

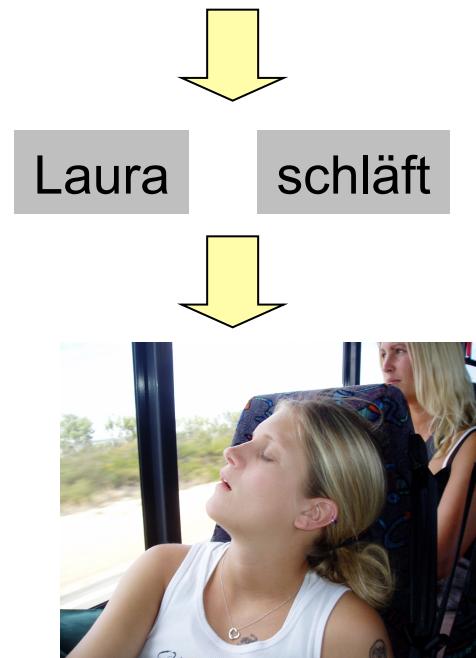
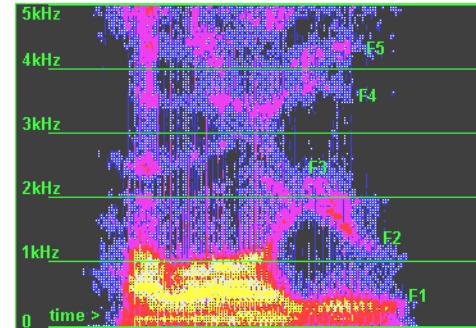
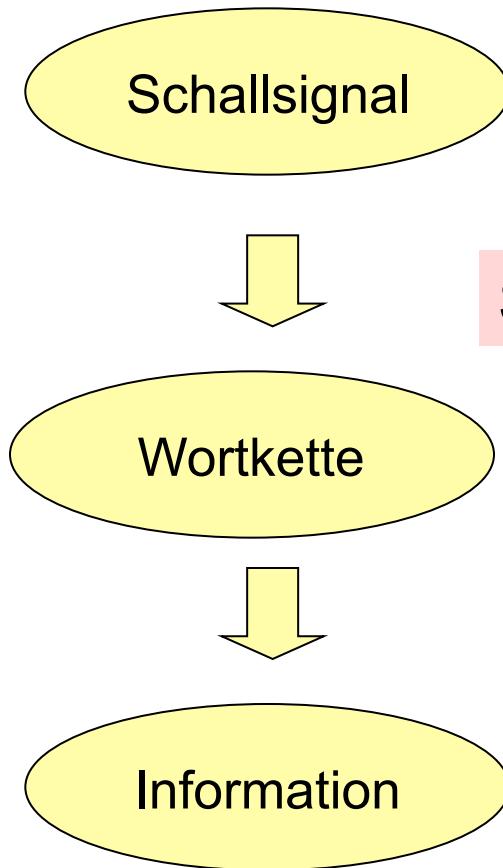
Einführung in die Computerlinguistik

Verarbeitung gesprochener Sprache

WS 2014/2015

Vera Demberg

Sprachverarbeitung



Spracherkennung

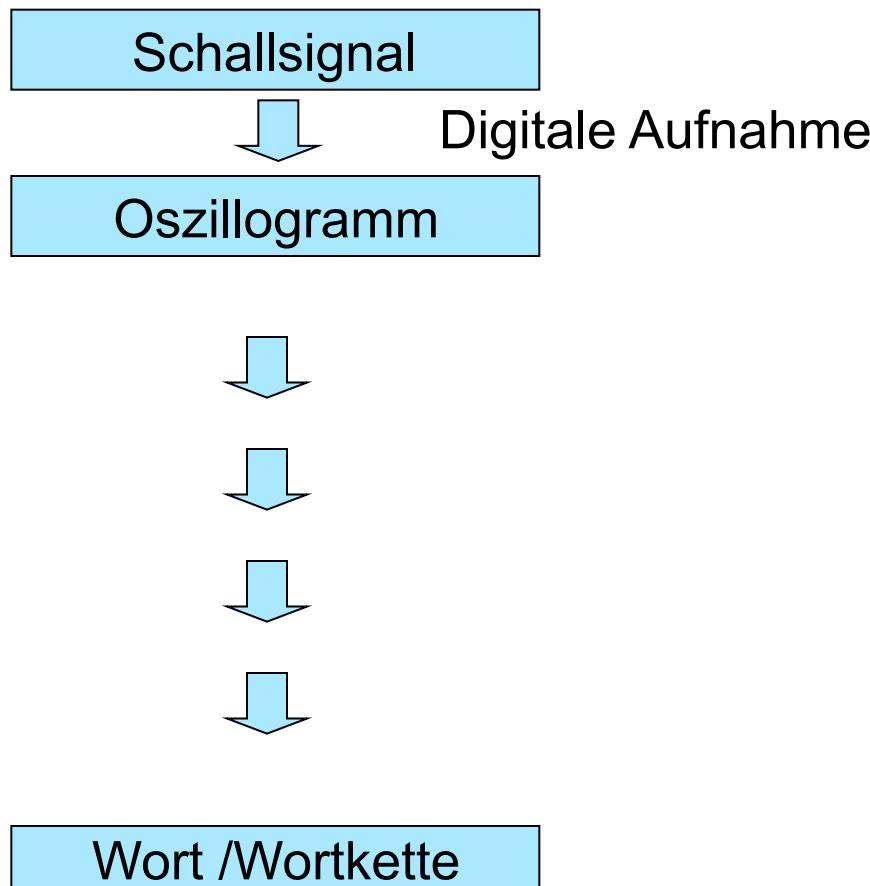
Schallsignal



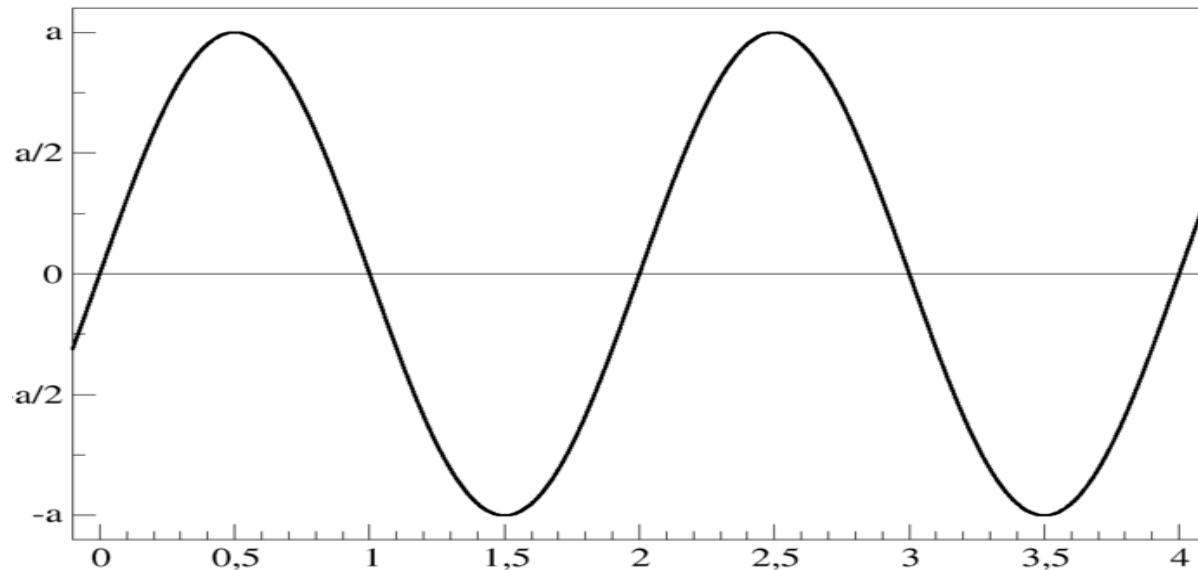
- Die Grundaufgabe der Spracherkennung:
- Gegeben ein kontinuierliches Schallsignal.
- Welche Wortkette wurde vom Sprecher geäußert?

