Vorhersage von Akzenten: Semantik

Durch **Semantische Ansätze**

- Existenz eines **neutralen Akzents**, der sich anhand der Syntax vorhersagen lässt (vgl. *NSR*), wird bestritten (Bolinger, 1972):

  Er versteht es, Erklärungen zu ignorieren.

  Er versteht es, Erklärungen *zu geben.*

- Akzentuierung eines Wortes durch sein **semantisches Gewicht** (= relative Vorhersagbarkeit aus dem Kontext)
- Fülle an Einflußfaktoren $\longrightarrow$ *'Accent is predictable (if you're a mind reader)'*

Vorhersage von Akzenten: Semantisches Gewicht

Statistische Modellierung des semantischen Gewichts

- **n-Gramm-Wahrscheinlichkeiten** eines Worts w_i (z.B. Pan et al., 2000)
- **Bezug:** je geringer die n-Gramm-Wahrscheinlichkeit eines Worts, desto weniger vorhersagbar, desto wahrscheinlicher akzentuiert
- $P(w_i)$: **globale** (kontextunabhängige) Vorhersagbarkeit
- $P(w_i|w_{i-1})$: **lokale** (kontextabhängige) Vorhersagbarkeit

Vorhersage von Akzenten: Diskurs

Aus **Diskurs: Neue vs. bekannte Information**

- **neue** Information akzentuiert, **gegebene** Information nicht
- **gegebene Information:**
  - im bisherigen Diskursverlauf bereits übermittelt
  - zum von Sprecher und Hörer geteilten Weltwissen gehörig
  - aus dem situativen Kontext erschließbar.

Vorhersage von Akzenten: Diskurs

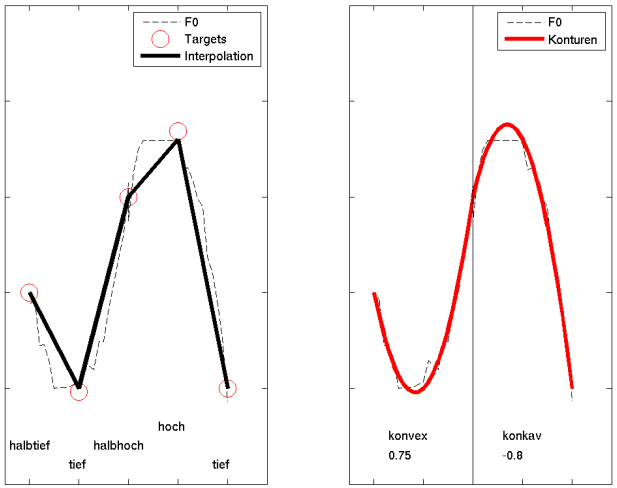
Verfahren nach Hirschberg (1993)

- *given*: globaler und lokaler Hintergrund
- **global:** grundsätzliches Thema, repräsentiert durch Liste der Inhaltswörter des ersten Satzes; über gesamten Text gültig
- **lokal:** *queue* von Hintergrundbereichen (Inhaltswörter eines Satzes), die durch *push*- und *pop*-Operationen laufend aktualisiert wird
- Operationen durch Interpunktion und Diskursmarker gesteuert; an Absätzen wird der lokale Hintergrund komplett geleert
- Wörter, die sich bereits im globalen oder lokalen Hintergrund befinden, werden **deakzentuiert**

Intonationsmodelle: vom Akzent zur F0

Dichotomien

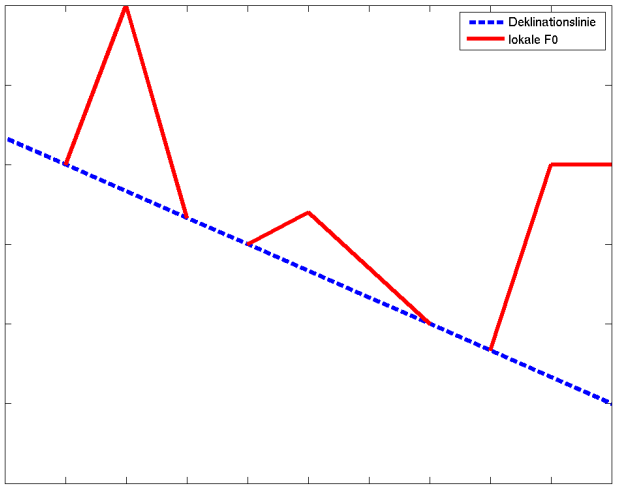
1. **Tonbasiert vs. konturbasiert**
2. **Symbolisch vs. parametrisch**



Links: F0-Verlauf als Abfolge symbolisch etikettierter Ton-Targets. **Rechts:** F0-Verlauf als Abfolge von Konturen mit symbolischen Etiketten bzw. parametrischen Krümmungskoeffizienten der Stilisierungsparabeln.

