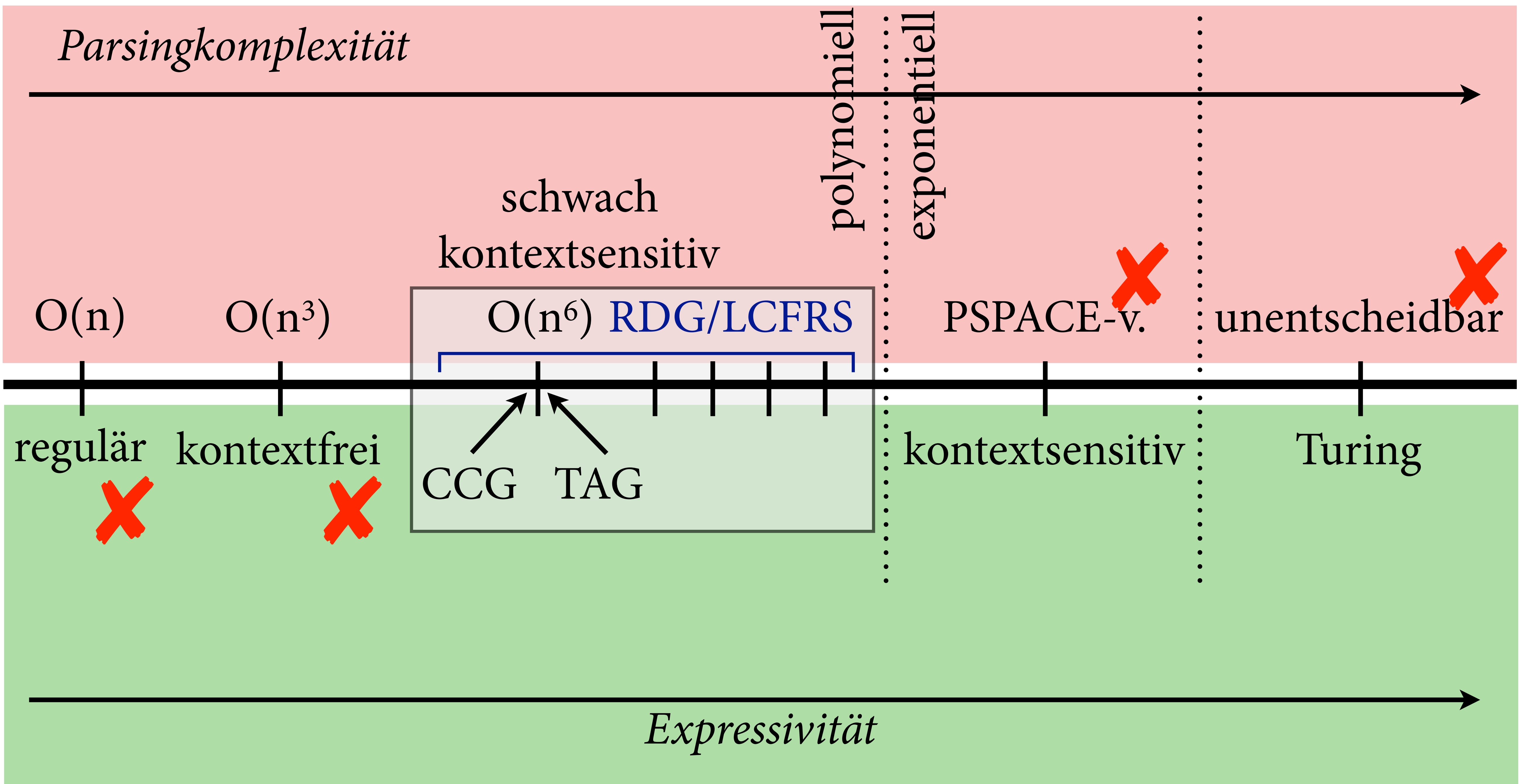
Reguläre Dependenzgrammatiken und starke Expressivität