Wortkette

Spracherkennung

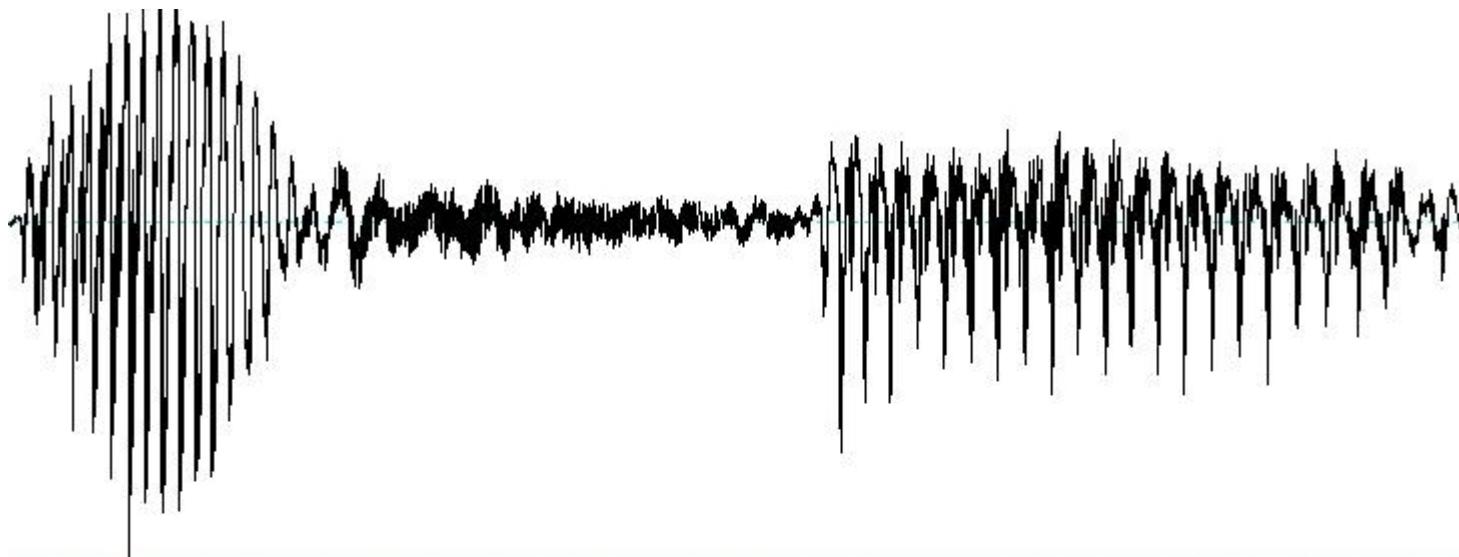


Reine Schwingung



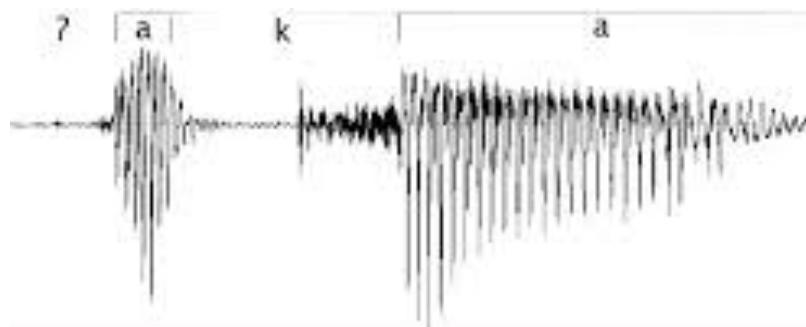
Ein Oszillogramm

- Das Oszillogramm für „afa“



Oszillogramme

aka



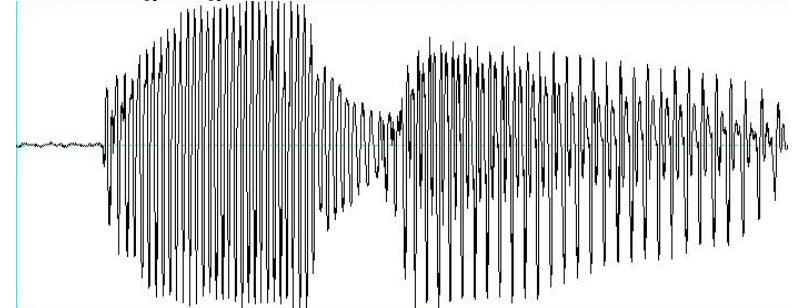
ama



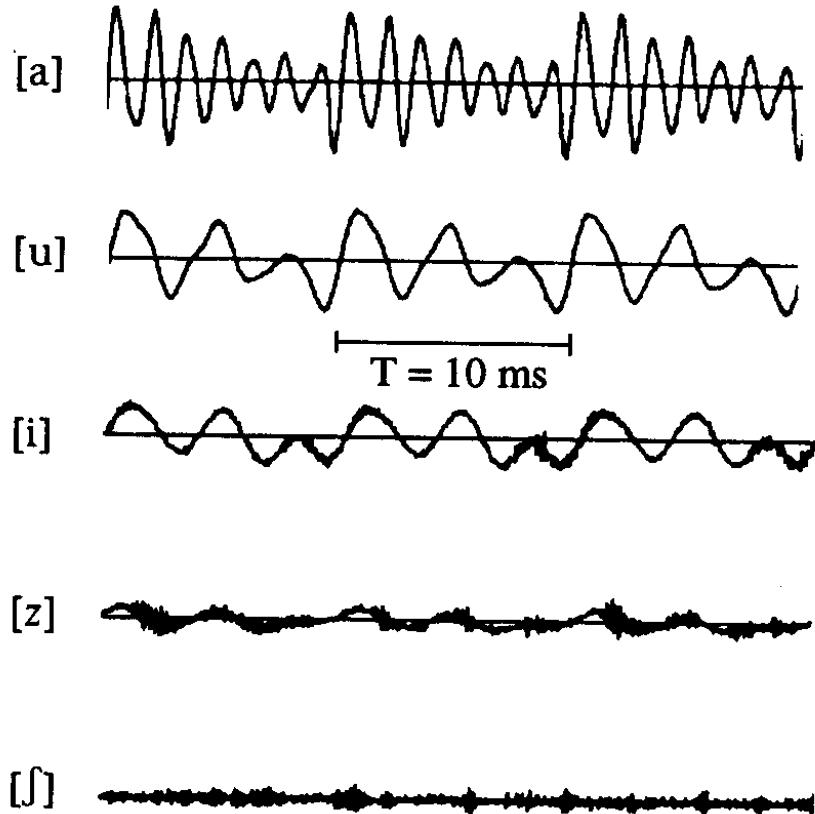
acha



ydy

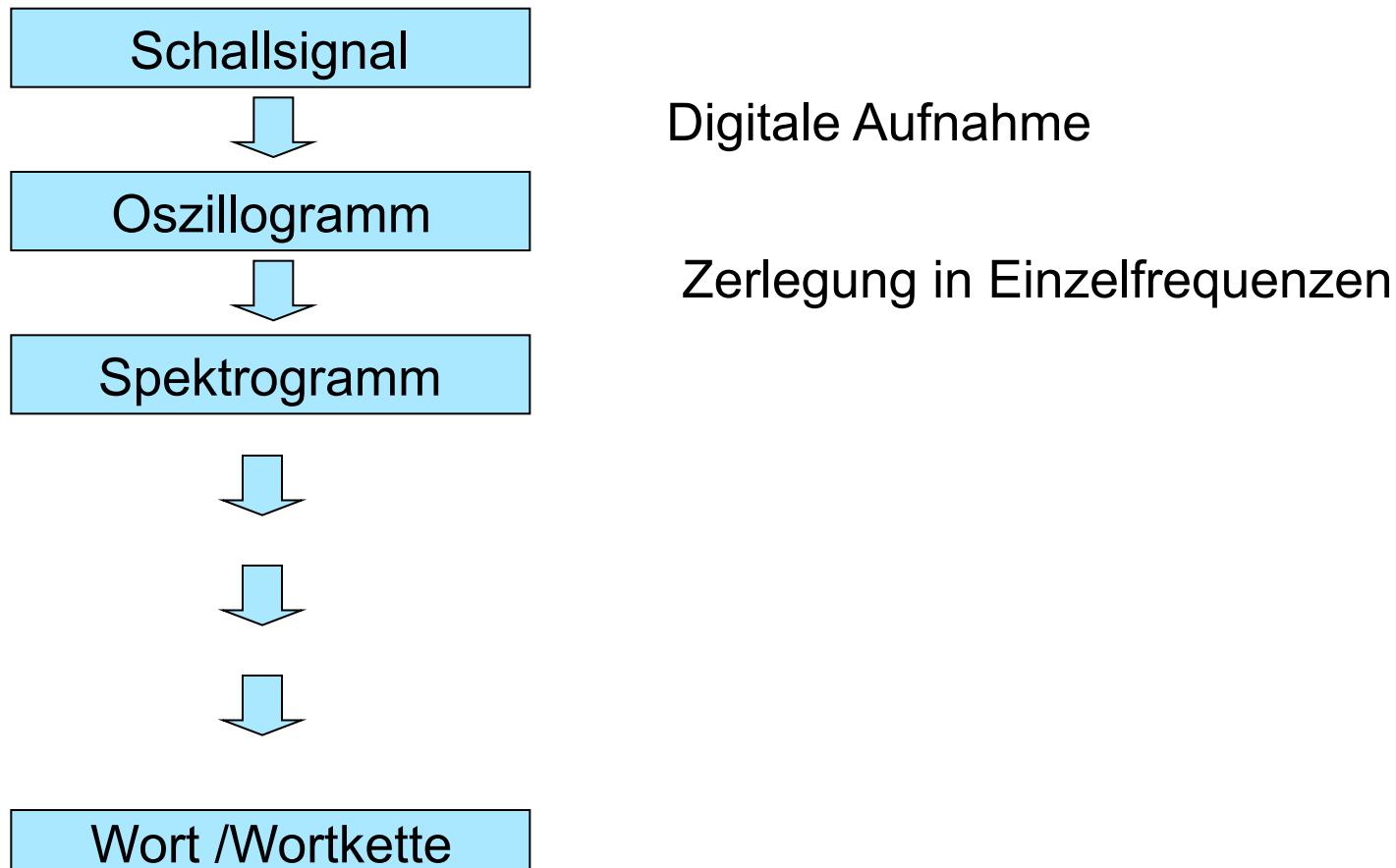


Einzelne Laute als Oszillogramme

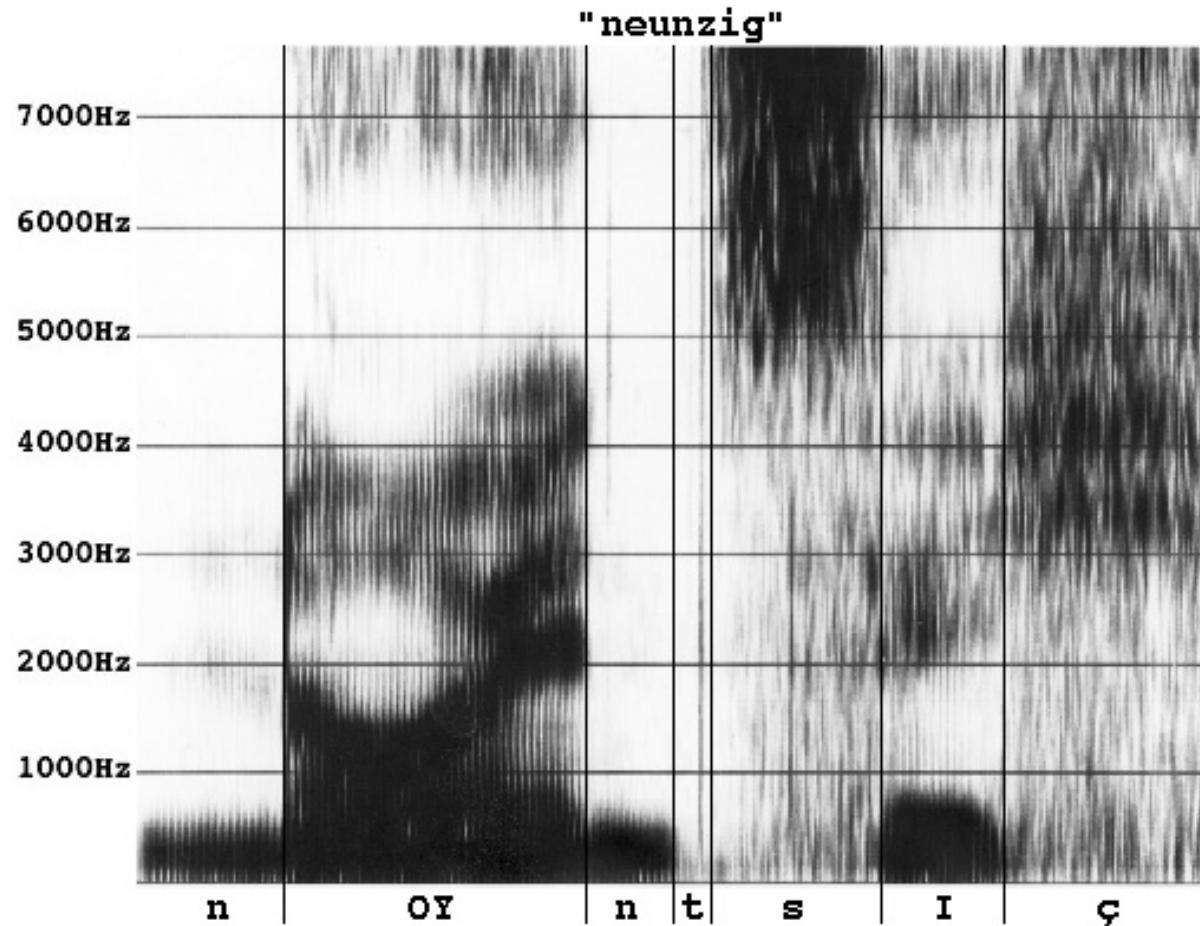


- Laute werden charakterisiert durch Kombination von Schwingungen verschiedener Frequenzen
- Im Oszillogramm **schwer erkennbar** (Überlagerung)
- Deshalb: Überführung in Zeit-Frequenz-Diagramm (**Spektrogramm**) mittels Komponentenanalyse (Fourier-Transformation)

