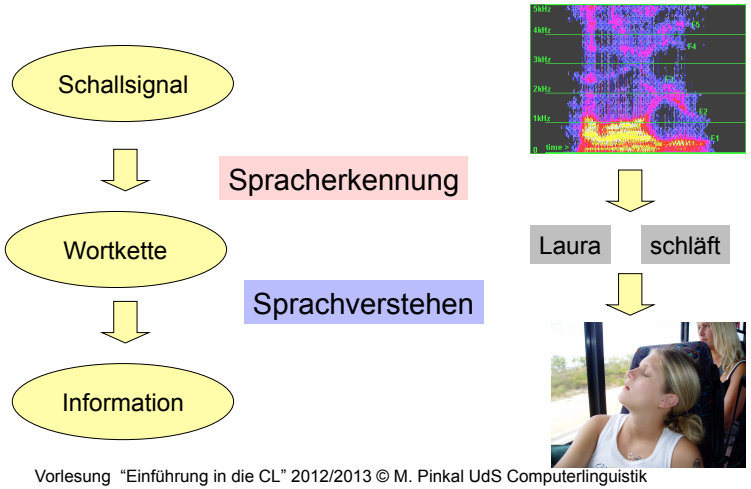
Einführung in die Computerlinguistik

Verarbeitung gesprochener Sprache

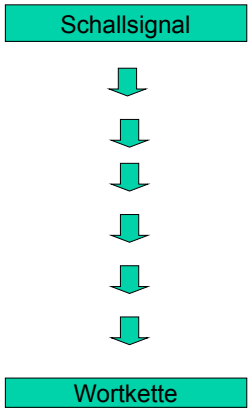
WS 2012/2013

Manfred Pinkal

Sprachverarbeitung

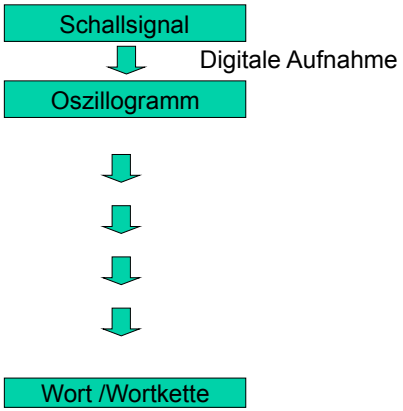


Spracherkennung

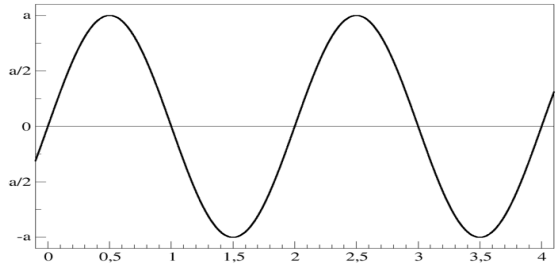


- Die Grundaufgabe der Spracherkennung: Gegeben ist ein kontinuierliches Schallsignal. Welche Kette von Wörtern wurde vom Sprecher geäußert?

Spracherkennung

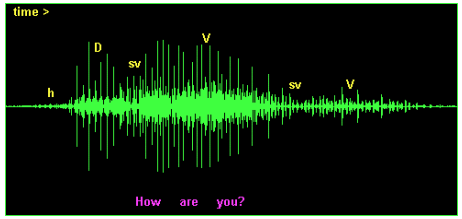


Reine Schwingung

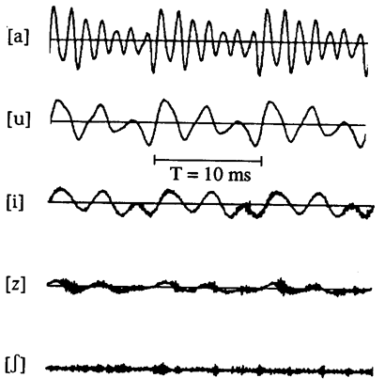


Ein Oszillogramm

- Das Oszillogramm für eine Äußerung des englischen Satzes „How are you"