Vorlesung "Grammatikformalismen"
Alexander Koller

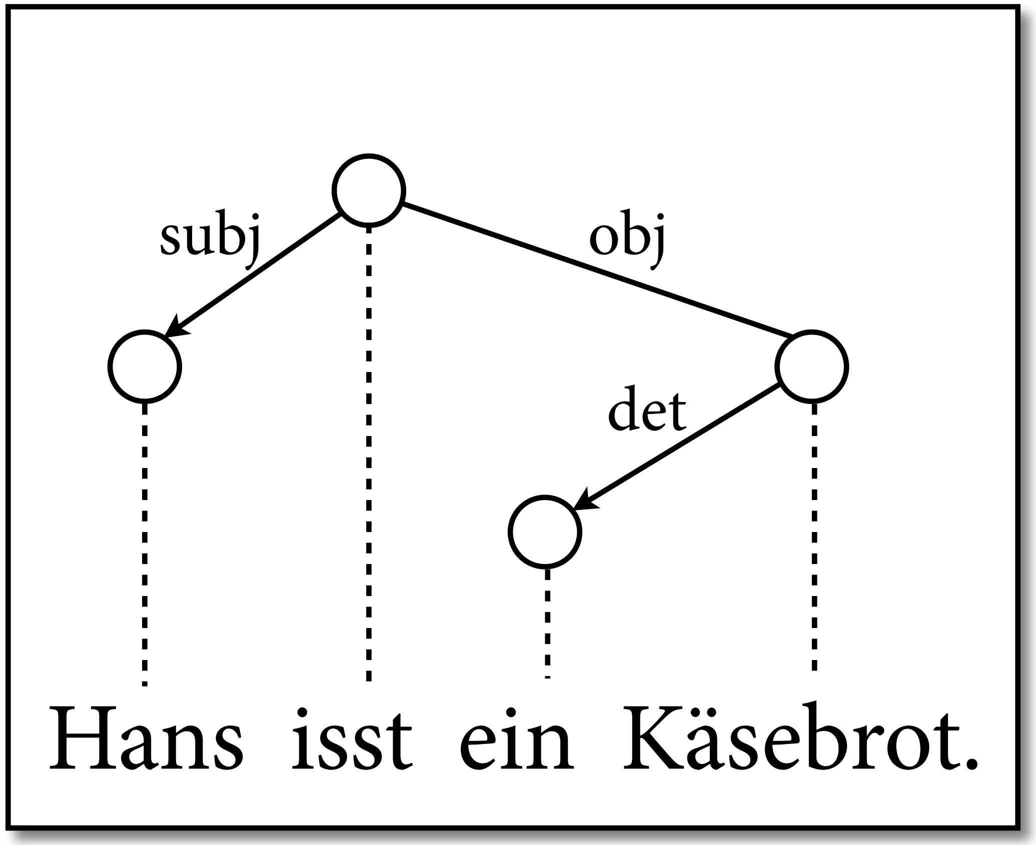
9. Juni 2017

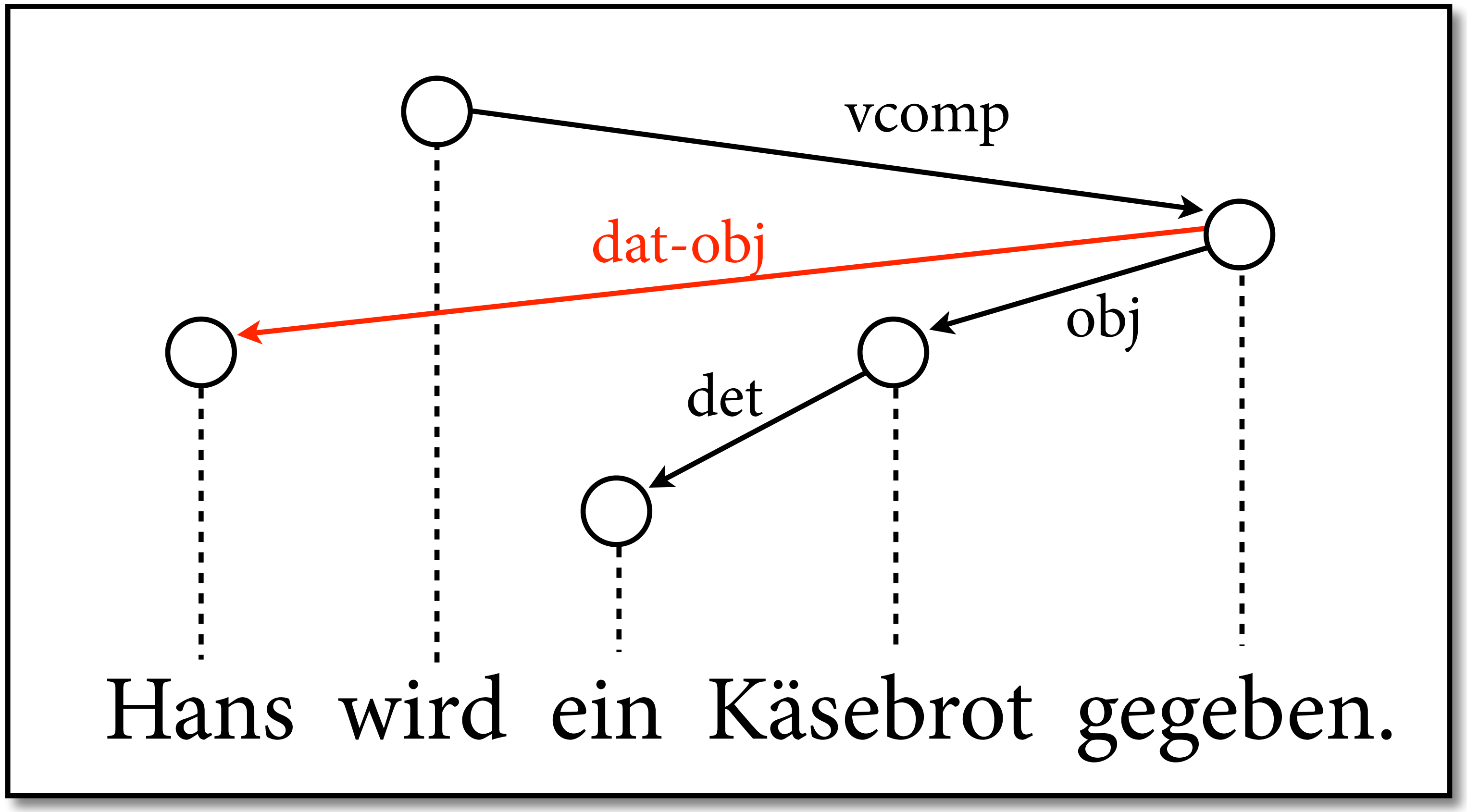