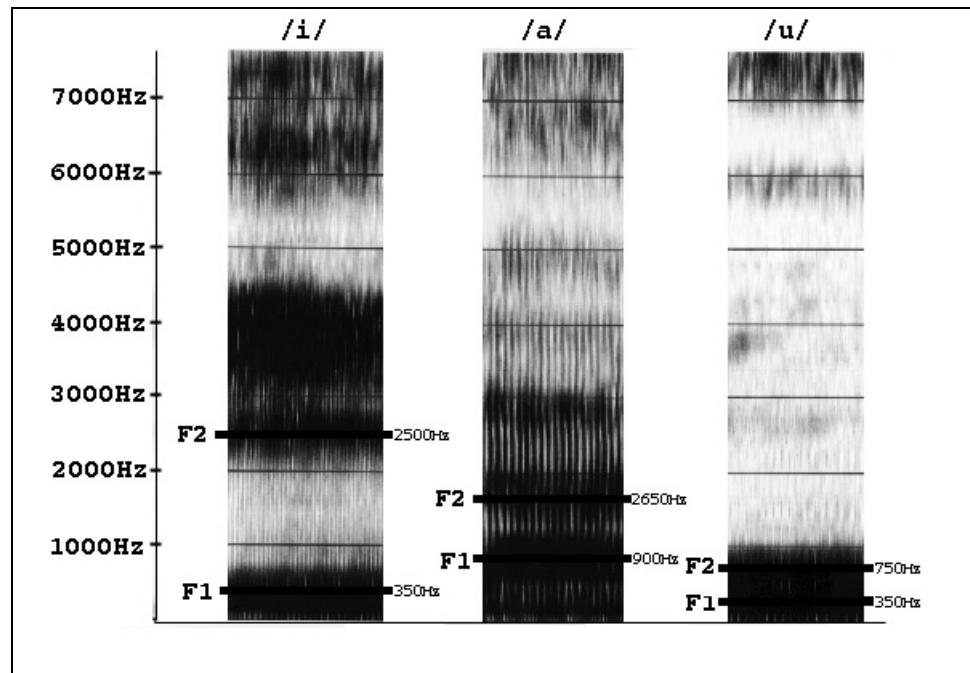
Spracherkennung: (Vereinfachtes) Schema



Spektrogramm für eine Aufnahme von „neunzig“

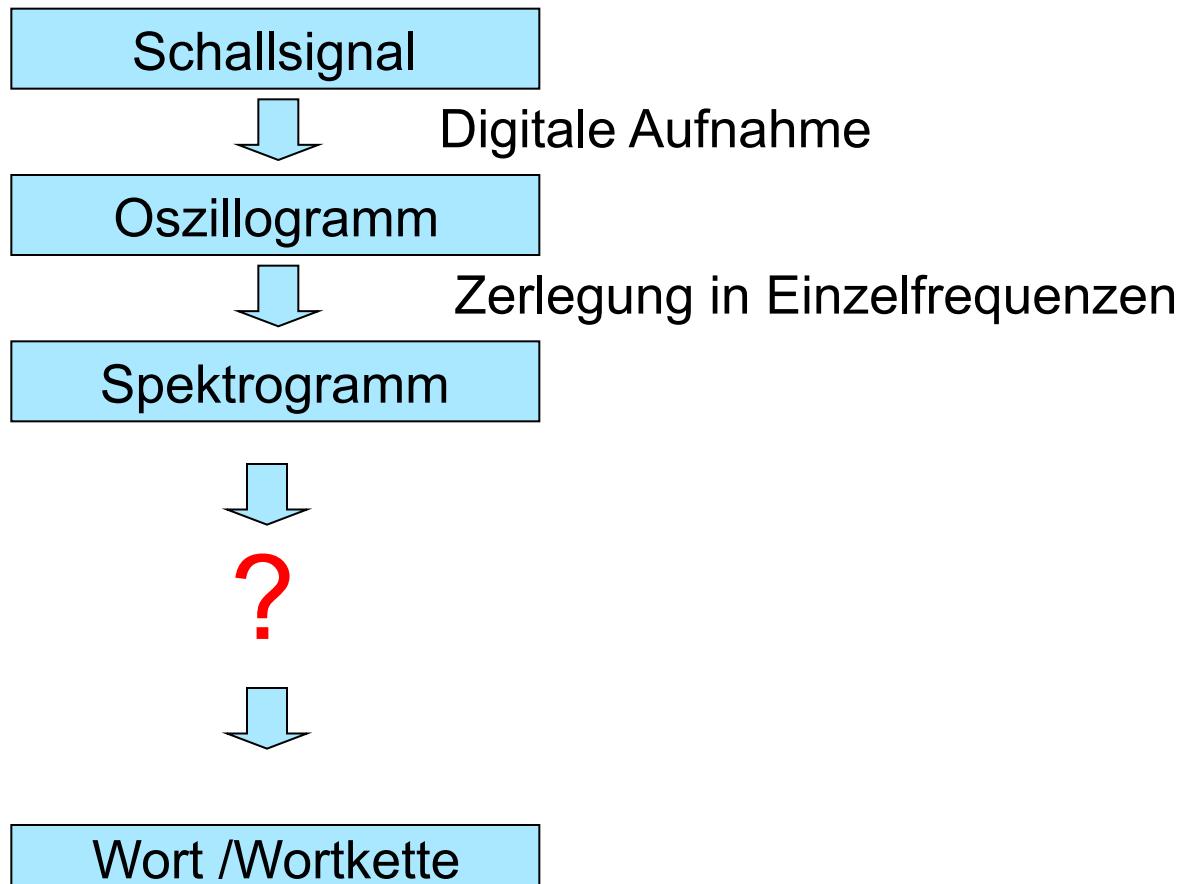


Spektrogramm für die Vokale i,a,u



- 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



Spracherkennung: Erster Versuch

- 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**.

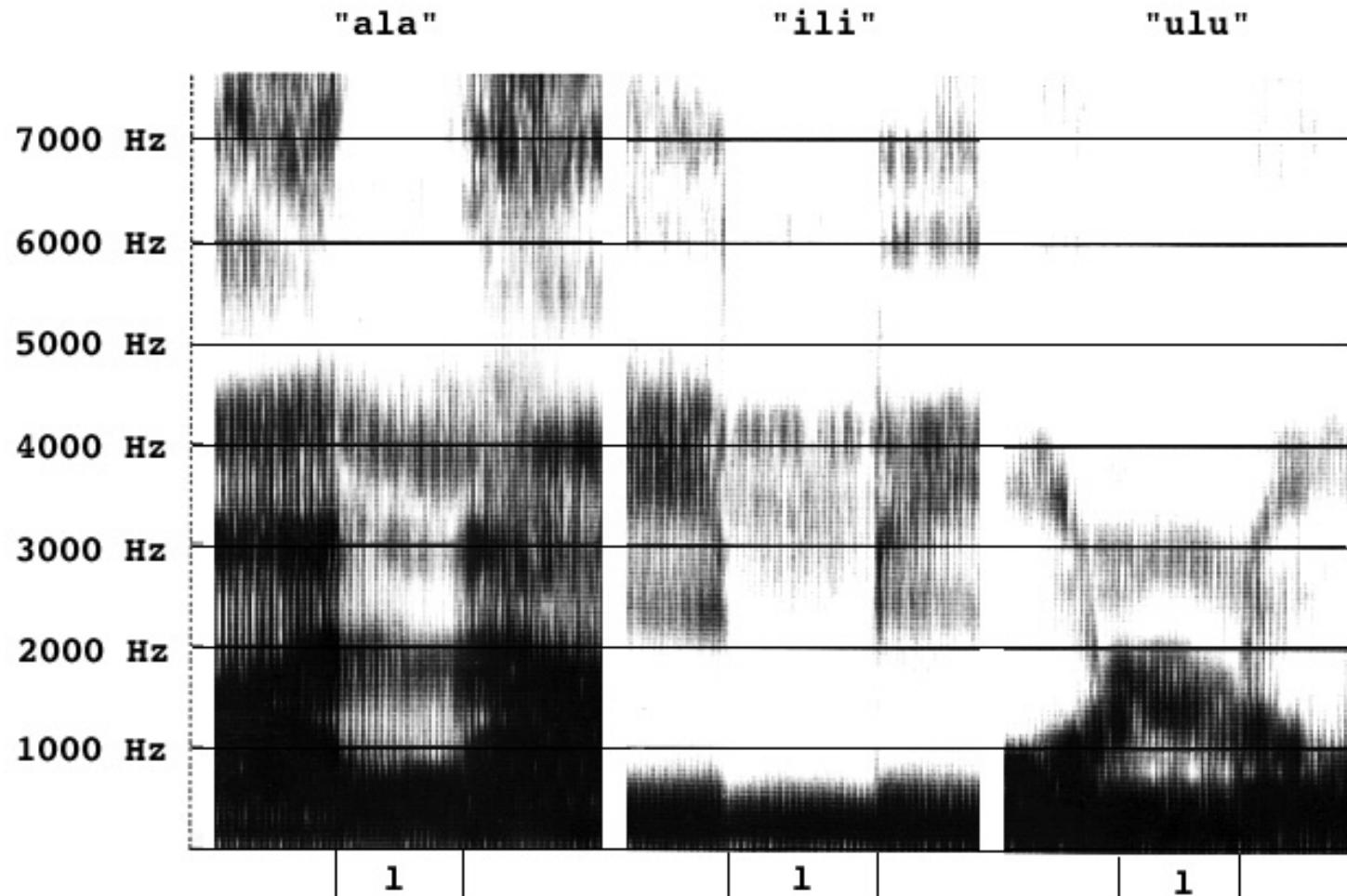
Problem 1: Varianz des Signals

- 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: Zweiter Versuch

- 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 **Kontinuität des Signals**.