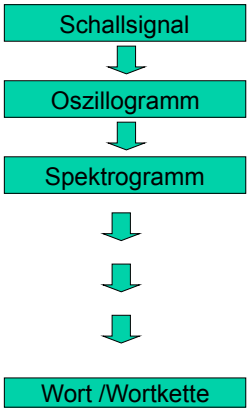


Einzelne Laute als Oszillogramme



- Laute werden charakterisiert durch Kombination von Schwingungen verschiedener Frequenzen
- Im Oszillogramm **schwer erkennbar** (Überlagerung)
- Daher: Geschicktere Repräsentation durch Komponentenanalyse (Fourier-Transformation)
- Ergebnis: Zeit-Frequenz-Diagramm (**Spektrogramm**)

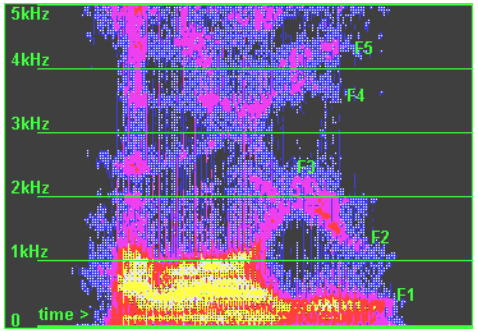
Spracherkennung: (Vereinfachtes) Schema



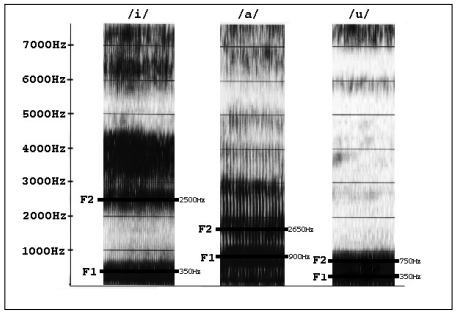
Digitale Aufnahme

Zerlegung in Einzelfrequenzen

Ein Spektrogramm



Spektrogramm für die Vokale i,a,u



- Dunkle Färbung: große Schallenergie in einem bestimmten Frequenzbereich.
- Die Formanten (Obertöne) F1 und F2 sind für die charakteristische Vokalqualität verantwortlich.
- Der Verlauf des Basisformanten F0 (hier nicht sichtbar) gibt die Intonation der Äußerung wieder.

Spracherkennung: (Vereinfachtes) Schema

Schallsignal

↓ Digitale Aufnahme

Oszillogramm

↓ Zerlegung in Einzelfrequenzen

Spektrogramm

↓

?

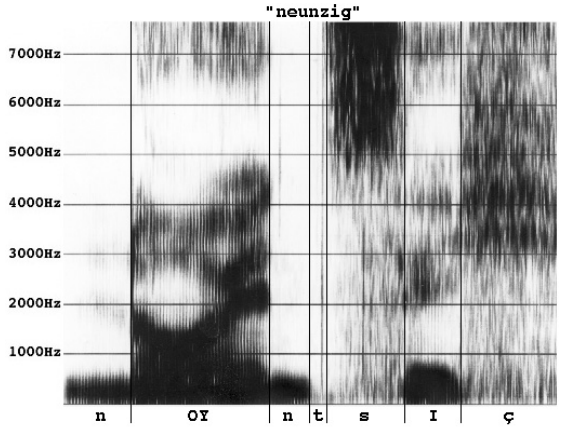
↓

Wort /Wortkette

Spracherkennung: Versuch 1

- Identifikation von Lautgrenzen im Spektrogramm (Segmentierung) + Klassifikation durch Abgleich der Spektrogramm-Segmente mit einer Datenbank "idealer" Laute ; Verknüpfung der identifizierten Laute zu Wörtern und Sätzen.

Spektrogramm für ein deutsches Wort



Spracherkennung: Versuch 1

- Identifikation von Lautgrenzen im Spektrogramm (Segmentierung) + Abgleich der Spektrogramm-segmente mit einer Datenbank "idealer" Laute (Identifikation); Verknüpfung der identifizierten Laute zu Wörtern und Sätzen.
- Funktioniert nicht, wegen der Varianz des Signals.