Intonationsmodelle

3 Einschichtig vs. Superpositional

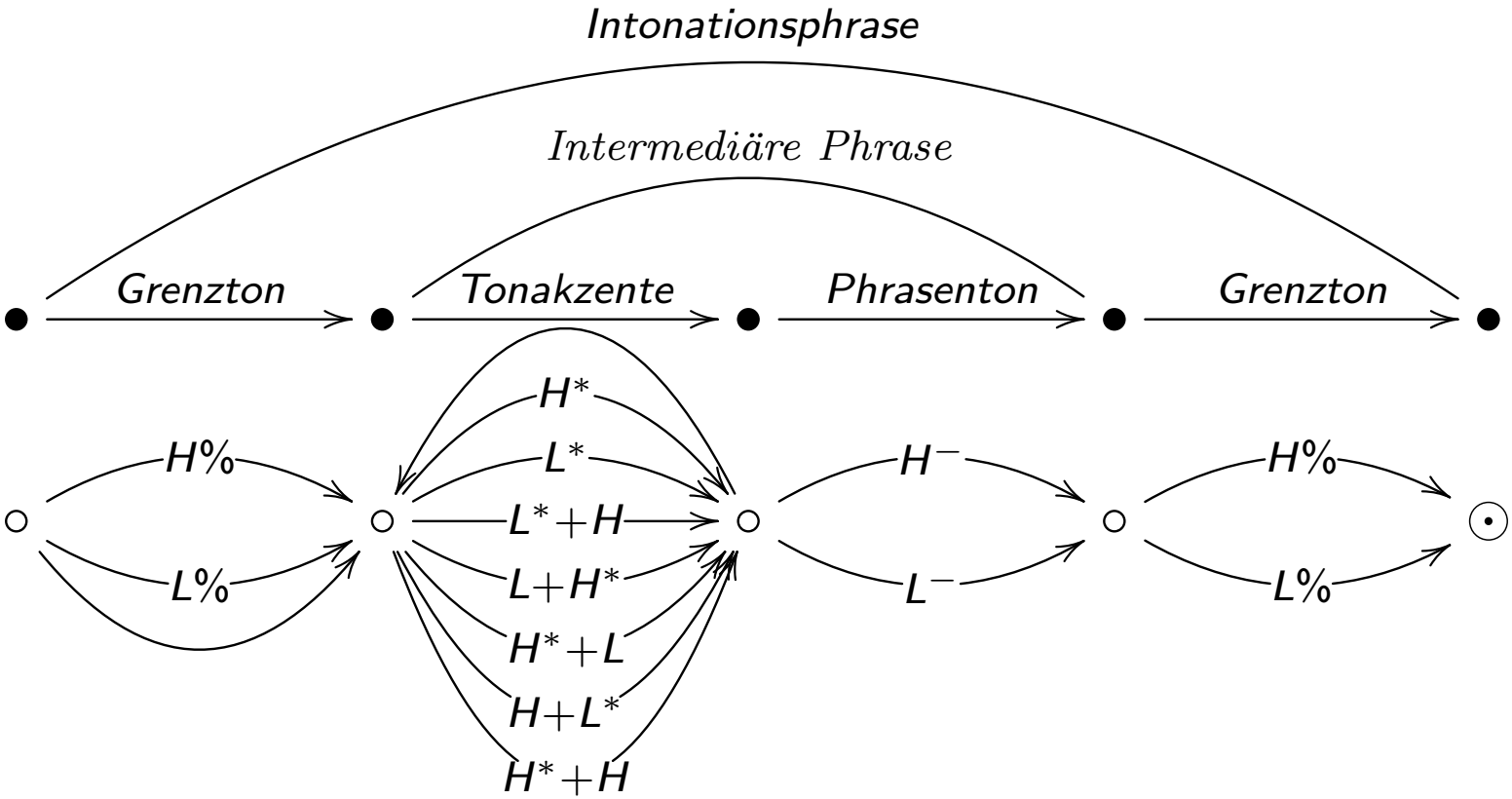


Superpositionale Darstellung des F0-Verlaufs als Überlagerung von globaler Deklinationslinie und lokalen F0-Bewegungen.