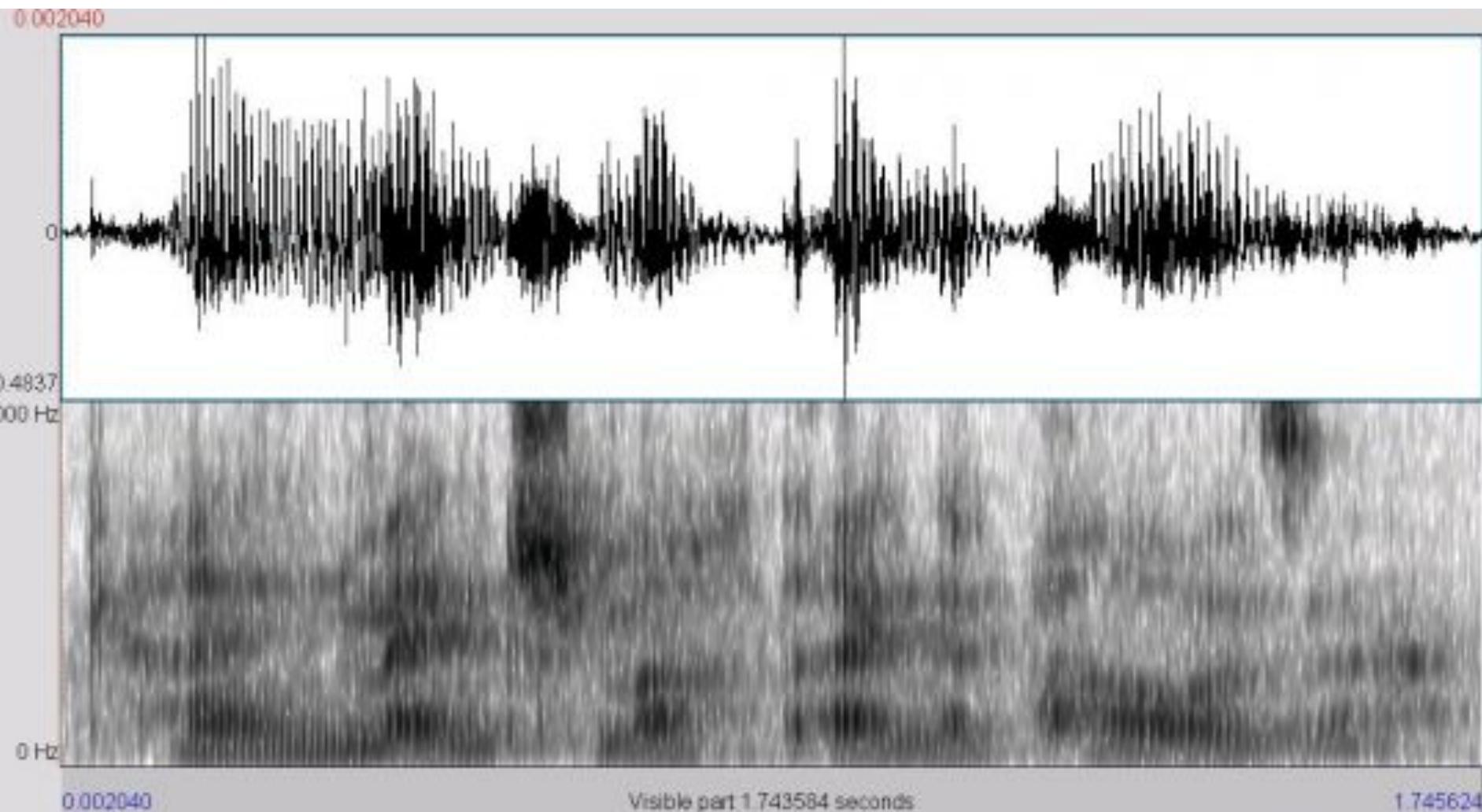
Kontextabhängigkeit



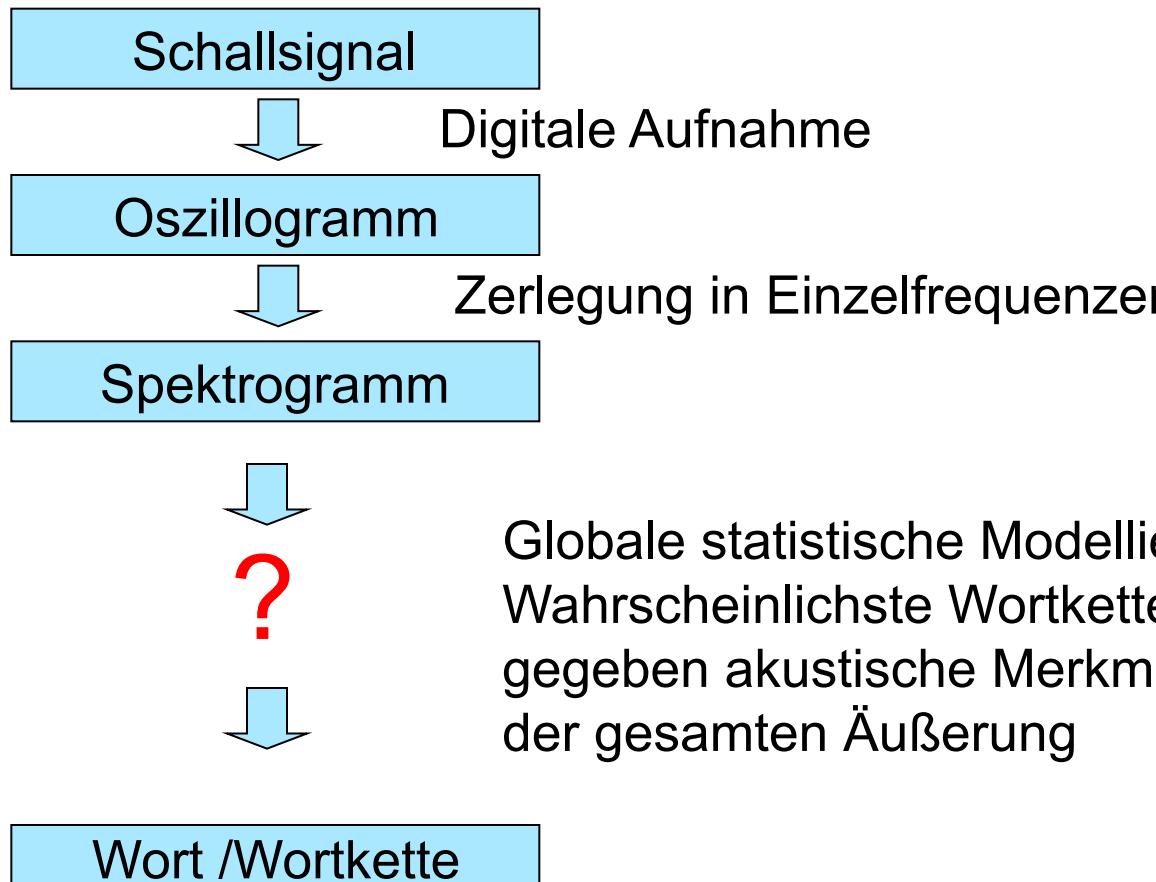
Problem 2: Kontinuität des Signals

- 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

„Kein Mensch macht eine Pause.“



Spracherkennung: (Vereinfachtes) Schema



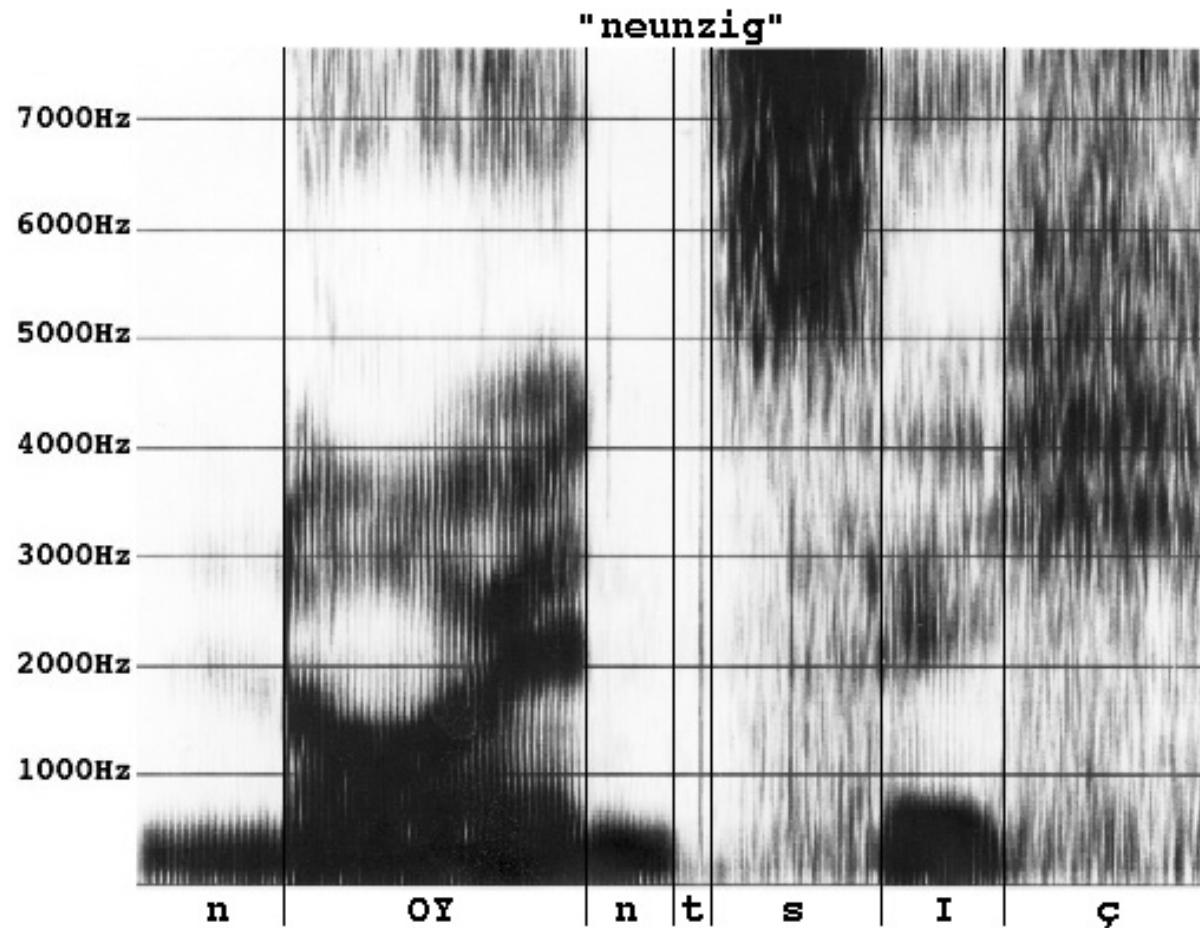
Statistische Modellierung: Allgemeines Schema

