Syntax natürlicher Sprachen

13: Komplexität formaler und natürlicher Sprachen

A. Wisiorek

Centrum für Informations- und Sprachverarbeitung,
Ludwig-Maximilians-Universität München

04.02.2025

Themen der heutigen Vorlesung

1. Chomsky-Hierarchie
2. *Center-embedding*-Konstruktionen (nicht-regulär)
3. *Cross-serial dependencies* (Hinweis auf Nicht-Kontextfreiheit)
4. *Garden-path*-Sätze (Hinweis auf probabilistische Sprachverarbeitung)

1. Chomsky-Hierarchie

1. Chomsky-Hierarchie
2. *Center-embedding*-Konstruktionen (nicht-regulär)
3. *Cross-serial dependencies* (Hinweis auf Nicht-Kontextfreiheit)
4. *Garden-path*-Sätze (Hinweis auf probabilistische Sprachverarbeitung)

Chomsky-Hierarchie

- Klassifizierung formaler Grammatiken bzgl. **Regeleinschränkung**
  $\rightarrow$ *je **stärker** eine Grammatik **eingeschränkt** desto **geringer** ihre **Erzeugungsmächtigkeit***
  $\rightarrow$ *desto **geringer** die **Komplexität der erzeugten Sprache***
- 4 Typen von **Typ 0 (rekursiv aufzählbar = ohne Einschränkung)** bis **Typ 3 (regulär = am stärksten eingeschränkt)**
- klassische Phrasenstrukturgrammatiken: **kontext-frei (Typ 2)**
- einige Syntaxformalismen sind **kontextsensitiv (Typ 1)** (TAG, CCG) bzw. **rekursiv aufzählbar (Typ 0)** (HPSG, LFG)

Die 4 Typen der Chomsky-Hierarchie

- **rekursiv aufzählbar (Typ 0):** $\alpha \rightarrow \beta$
  $\rightarrow$ ***ohne Einschränkung*** *bzgl.* α, β; $\alpha, \beta \in \mathit{Alphabet} = \{T, NT\}$
- **kontext-sensitiv (Typ 1):** $\alpha \rightarrow \beta$, $\mathit{length}(\alpha) \leq \mathit{length}(\beta)$
  $\rightarrow$ *bzw. auch:* $lXr \rightarrow l\beta r$ ($X \in NT$; $l, r, \beta \in \{T, NT\}$)
- **kontext-frei (Typ 2):** $X \rightarrow \beta$ ($X \in NT$; $\beta \in \{T, NT\}$)
  $\rightarrow$ ***LHS: nur 1 Nicht-Terminal***
- **regulär (Typ 3):** $X \rightarrow a$, $X \rightarrow aY$ ($X, Y \in NT$, $a \in T$)
  $\rightarrow$ ***LHS: nur 1 Nicht-Terminal***
  $\rightarrow$ ***RHS: 0-n Terminale und 0-1 Nicht-Terminale*** *(links oder rechts)*

Komplexität natürlicher Sprachen

- **Chomsky**: Kann natürliche Sprache mit regulärer Grammatik (endlichen Automaten) modelliert werden?
- es gibt **nicht-reguläre Phänomene** in natürlicher Sprache
  $\rightarrow$ *z. B.* ***center-embedding-Rekursion***
  $\rightarrow$ *benötigt* ***kontextfreie Regel***
- allerdings: die Konstruktionen, die eine natürliche Sprache **nicht-regulär** machen, sind **für den Menschen schwer zu parsen**

- mathematisch-formal: **Großteil der Syntax menschlicher Sprache** mit **regulärer Grammatik** modellierbar
- aber: **kontextfreie Grammatiken** geben **beschreibungsadäquatere Struktur**
  $\rightarrow$ ***linguistisch adäquates Modell***
  $\rightarrow$ ***wichtig für weitere Verarbeitung*** *(semantische Analyse)*
- **einige Sprachen** enthalten **Konstruktionen**, die sie **kontext-sensitiv** machen: ***cross-serial dependencies*** im Schweizerdeutschen
- **Hinweise**, dass auch **menschliches Parsing Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt:** *garden-path*-Sätze

2. *Center-embedding*-Konstruktionen (nicht-regulär)

1. Chomsky-Hierarchie
2. *Center-embedding*-Konstruktionen (nicht-regulär)
3. *Cross-serial dependencies* (Hinweis auf Nicht-Kontextfreiheit)
4. *Garden-path*-Sätze (Hinweis auf probabilistische Sprachverarbeitung)