Eine allgemeinere Perspektive



Dependenzstrukturen

Dependenzstruktur = Baum + lineare Ordnung auf Knoten





projektiv

nichtprojektiv

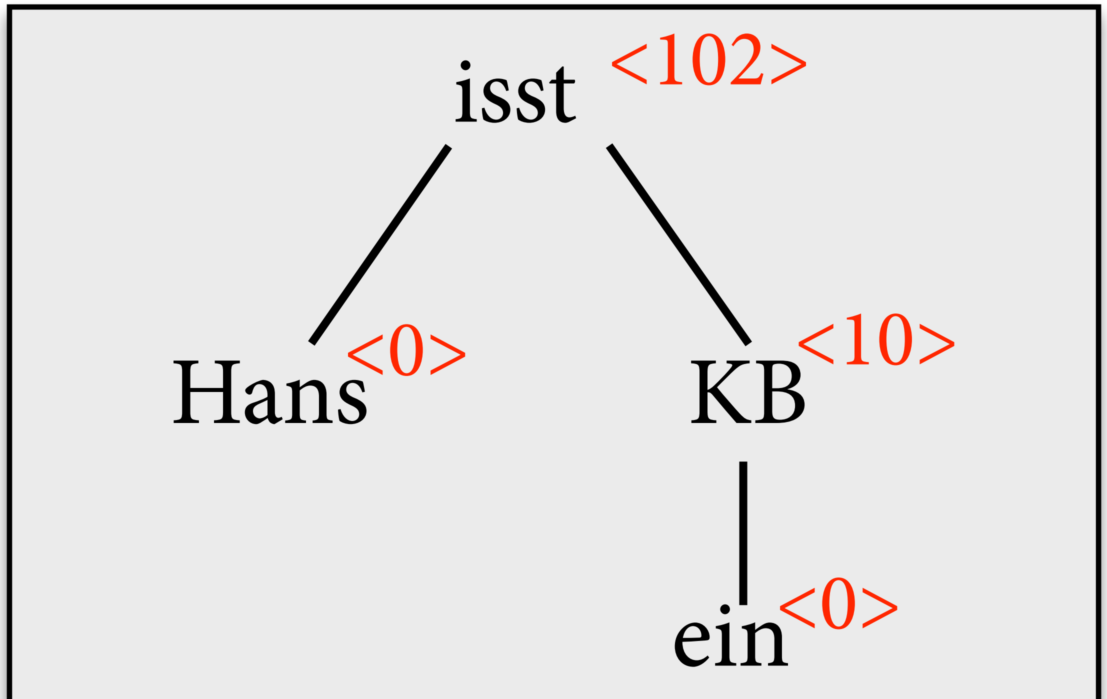