- Manuelle Korpusannotation
- Merkmalsspezifikation
- Automatische Merkmalsextraktion
- Training eines statistischen Modells
- Evaluierung

Merkmalsspezifikation

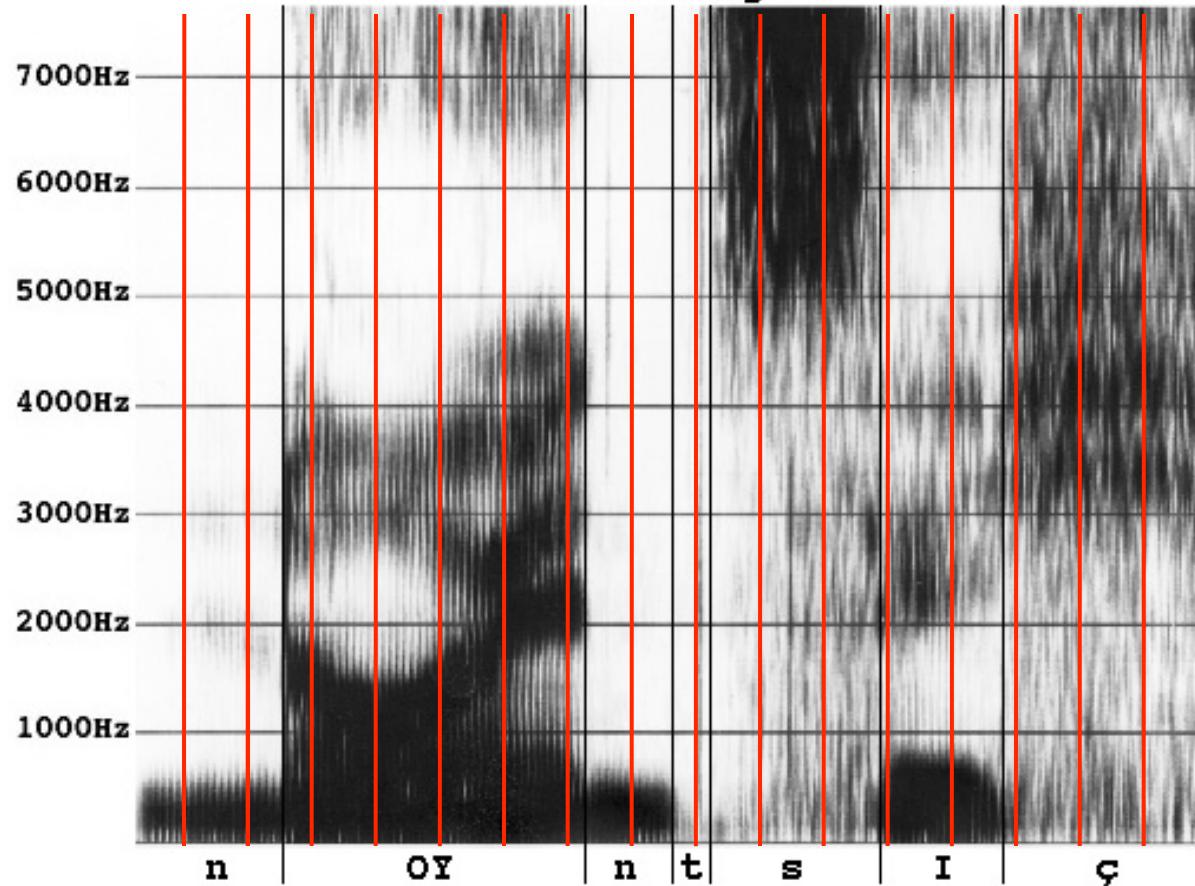
- Was sind die Einheiten, von denen wir ausgehen?
 - Zerlegung des Signals in „Beobachtungen“:
Zeitfenster von z.B. 30 ms

Spektrogramm für ein deutsches Wort



Merkmalsspezifikation: Zeitfenster

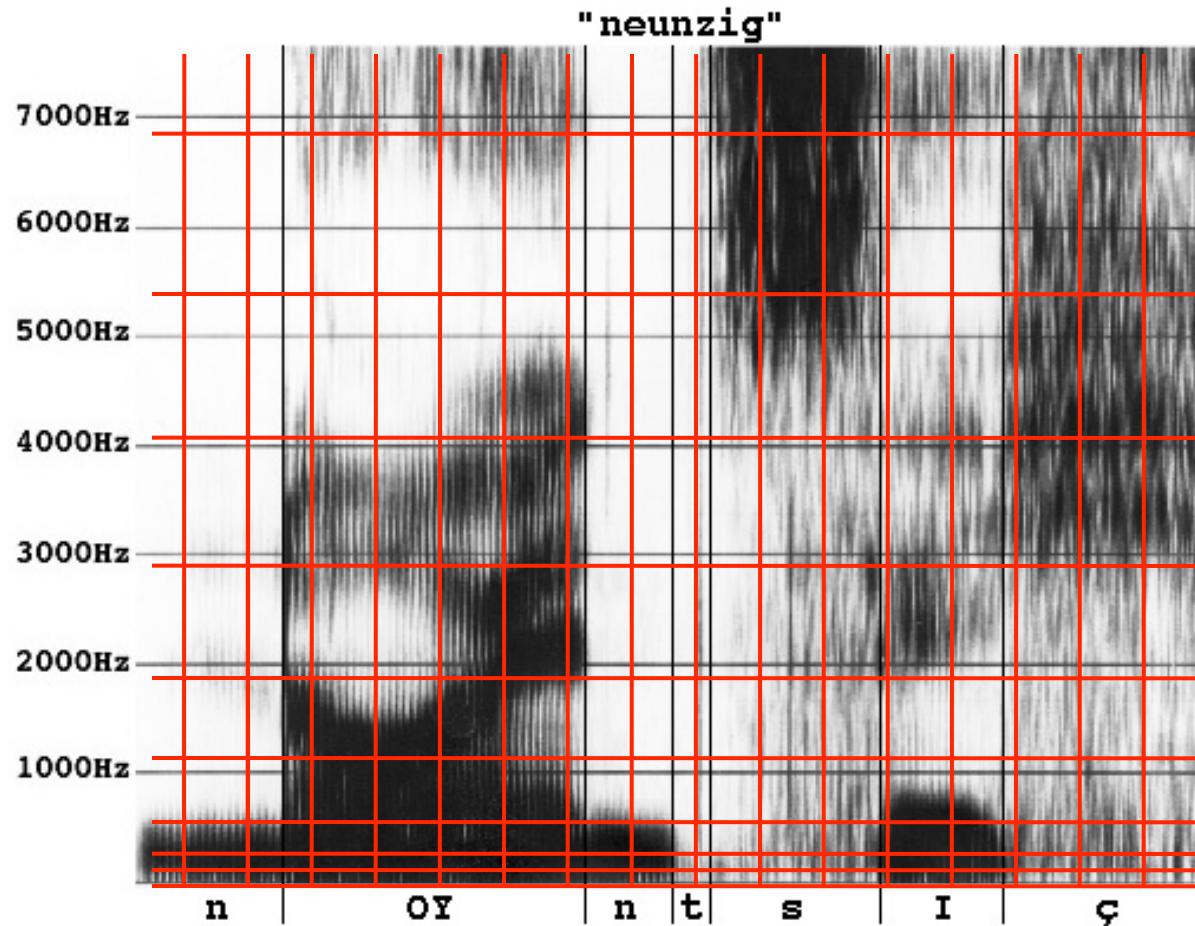
"neunzig"



Merkmalsspezifikation/-extraktion

- Zerlegung des Signals in „Beobachtungen“:
Zeitfenster von z.B. 30 ms
- Zerlegung jeder Beobachtung in Frequenzintervalle
(z.B. Vierteltonsschritte im Standard-12-Ton-System)