Tonsequenzmodell

Tonbasiert

- Intonation als Abfolge von Tönen



Tonsequenzmodell

- **elementare Töne:** H, L
- **komplexe Töne:** $H + L^*$ etc.
- $*$ verknüpft Ton mit der akzentuierten Silbe
- **Grenztöne:**
  - '%' am Rand von Intonationsphrasen (*progredienter vs. finaler* F0-Verlauf)
  - '–' am Ende von intermediären Phrasen

Tonsequenzmodell

Vorhersage der Töne

- **kompositionales Modell** nach Pierrehumbert&Hirschberg (1990)
- Informationsstatus $\longrightarrow$ Tonakzent:
  - neue Information, Hervorhebung $\longrightarrow$ H^*, $L + H^*$
  - gegebene Information, Inferierbarkeit $\longrightarrow$ L^*, $H + L^*$
- Orientierung der aktuellen Intonationsphrase im Diskurs $\longrightarrow$ Grenztöne
  - final $\longrightarrow$ LL%; progredient $\longrightarrow$ LH%

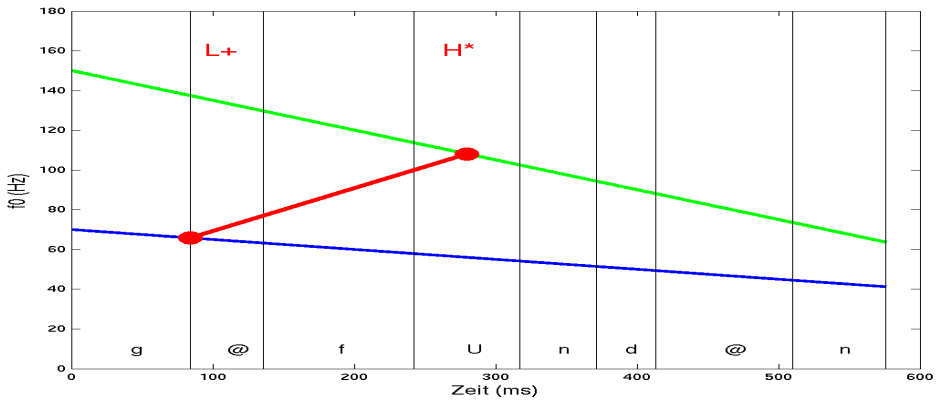
Tonsequenzmodell

Symbolische Beschreibung

$\longrightarrow$ zusätzliche Modelle zur Überführung der Tonsymbole in F0-Werte nötig

- **regelbasiert** (Anderson, 1984; Jilka , 1999):
  - Ermittlung von F0-Zielwerten relativ zum Silbennukleus und relativ zu Topline und Baseline
  - **Faktoren:** Akzenttyp, metrische Prominenz der assoziierten Silbe, Position innerhalb der Phrase, Phrasenlänge, vorangehende F0-Werten

Tonsequenzmodell



F0-Kontur für $L + H^*$: L auf Grundlinie zu Beginn des Nukleus der präakzentuierten Silbe; H^* auf Toplinie in der Mitte des Nukleus der akzentuierten Silbe; Beispiel nach Schröder&Trouvain (2003).