Center-embedding als nicht-reguläre Konstruktion

- ***center-embedding*-Rekursion:** $X \rightarrow \alpha X \beta$
  $\rightarrow$ ***rekursive Regel**: Nichtterminal erweitert zu selbem Nichtterminal, umgeben von Strings*
- *center-embedding*-Regel ist **nicht-regulär**:
  $\rightarrow$ *reguläre Grammatik:* ***nur links- oder rechtslineare Regeln**: $X \rightarrow Xa$ oder $X \rightarrow aX$*
  $\rightarrow$ *entsprechende* ***Einbettung nicht möglich***

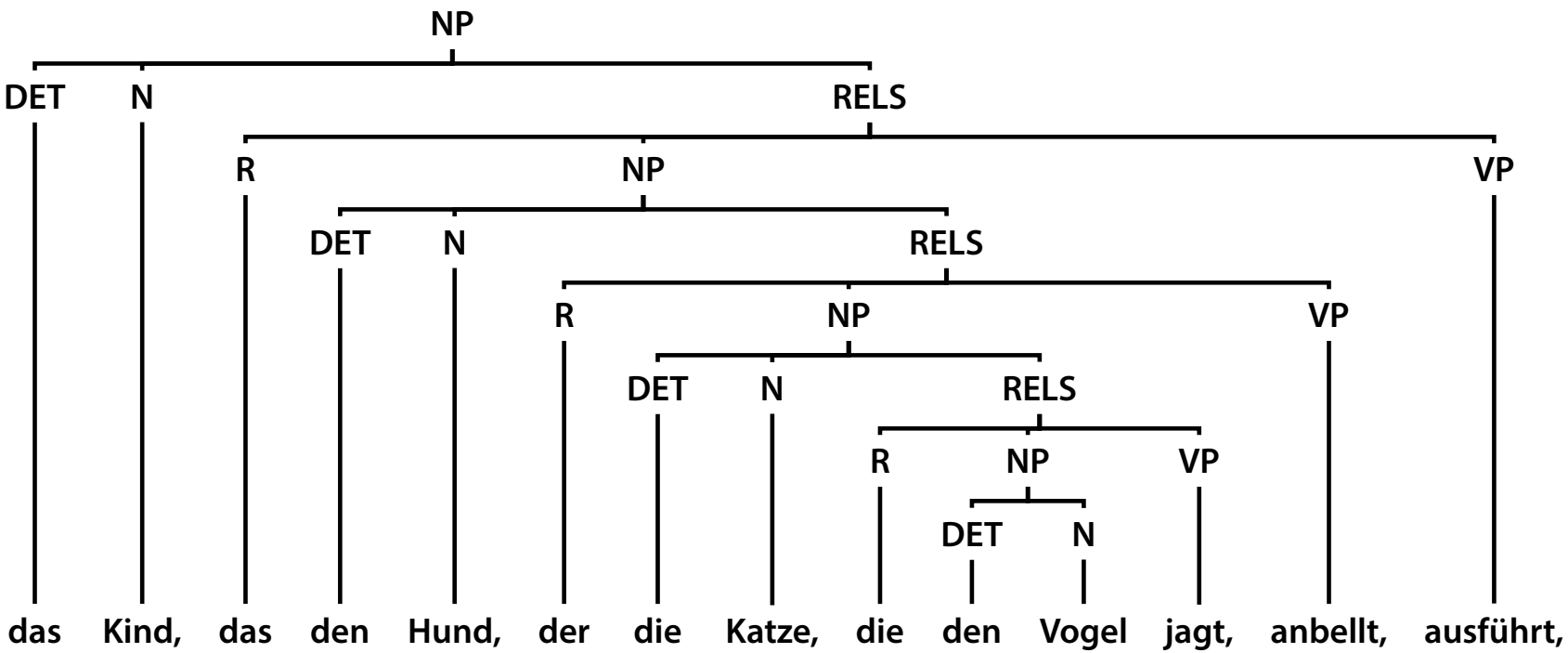
Beispiel einer *center-embedding*-Konstruktion

- **Rekursive Einbettung von Relativsätzen** als nominales Attribut:

  (Das Kind,)
  das den Hund$_{N1}$, der die Katze$_{N2}$, die den Vogel$_{N3}$ jagt$_{V3}$, anbellt$_{V2}$, ausführt$_{V1}$,
  ...