Ordnungsannotationen

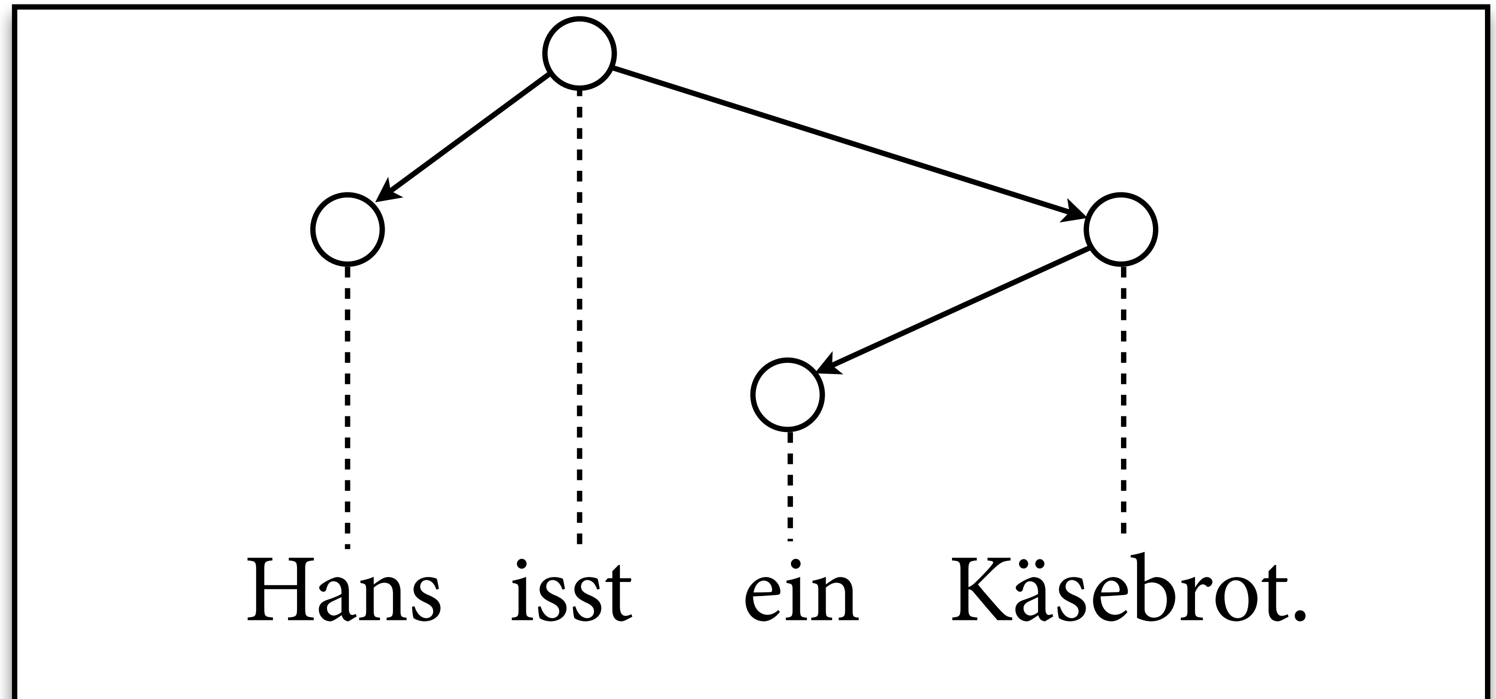
- Möchte Dependenzstruktur als einen einzigen Baum darstellen, damit ich RTGs verwenden kann.