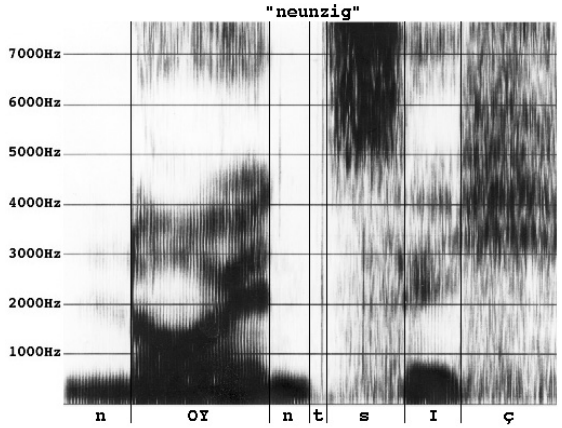
Problem 1: Varianz des Signals

- Gleicher Laut/ gleiches Wort wird nicht immer gleich ausgesprochen
  - Verschiedene Dialekte
  - Verschiedene Sprecher
  - Unterschiedliche Sprechgeschwindigkeit
  - Physischer und emotionaler Zustand des Sprechers
  - Abhängig von Tonhöhe und Akzent
- Sprachexterne Einflüsse verändern das Signal
  - Raumakustik, Hall, Entfernung
  - Medium: direkte Kommunikation, Telefon, Handy
  - Mikrofonqualität und -charakteristik
  - Hintergrundgeräusche

Spracherkennung: Versuch 2

- Identifikation von Lautgrenzen im Spektrogramm (Segmentierung)
- Erstellung eines Trainingskorpus mit Lautannotationen (alignierte phonetische Annotation)
- Bestimmung von Merkmalsmustern für die Spektrogrammsegmente
- Training eines statistischen Laut-Klassifikators

Spektrogramm für ein deutsches Wort



Spracherkennung: Versuch 2

- Identifikation von Lautgrenzen im Spektrogramm (Segmentierung)
- Erstellung eines Trainingskorpus mit Lautannotationen (alignierte phonetische Annotation)
- Bestimmung von Merkmalsmustern für die Spektrogrammsegmente
- Training eines statistischen Laut-Klassifikators

- Funktioniert nicht, vor allem wegen der Kontiniuität des Signals.

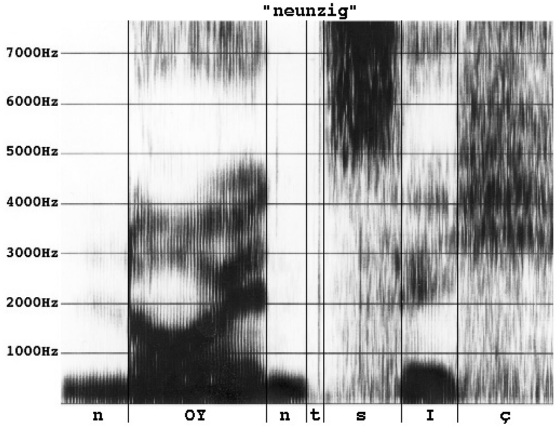
Problem 2: Kontinuität des Signals

- Die Laute eines Wortes lassen sich schwer gegeneinander abgrenzen
  - Wo hört Laut 1 auf, wo fängt Laut 2 an?
  - Dazu kommt das Phänomen der Koartikulation: Laute beeinflussen sich gegenseitig.
    - In Lautfolgen wie [am], [um], [an] kann man nicht den Vokal vom Nasal trennen: Vokal hat Nasal-Qualität und umgekehrt.
    - /k/ wird verschieden realisiert in Koffer, Kind, Kabel
- Wörter sind nur in der Orthografie sauber getrennt.
  - In der gesprochenen Sprache gibt es zwischen Wörtern meistens keine Pause
  - Pausen kommen in spontaner Sprache auch innerhalb von Wörtern vor

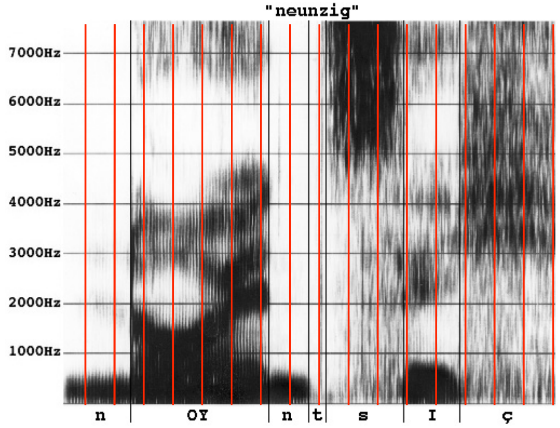
Statistische Modellierung

- Ermittlung der wahrscheinlichsten Wortkette
  - $W = w_1 w_2 \ldots w_n$, die einem beobachteten akustischen Signal entspricht.
- Die akustische Information, die durch die Lautspektrographie bereitgestellt wird, ist zu differenziert für statistische Berechungen.
- Wir erzeugen eine handhabbare Charakterisierung der akustischen Information durch Merkmals-extraktion.