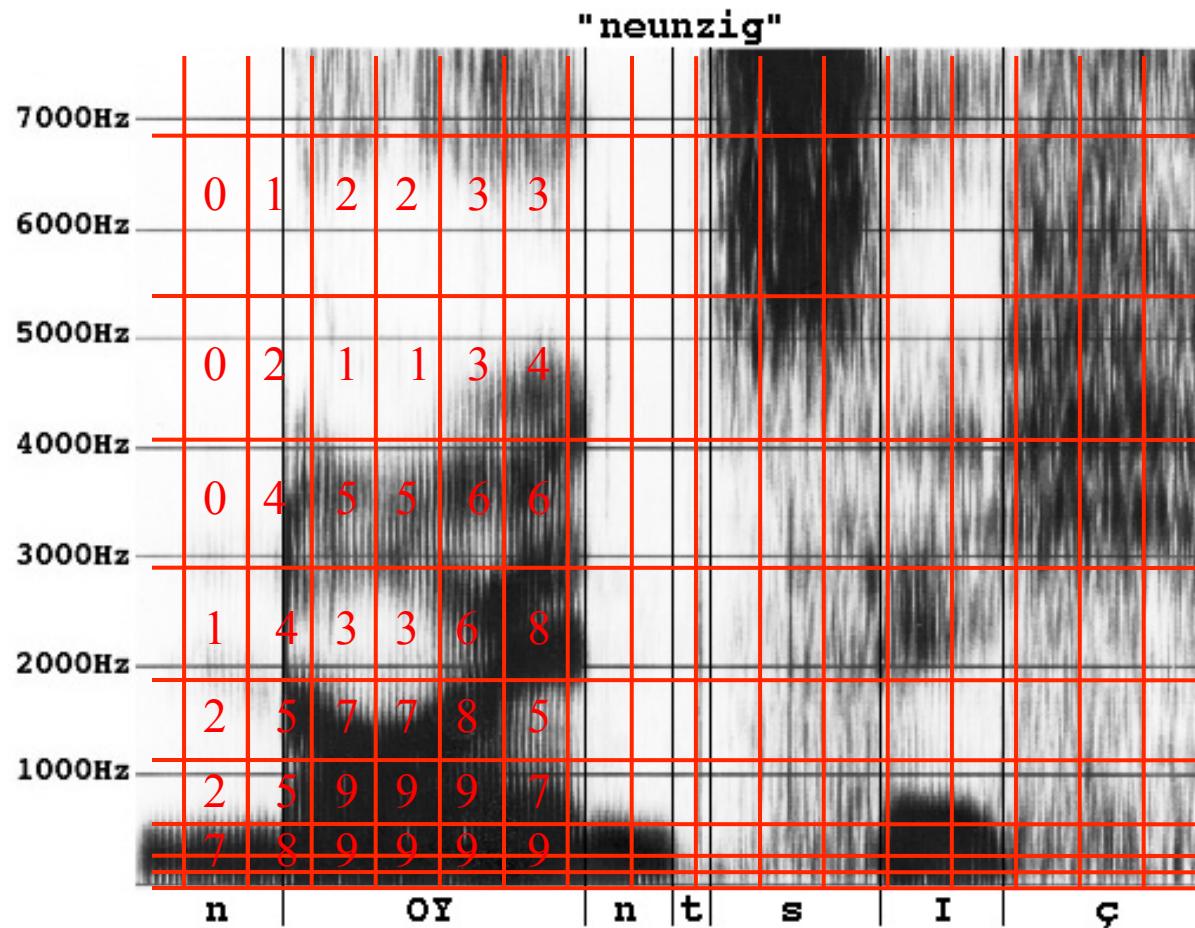
Spektrogramm für ein deutsches Wort



Merkmalspezifikation/-extraktion

- Zerlegung des Signals in „Beobachtungen“:
Zeitfenster von z.B. 30 ms
- Zerlegung jeder Beobachtung in Frequenzintervalle
(z.B. Vierteltonschritte im Standard-12-Ton-System)
- Bestimmung des Schalldrucks (Schallenergie) in
jedem Zeit-Frequenz-Fenster
- Resultat: Eine Folge von Einzelbeobachtungen, die
durch Merkmalsvektoren charakterisiert sind

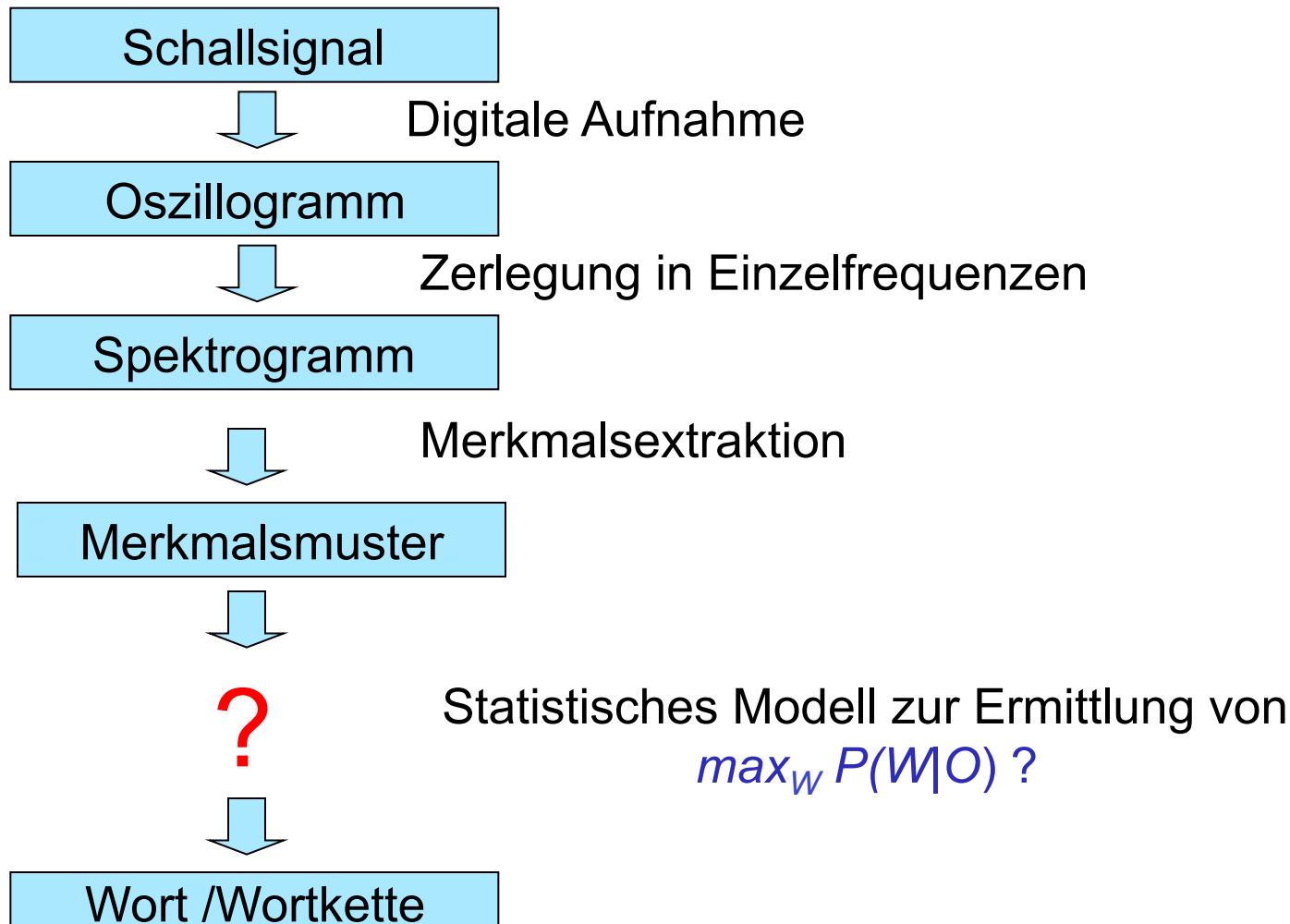
Spektrogramm für ein deutsches Wort



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	...

Spracherkennung: (Vereinfachtes) Schema



Statistische Modellierung

- Aufgabe: Ermittle für ein Eingabesignal, dass durch eine Folge von Beobachtungen/ Vektoren $O = o_1 o_2 \dots o_m$ charakterisiert ist:

$$\max_w P(W|O) = P(w_1 w_2 \dots w_n | o_1 o_2 \dots o_m)$$

- Wir suchen die wahrscheinlichste Wortfolge gegeben die Beobachtungen O. \rightarrow sparse-data Problem!
- Erster Schritt: Verwendung des Bayes-Theorems.

Das Bayessche Theorem

- Das Bayessche Theorem oder die Bayes-Regel:

$$P(E | F) = \frac{P(F | E) \cdot P(E)}{P(F)}$$

- Die Bayes-Regel ist ein elementares Gesetz der Wahrscheinlichkeitstheorie. Sie ist überall da nützlich, wo der Schluss von einer Größe F auf eine andere Größe E bestimmt werden soll (typischerweise von einem Symptom auf eine relevante Eigenschaft/ die Ursache), die Abhängigkeit in der anderen Richtung (von der Ursache auf das Symptom) aber besser zugänglich ist.

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

- **Symptom:** Folge von akustischen Beobachtungen $O = o_1 o_2 \dots o_m$
- **Ursache:**
vom Sprecher geäußerte, intendierte Wortkette $W = w_1 w_2 \dots w_n$
- Mit Bayes-Regel :
$$P(W|O) = \frac{P(O|W) \cdot P(W)}{P(O)}$$

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

- **Symptom:** Folge von akustischen Beobachtungen $O = o_1 o_2 \dots o_m$
- **Ursache:**
vom Sprecher geäußerte, intendierte Wortkette $W = w_1 w_2 \dots w_n$
- Mit Bayes-Regel :
$$P(W|O) = \frac{P(O|W) \cdot P(W)}{P(O)}$$
- Die wahrscheinlichste Wortkette:
$$\begin{aligned} \max_W P(W|O) &= \max_W \frac{P(O|W) \cdot P(W)}{P(O)} \\ &= \max_W P(O|W) \cdot P(W) \end{aligned}$$
- $P(W)$ ist die globale, "a priori"-Wahrscheinlichkeit der Wortkette W .
- $P(O)$, die Wahrscheinlichkeit des Merkmalsmusters, wird nicht mehr benötigt.