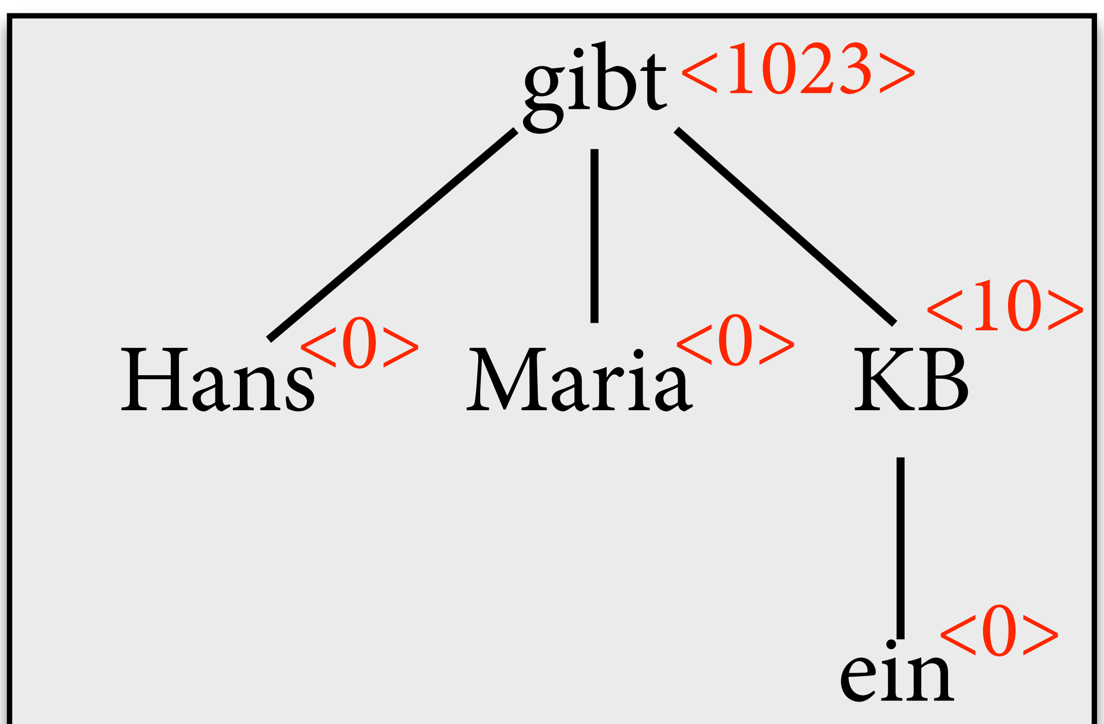
- Annotiere jeden Knoten im Baum mit einer *Ordnungsannotation (OA)*, die angibt, wie Ertrag des Knotens sich aus Erträgen seiner Kinder zusammensetzt.