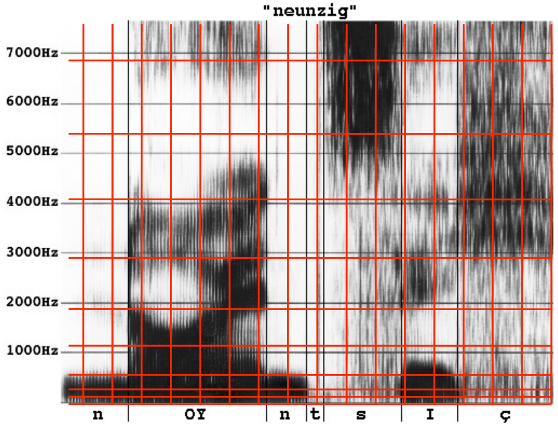
Spektrogramm für ein deutsches Wort



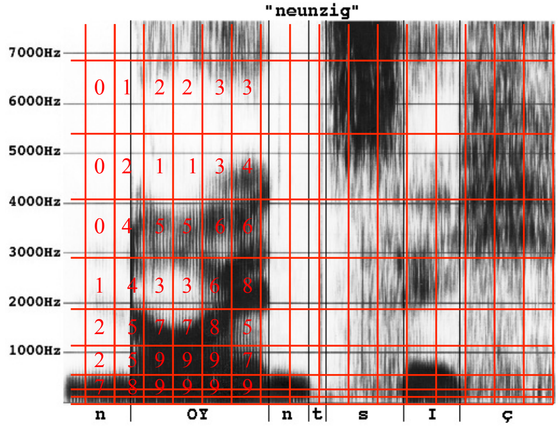
Spektrogramm für ein deutsches Wort



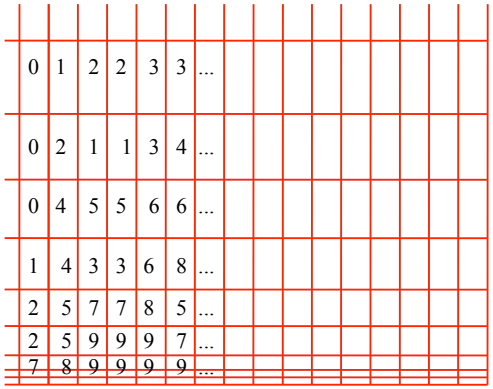
Spektrogramm für ein deutsches Wort



Spektrogramm für ein deutsches Wort



Merkmalsmuster, Ausschnitt



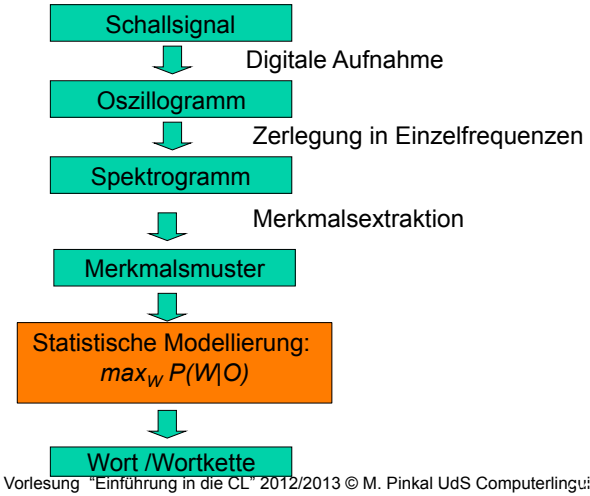
0	1	2	2	3	3	...
0	2	1	1	3	4	...
0	4	5	5	6	6	...
1	4	3	3	6	8	...
2	5	7	7	8	5	...
2	5	9	9	9	7	...
7	8	9	9	9	9	...