- Schema: $N_1(N_2(N_3V_3)V_2)V_1$
- Regeln:
  RELS $\rightarrow$ R **NP** V
  NP $\rightarrow$ DET N ***RELS***
- Ableitungen:
  RELS $\rightarrow$ R DET N **RELS** V
  RELS $\rightarrow$ R DET N **R DET N *RELS* V** V usw.

Syntaxbaum Center-embedding (Relativsatz)



Kognitive Beschränkung für Center-embedding

- psycholinguistische Experimente zeigen **Beschränkung in der Verarbeitung solcher Strukturen durch die menschliche Sprachverarbeitung** aufgrund von ***memory limitations***
  $\rightarrow$ *mehrfach verschachtelte* ***center-embedding-Strukturen*** *sind nur* ***bis zu einer begrenzten Tiefe verarbeitbar***
- **Korpus-Beispiel für *center-embedding* der Tiefe 3**:
  [M Er ... war allen Gefahren ...
  [C-1 welche ein jeder,
  [C-2 der diese wilde Gegend zu jener Zeit,
  [C-3 als diese Geschichte dort spielte,]
  durchstreifte,]
  gewärtig sein mußte,]
  gewachsen]
  (vgl. Karlsson 2007, Constraints on multiple center-embedding of clauses, Journal of Linguistics 43/2, 365-392.
  `http://www.ling.helsinki.fi/~fkarlsso/ceb5.pdf`)

3. *Cross-serial dependencies* (Hinweis auf Nicht-Kontextfreiheit)

1. Chomsky-Hierarchie
2. *Center-embedding*-Konstruktionen (nicht-regulär)
3. *Cross-serial dependencies* (Hinweis auf Nicht-Kontextfreiheit)
4. *Garden-path*-Sätze (Hinweis auf probabilistische Sprachverarbeitung)

Hinweise auf Nicht-Kontextfreiheit natürlicher Sprachen

- einige Sprachen, z. B. das **Schweizerdeutsche**, besitzen eine **Konstruktion, die nicht mit kontextfreien Grammatikmodellen** darstellbar ist
  $\rightarrow$ ***cross-serial dependencies***, *d. h.* ***Dependenzrelationen mit überkreuzenden Kanten:***
  $N_1 N_2 V_1 V_2$
  $N_1 N_2 N_3 V_1 V_2 V_3$
- Wörter bzw. Teilkonstituenten sind **seriell überkreuzend angeordnet**