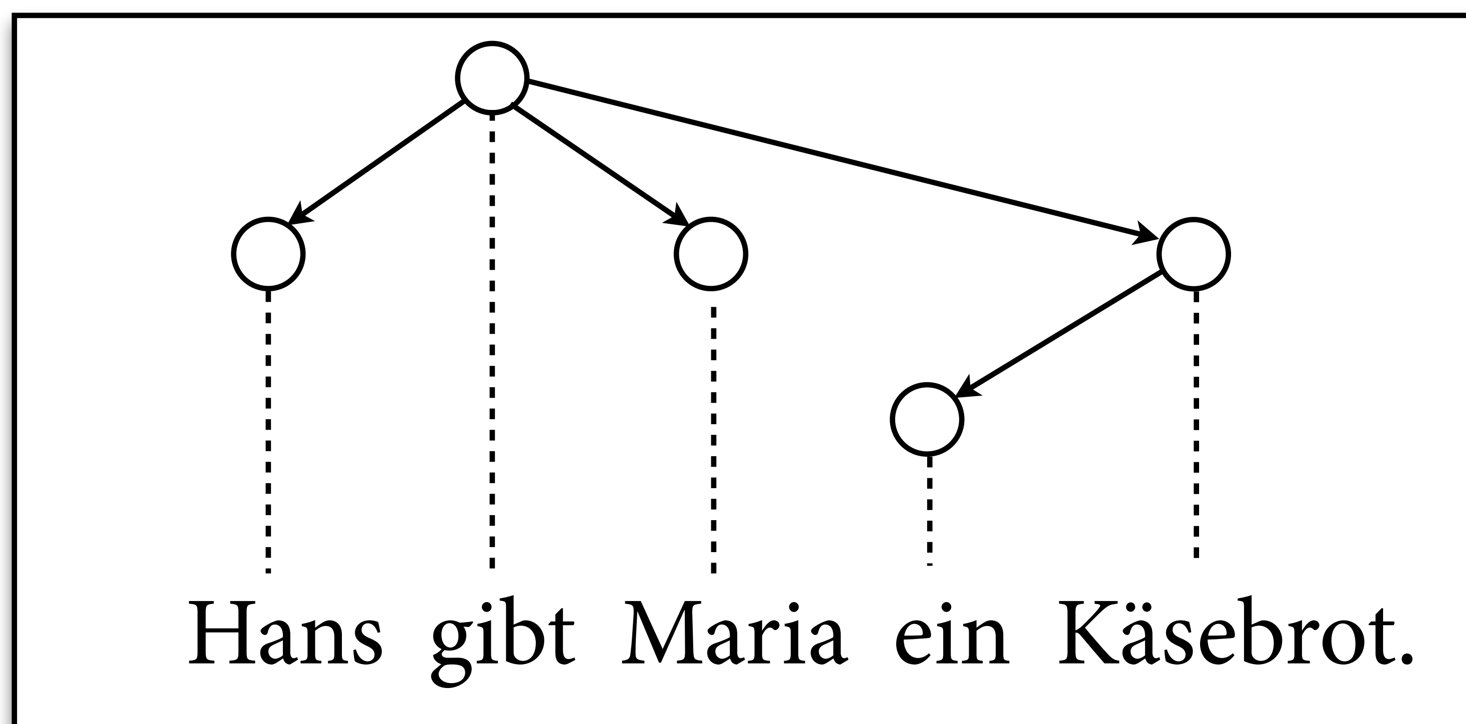
- Ordnungsannotation = String von Zahlen
  - 0: Knoten selbst
  - 1, 2, 3, …: Ertrag des ersten, zweiten, dritten … Kindes