Tonsequenzmodell

- **statistisch** (Black, 1996)
  - drei F0-Werte y je tonal markierter Silbe
  - Berechnung mittels Regressionsanalyse:

$$y = c_0 + \sum_i c_i \cdot p_i \quad (2)$$

  - Prädiktoren p_i: Tonlabel, Grenzlabel, Wortbetonung, Position der Silbe in der Intonationsphrase
  - binäre Codierung kategorialer Prädiktoren

Tonsequenzmodell

Einschichtig

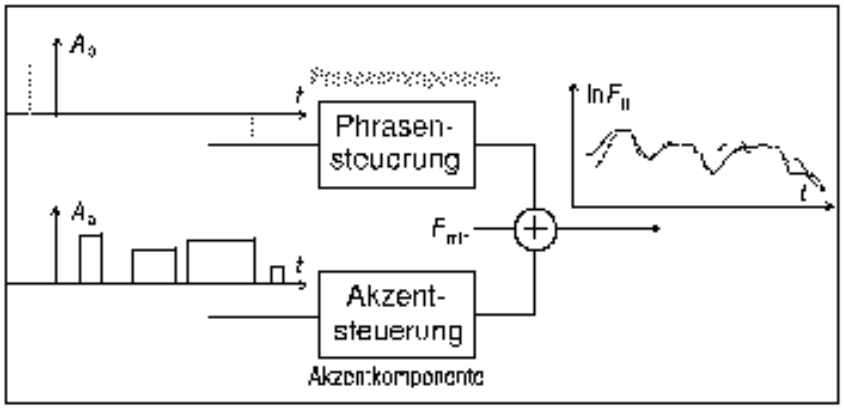
- Modellierung globaler Phänomene als Abfolge lokaler Ereignisse
- Deklination repräsentiert als Sequenz von *Downsteps*
- keine Vorausplanung modellierbar (Tonsequenz in Form eines endlichen Automaten)

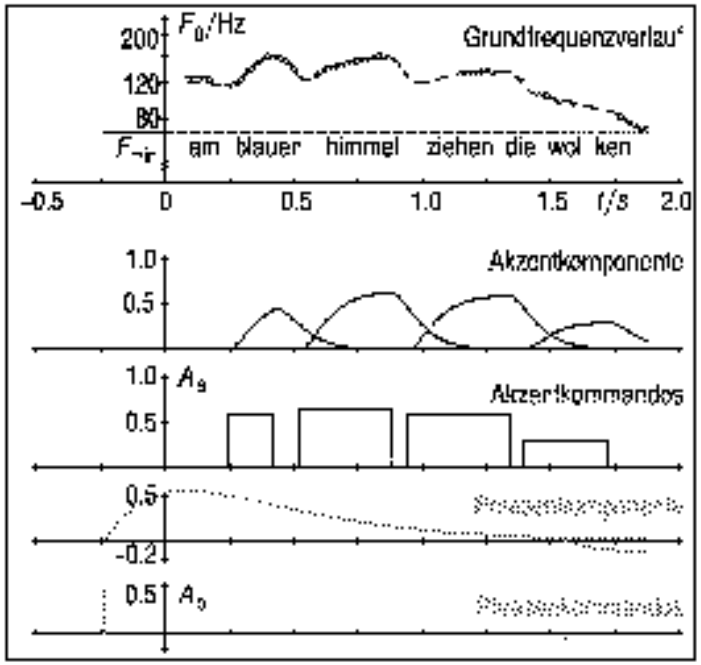
Fujisaki-Modell

Aufbau

- Fujisaki (1987)
- konturbasiert, superpositional, parametrisch
- Superposition der Outputs von **Phrasenkomponente** $C_p(t)$, **Akzentkomponente** $C_a(t)$ und **Baseline-F0** F_{min}
- $C_p(t)$ und $C_a(t)$ als **kritisch gedämpfte Systeme** realisiert (d.h. sie schwingen bei der Rückkehr in die Ruhelage nicht darüber hinaus)
- Anregung durch **Phrasenkommandos** A_p (Impuls), bzw. **Akzentkommandos** A_a (Rechteckfunktion)

Fujisaki-Modell





Fujisaki-Modell

Phrasenkomponente

- globale Intonationskontur
- positives A_p markiert den Beginn einer Intonationsphrase (*pitch reset*) oder am Ende Frageintonation, bzw. Nicht-Finalität der Phrase
- negatives A_p am Ende der Phrase markiert Finalität (*final lowering*)

Akzentkomponente

- lokale F0-Bewegungen auf akzentuierten Silben
- A_a-Amplitude nimmt im Verlauf der Phrase ab (im Zuge der Deklination fallende Topline)