Akustisches Modell und Sprachmodell

$$\max_w P(W | O) = \max_w P(O | W) \cdot P(W)$$

- $P(O|W)$ 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

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

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

$$\begin{aligned} P(w_1 w_2 \dots w_n) \\ = P(w_1) * P(w_2 | w_1) * P(w_3 | w_1 w_2) * \dots * P(w_n | w_1 w_2 \dots w_{n-1}) \end{aligned}$$

aber:

- $P(w_n | w_1 w_2 \dots w_{n-1})$: Sparse-Data-Problem ist nicht beseitigt!

n-Gramme

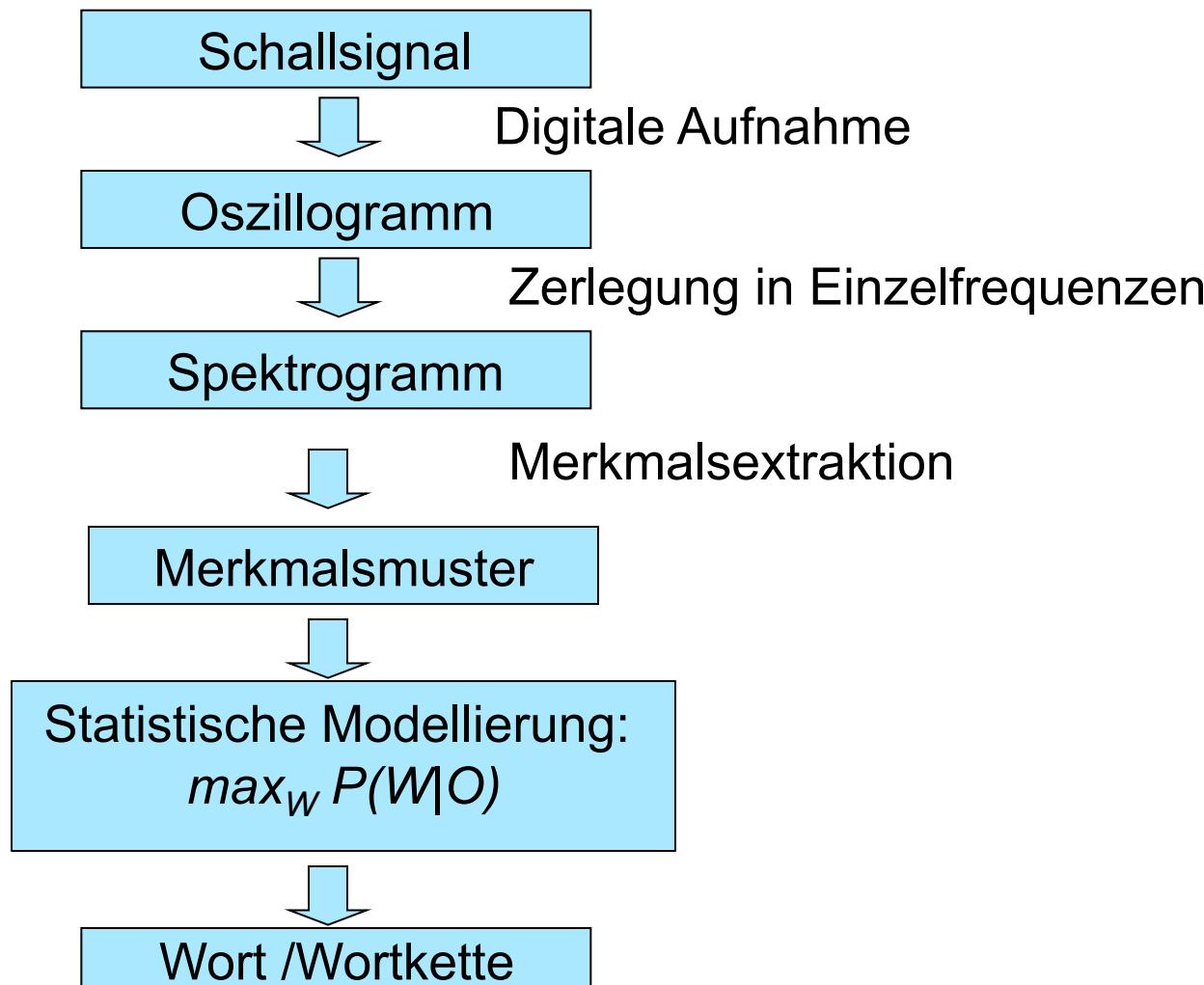
- n-Gramm-Methode:
 - Wir approximieren die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wort w im Kontext einer beliebig langen Wortfolge auftritt, durch die relative Häufigkeit, mit der es in einem auf n Wörter begrenzten Kontext auftritt ("Markov-Annahme")
 - Dabei wird das Wort selbst mitgezählt. n-Gramm-Wahrscheinlichkeit berücksichtigt also einen Vorkontext von $n-1$ Wörtern.
- Meistens wird mit Bigrammen und Trigrammen gearbeitet.
- Beispiel Bigramm-Approximation:
 - $P(w_n|w_1w_2\dots w_{n-1}) \approx P(w_n|w_{n-1})$
 - $P(w_1w_2 \dots w_n) \approx P(w_1)*P(w_2|w_1)*P(w_3|w_2)* \dots *P(w_n|w_{n-1})$

Akustische Modelle

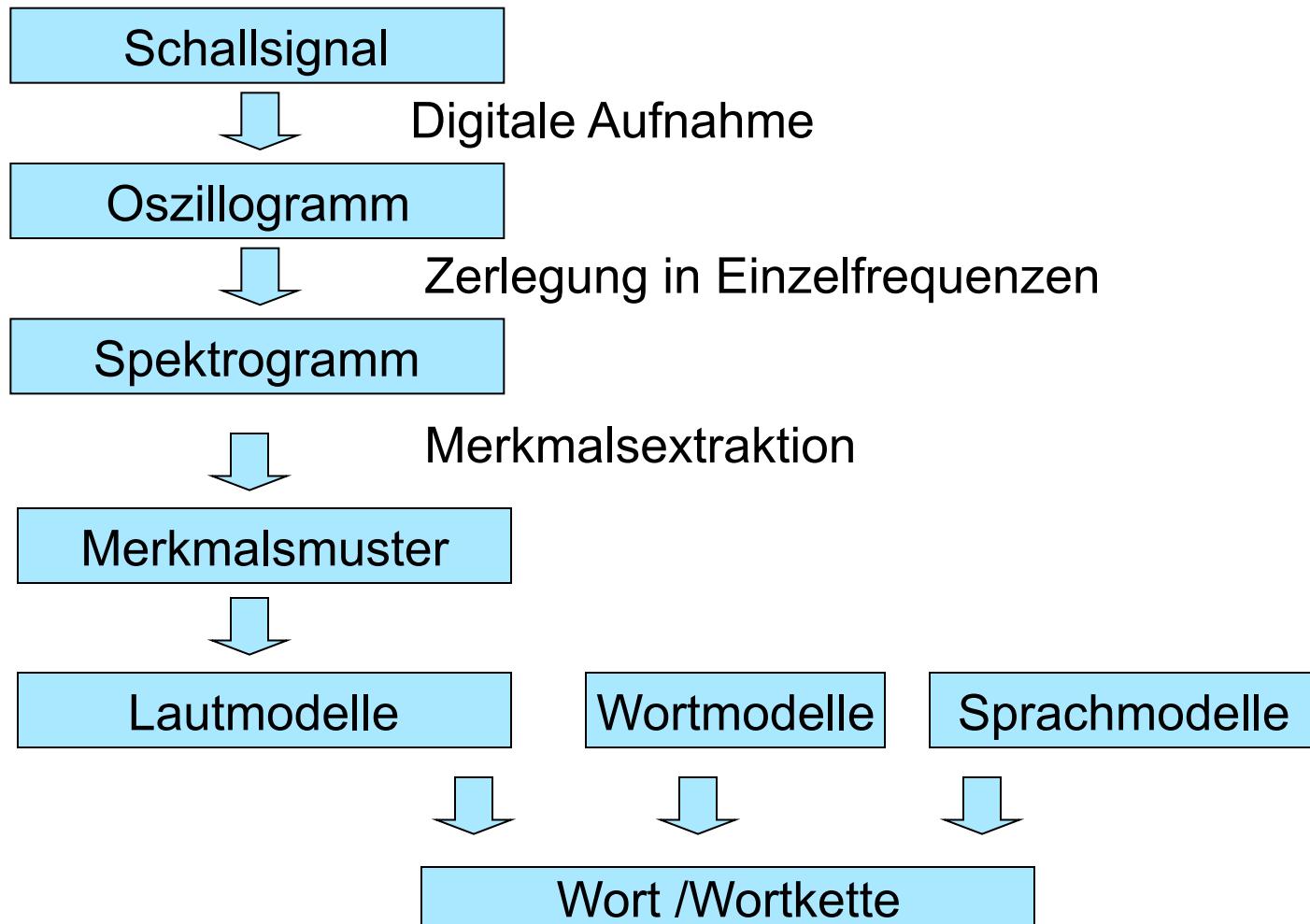
$$\max_w P(W | O) = \max_w P(O | W) \cdot P(W)$$

- 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.