cross-serial-Anordnung von Verb und Argument

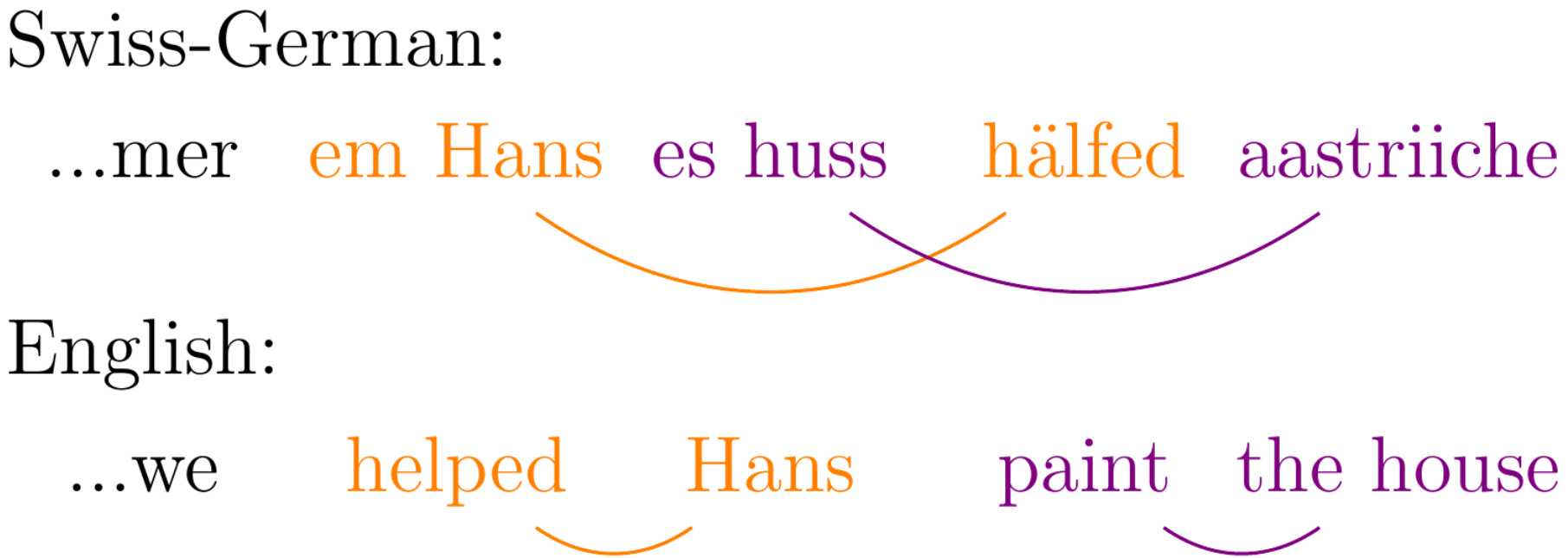


Abbildung: Cross-serial dependencies (by Christian Nassif-Haynes - Own work, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=28304322)

Argument für Nicht-Kontextfreiheit des Schweizerdeutschen

- **Anzahl von Verben mit Dativ-Komplement** muss übereinstimmen mit **Anzahl von Dativ-Komplementen**
- ebenso für Akkusativ-Komplemente
- theoretisch **unbegrenzte Anzahl** solcher ***cross-serial dependencies*** pro Satz
- **solche Sprachen enthalten** $L' = a^m b^n c^m d^n$
- die **Sprache** L' **ist aber nicht-kontextfrei**
  $\rightarrow$ *Nachweis über* ***Pumping Lemma*** *für kontextfreie Sprachen*

4. *Garden-path*-Sätze (Hinweis auf probabilistische Sprachverarbeitung)

1. Chomsky-Hierarchie
2. *Center-embedding*-Konstruktionen (nicht-regulär)
3. *Cross-serial dependencies* (Hinweis auf Nicht-Kontextfreiheit)
4. *Garden-path*-Sätze (Hinweis auf probabilistische Sprachverarbeitung)

Parser als Modell menschlicher Sprachverarbeitung

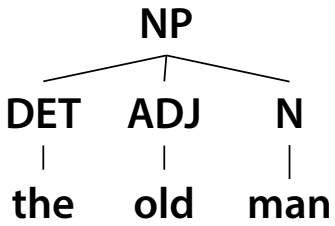
- Psycholinguistik: **Parser als Modell menschlicher Sprachverarbeitung**
- **Vergleich mit statistischen Sprachmodellen** gibt **Hinweis, dass auch menschliches Parsing Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt**
  $\rightarrow$ ***Disambiguierung*** *über statistische Informationen*

Garden-path-Sätze

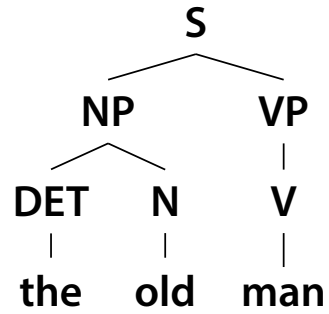
- Beispiel: ***garden-path*-Sätze** = Sätze mit **temporärer Ambiguität**
  - **Gesamter Satz: unambig**, nur eine Ableitung
  - **Teil des Satzes: ambig**, eine strukturelle **Lesart** wird (offensichtlich) **von der menschlichen Sprachverarbeitung bevorzugt**
  - aber: **nicht-präferierte Lesart** für den Teil ist **die für die Ableitung des Satzes korrekte**
- Beobachtung: **wahrscheinlichste Ableitung wird verfolgt**, bis sie fehlschlägt und **Backtracking (Reanalyse) notwendig** ist

Beispiel: *garden-path*-Satz

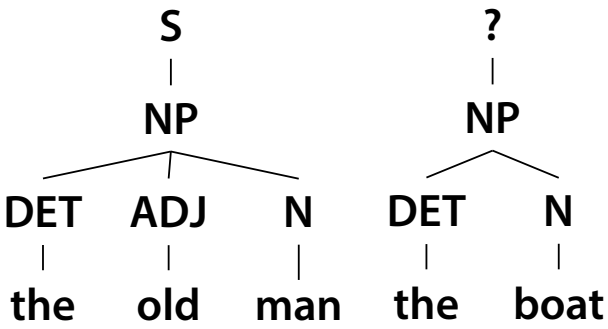
The old man the boat.



VS.



- P(*man*|N) > P(*man*|V), P(*old*|ADJ)>P(*old*|N)



VS.