Fujisaki-Modell

Stilisierung

$$lnF_0(t) = lnF_{\min} + \sum_i A_{pi} C_p(t - T_{pi}) + \sum_j A_{aj} \left[C_a(t - T_{1j}) - C_a(t - T_{2j}) \right] \quad (3)$$

$$C_p(t) = \begin{cases} \alpha^2 t e^{-\alpha t} & : \quad t \geq 0 \\ 0 & : \quad t < 0 \end{cases} \qquad C_a(t) = \begin{cases} 1 - (1 + \beta t) e^{-\beta t} & : \quad t \geq 0 \\ 0 & : \quad t < 0 \end{cases}$$

- T_p: Zeitpunkt des Phrasenkommandos,
- T_1, T_2: Start- und Endzeitpunkt des Akzentkommandos,
- A_p, A_a: Amplituden der Kommandos,
- α, β: Dämpfungsfaktoren des Phrasen- und Akzentsystems, die die Dauer der F0-Bewegungen mitbestimmen.

Fujisaki-Modell

Schätzung der Parameter: Analyse durch Synthese

- **Analyse** der F0-Kontur **durch Synthese** mit dem Fujisaki-Modell
- Mixdorff (2002):
  - Hochpassfilterung der geglätten und interpolierten Kontur zur Trennung von Phrasen- (nieder-) und Akzentkontur (hochfrequent)
  - getrennte Anpassung der Parameter an jeweilige Kontur (Akzentkontur für Akzentkomponente, Phrasenkontur für Phrasenkomponente) mit Gradientenverfahren
  - weitere Feinanpassung der Parameter an komplette Kontur

Fujisaki-Modell

Vorhersage der Parameterwerte

- **Möbius (1993, 1995)**
  - regelbasiert
  - **Faktoren:** u.a. Satzmodus, Position in Intonationsphrase, Wortart
- **Mixdorff (1998)**
  - regelbasiert
  - Textsegmetierung in **Intonemsegmente** nach Isacenko (1964)
    - $I \downarrow$: **Informationsintonem:** fallend, Abschluss einer Informationseinheit
    - $N \uparrow$: **Nonterminalitäts-Intonem:** steigend, Nichtabgeschlossenheit der Äußerung
    - $C \uparrow$: **Kontaktintonem:** steigend, Kontaktaufnahme mit dem Hörer beispielsweise (z.B. Frage)

Fujisaki-Modell

Probleme bei der Interpretation

- Kein eineindeutiger Zusammenhang zwischen Parameterwerten und Verlauf der generierten Kontur (unterschiedliche Parameterbelegungen können zur selben Kontur führen) $\longrightarrow$ textbasierte Vorhersage erschwert
- Modell kann jede Kontur mit Nullabweichung beschreiben, wenn Akzentkommandos nur eng genug aufeinanderfolgen; linguistisch dann nicht mehr interpretierbar

Einflussfaktoren auf Segmentdauern

Prosodische Struktur

- Akzente: Segmentlängung
- präfinale Längung an Phrasengrenzen

Lautkontext

- **intrinsische Lautdauern:**
  bei hohen Vokalen kürzer als bei tiefen
  bei stimmhaften Konsonanten kürzer als bei stimmlosen
- **ko-intrinsische Lautdauern:**
  Vokaldauer kürzer vor stimmlosen Obstruenten als vor stimmhaften

Dauer-Modellierung

Klatt (1979)

$$D = m \cdot D_{min} + \prod_i f_i \cdot (D_{inh} - m \cdot D_{min}) + d \qquad (4)$$

- **Parameter:**
  D: aktuelle Lautdauer
  D_{inh}: inhärente Lautdauer
  D_{min}: minimale Lautdauer (abhängig von Kompressionsfähigkeit)
  m, f_i, d: Faktoren, deren Werte über Regeln zu bestimmen sind (Default 1)

Dauer-Modellierung

- **Faktoren:**
  - Lautkontext
  - Wortbetonung, Akzent
  - Position in Silbe, Wort, Intonationsphrase
- **Regelbeispiele (experimentell ermittelt):**
  - Nichtfinale Kürzung: Der Silbenkern jeder Silbe in nichtfinaler Stellung wird verkürzt; $f_3 := 0.6$.
  - Kürzung in nicht-initialer Stellung. Konsonanten, die nicht am Wortanfang stehen, werden verkürzt: $f_6 := 0.85$.