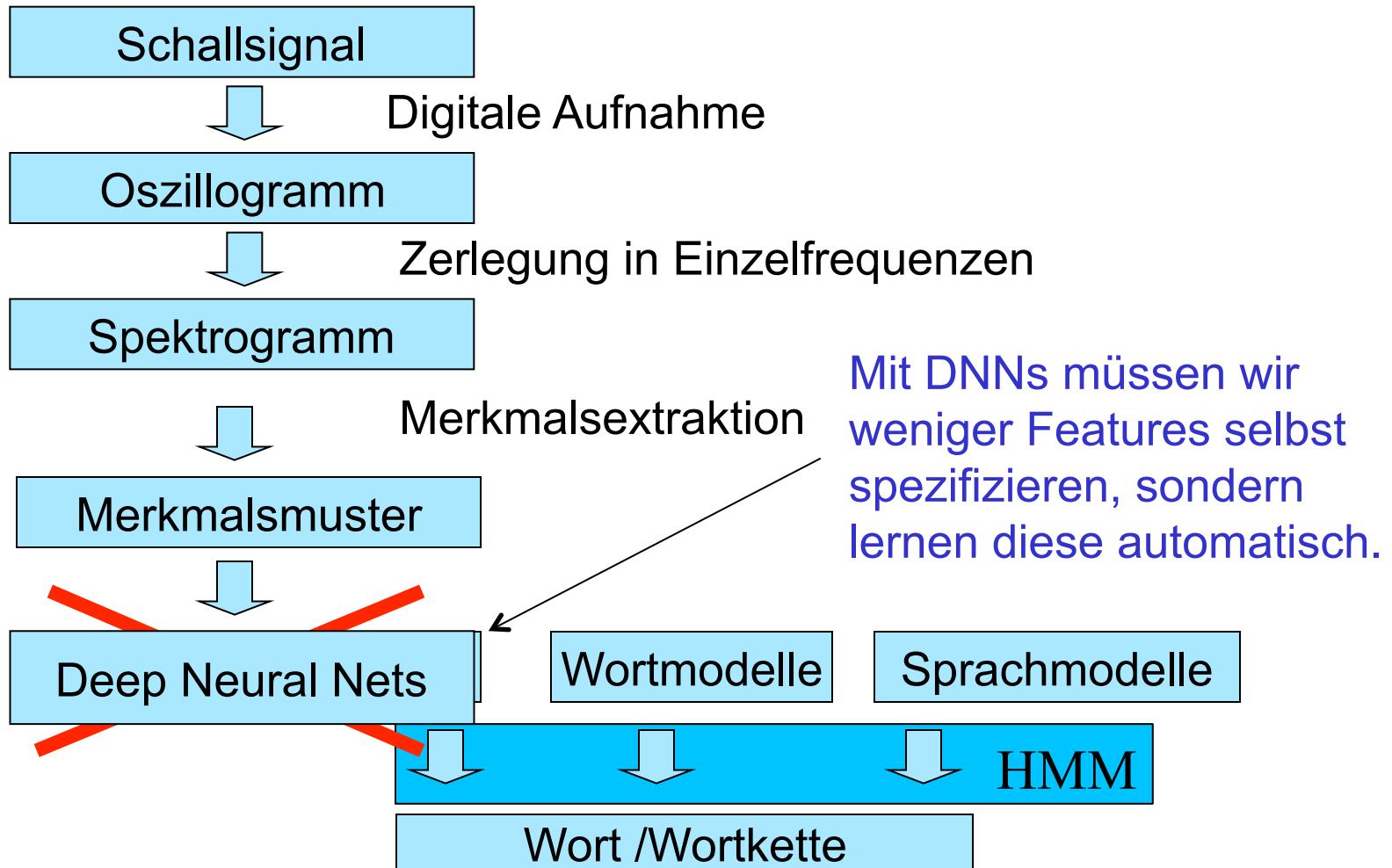
Spracherkennung: (Vereinfachtes) Schema



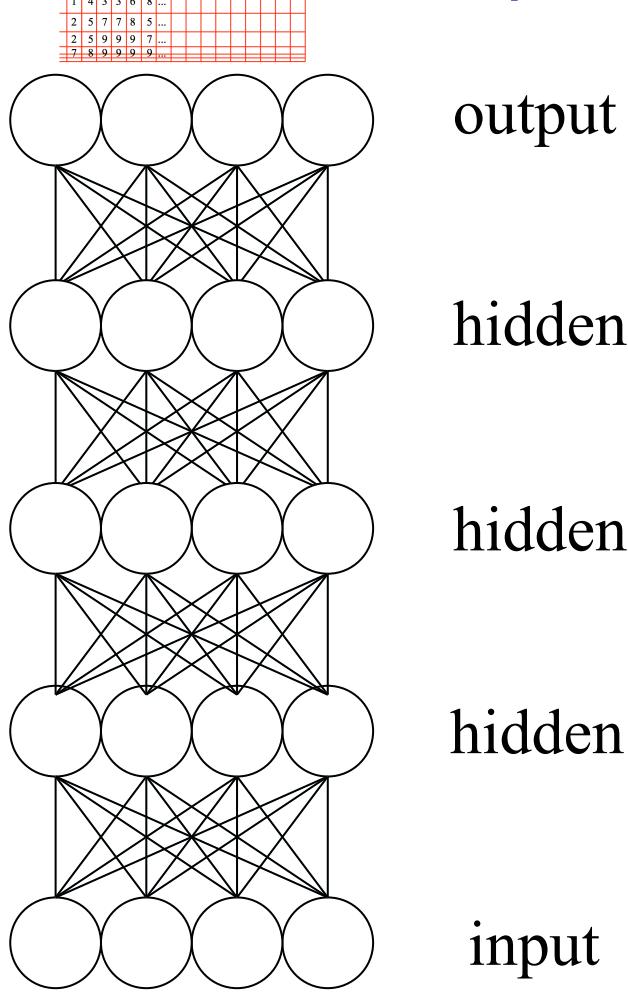
Spracherkennung: Schema



Spracherkennung: Schema

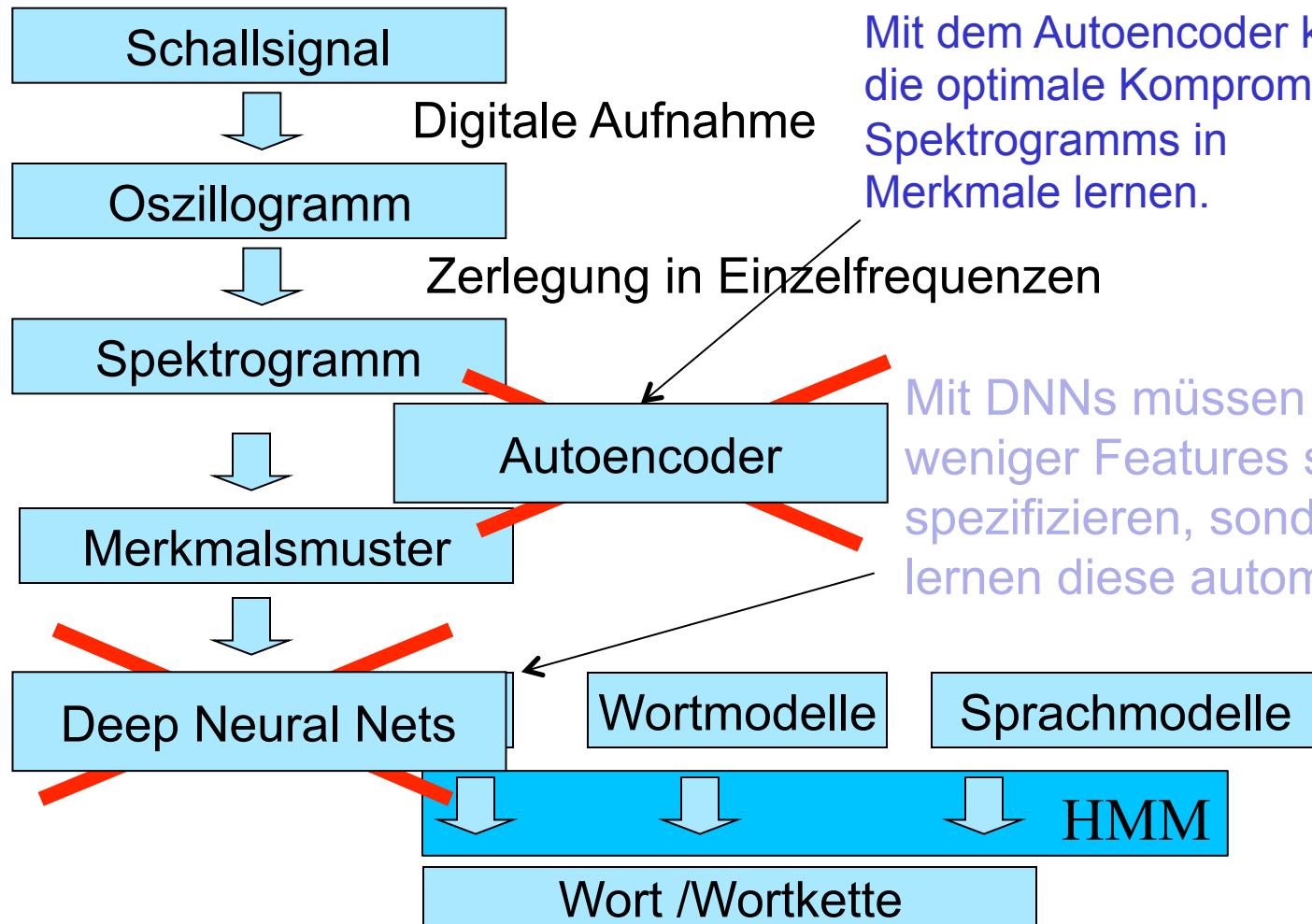


Deep Neural Nets for Speech Recognition

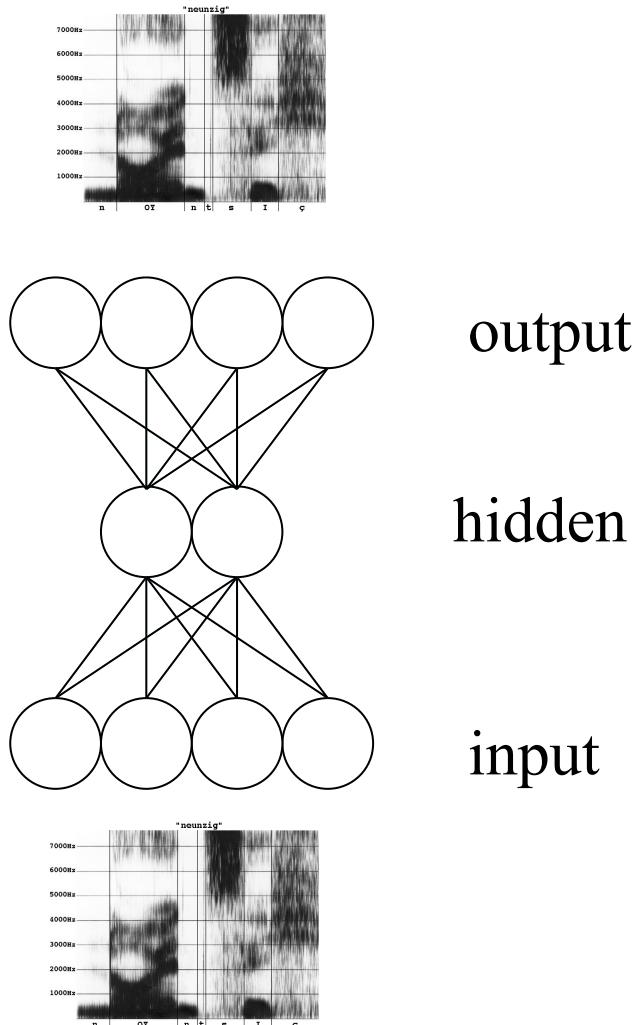


- Die Abbildung von Phonemketten auf Spektrogrammmerkmale ist sehr komplex.
- Mit DNNs kann dies mit größerem Erfolg als bei vorigen Ansätzen gelernt werden.
- Vorteil: bessere Ausnutzung von Kontextinformation.

Spracherkennung: Schema



Autoencoder für Merkmalsmusterextraktion



- Der Autoencoder soll als Output den Input möglichst akkurat reproduzieren.
- Durch die kleineren hidden Layers (hier nur schematisch als ein hidden Layer dargestellt, können aber mehr sein) wird die relevante Information mit nur minimalem Informationsverlust komprimiert.
- Vorteil: geringerer Informationsverlust als bei traditioneller Merkmalsextraktion mit Zeit-Frequenz-fenster.

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** (wie viele 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 \leq Sprechzeit) und sind in der Wortfehlerrate in einem akzeptablen Bereich.