Merkmalsextraktion

- Bestimmung der Schallenergie in einzelnen Frequenzfenstern (z.B. Viertelton) und Zeitfenstern (z.B. 20 ms).
- Resultat ist eine Folge $O = o_1\ o_2\ ...\ o_m$ von (Einzel-) Beobachtungen
- Jedes o_i ist ein Merkmalsvektor, der die Schallenergie für die unterschiedlichen Frequenzfenster in einem bestimmten Zeitfenster angibt.
- Die erkannte Wortkette ist

$$max_W\ P(W|O) = P(w_1 w_2\ ...\ w_n|\ o_1\ o_2\ ...\ o_m)$$

Spracherkennung: (Vereinfachtes) Schema



Wie bestimmen wir *P(W|O)*?

- Sparse-Data-Problem!
- Erster Antwortschritt: Wir nutzen das Bayes-Theorem.

Erinnerung: Bayes-Theorem für WSD

- Merkmalsmuster v : Symptom
- Wortsinn s : Ursache
- Mit Bayes-Regel : $P(s \mid v) = \frac{P(v \mid s) \cdot P(s)}{P(v)}$
- Der wahrscheinlichste Wortsinn: $\max_s P(s \mid v) = \max_s \frac{P(v \mid s) \cdot P(s)}{P(v)}$
  $= \max_s P(v \mid s) \cdot P(s)$
- $P(s)$ ist die globale, "a priori"-Wahrscheinlichkeit des Wortsinns s.
- $P(v)$, die Wahrscheinlichkeit des Merkmalsmusters, wird nicht mehr benötigt.

Wie bestimmen wir *P(W|O)*?

- Sparse-Data-Problem!
- Akustisches Merkmalsmuster *O* : Symptom
- Tatsächlich geäußerte Wortkette *W* : Ursache
- Mit Bayes-Regel : $P(W \mid O) = \frac{P(O \mid W) \cdot P(W)}{P(O)}$
- Die wahrscheinlichste Wortkette: $\max_W P(W \mid O) = \max_W \frac{P(O \mid W) \cdot P(W)}{P(O)}$
  $= \max_W P(O \mid W) \cdot P(W)$
- $P(W)$ ist die globale, "a priori"-Wahrscheinlichkeit der Wortkette W.
- $P(O)$, die Wahrscheinlichkeit des Merkmalsmusters, wird nicht mehr benötigt.

Akustisches Modell und Sprachmodell

$$\max_W P(W \mid O) = \max_W P(O \mid W) \cdot P(W)$$

- *P(O|W)* ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Wortfolge in einer bestimmten (durch den Merkmalsvektor bezeichneten) Weise ausgesprochen wird: Akustisches Modell
- *P(W)* ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Wortfolge geäußert wird: „Sprachmodell"

Sprachmodelle

$$\max_W P(W \mid O) = \max_W P(O \mid W) \cdot P(W)$$

- Wie berechnen wir $P(W) = P(w_1 w_2 \ldots w_n)$?
- Grundlage ist die Frequenz von Wortfolgen in Korpora.
- Sparse-Data-Problem: Ganze Sätze kommen viel zu selten vor.
- Kettenregel erlaubt die Reduktion von $P(w_1 w_2 \ldots w_n)$ auf bedingte Wahrscheinlichkeiten:

  $P(w_1 w_2 \ldots w_n)$
  $= P(w_1) * P(w_2 \mid w_1) * P(w_3 \mid w_1 w_2) * \ldots * P(w_n \mid w_1 w_2 \ldots w_{n-1})$

  aber:
- $P(w_n \mid w_1 w_2 \ldots w_{n-1})$*:* Sparse-Data-Problem ist nicht beseitigt!

n-Gramme

- n-Gramm-Methode:
  - Wir approximieren die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wort w im Kontext einer beliebig langen Wortfolge auftritt, durch die relative Häufigkeit, mit der es in einem auf n Wörter begrenzten Kontext auftritt ("Markov-Annahme")
  - Dabei wird das Wort selbst mitgezählt. n-Gramm-Wahrscheinlichkeit berücksichtigt also einen Vorkontext von n-1 Wörtern.
- Meistens wird mit Bigrammen und Trigrammen gearbeitet.
- Beispiel Bigramm-Approximation:
  - $P(w_n|w_1w_2... w_{n-1}) \approx P(w_n|w_{n-1})$

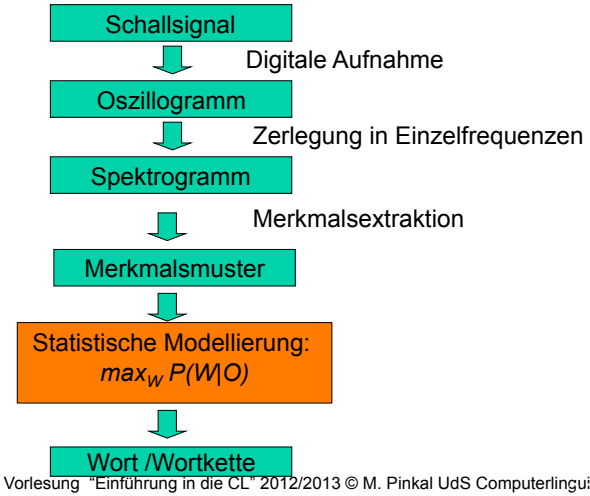
    $P(w_1w_2 ... w_n) \approx P(w_1)*P(w_2|w_1)*P(w_3|w_2)* ... P(w_n|w_{n-1})$

Akustische Modelle

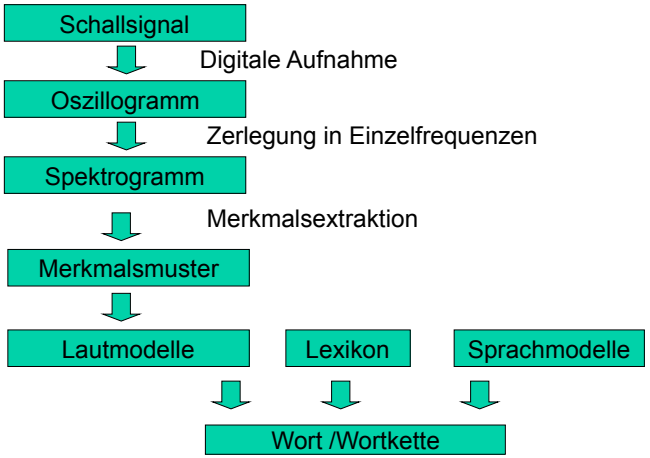
$$\max_W P(W \mid O) = \max_W P(O \mid W) \cdot P(W)$$

- Training von „Lautmodellen" auf Datensammlungen für gesprochene Sprache: Aufnahmen von Sprachlauten mit ihrer phonetischen Kategorie/ Umschrift: Liefert die Wahrscheinlichkeit, mit der bestimmte Laute durch Merkmalsmuster realisiert werden.
- Aussprachewörterbuch, das für jedes Wort die phonetische Umschrift enthält
  - Genauer: Die Umschrift für alternative Aussprachen, die in einem gewichteten endlichen Automaten kodiert sind.
- Für die statistische Zuordnung von Merkmalsmustern und Wörtern wird die HMM-Methode („Hidden Markov Models") verwendet.

Spracherkennung: (Vereinfachtes) Schema



Spracherkennung: Schema



Erkennerperformanz ist abhängig von:

- Sprechmodus: Einzelwort, kontinuierlich, spontan
- Sprecherbindung: abhängig, unabhängig, adaptiv
- Größe des Lexikons:

  Einfache Sprachsteuerungssysteme: 100-200 Wortformen

  Dialogsysteme: 500-1000 Wortformen (+ spezieller Wortschatz)

  Diktiersysteme: ab 50000 Wortformen
- Perplexität: Maß für die Uniformität der Eingabe

  beschränkte Domäne, gesteuerter Dialog: niedrige Perplexität

  keine Domänenbeschränkung, freie Rede: hohe Perplexität
- Eingabequalität
- Verarbeitungszeit

Stand der Spracherkennungstechnik

- Maß für die Erkennerperformanz: Wortfehlerrate (wieviele Wörter der „besten Kette" wurden falsch verstanden/gar nicht verstanden/hinzuphantasiert?)

- Wortfehlerrate hängt von der verfügbaren Verarbeitungszeit und verschiedenen externen Faktoren ab.
- Gängige Systeme analysieren in Echtzeit (Verarbeitungszeit ≤ Sprechzeit) und sind in der Wortfehlerrate in einem akzeptablen Bereich .