Ordnungsannotationen

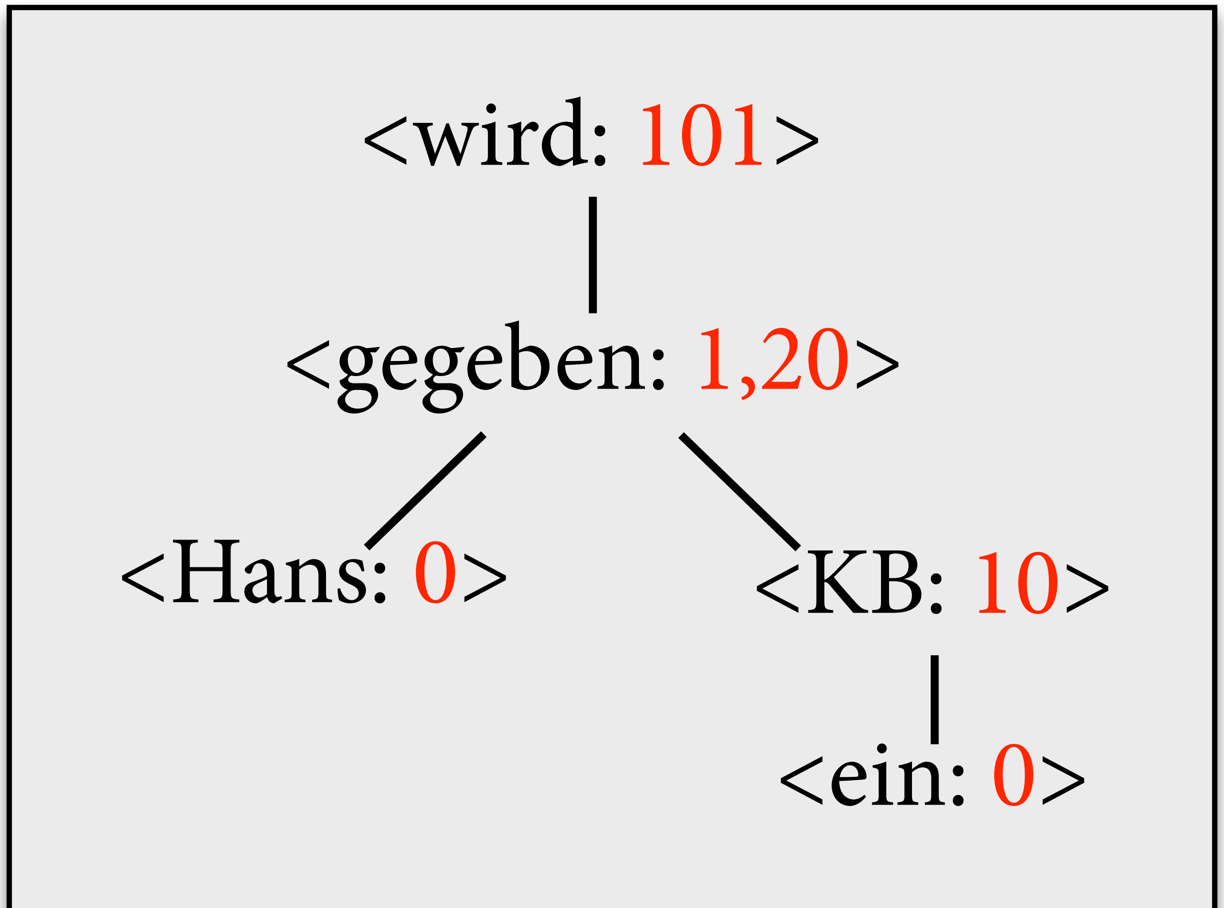




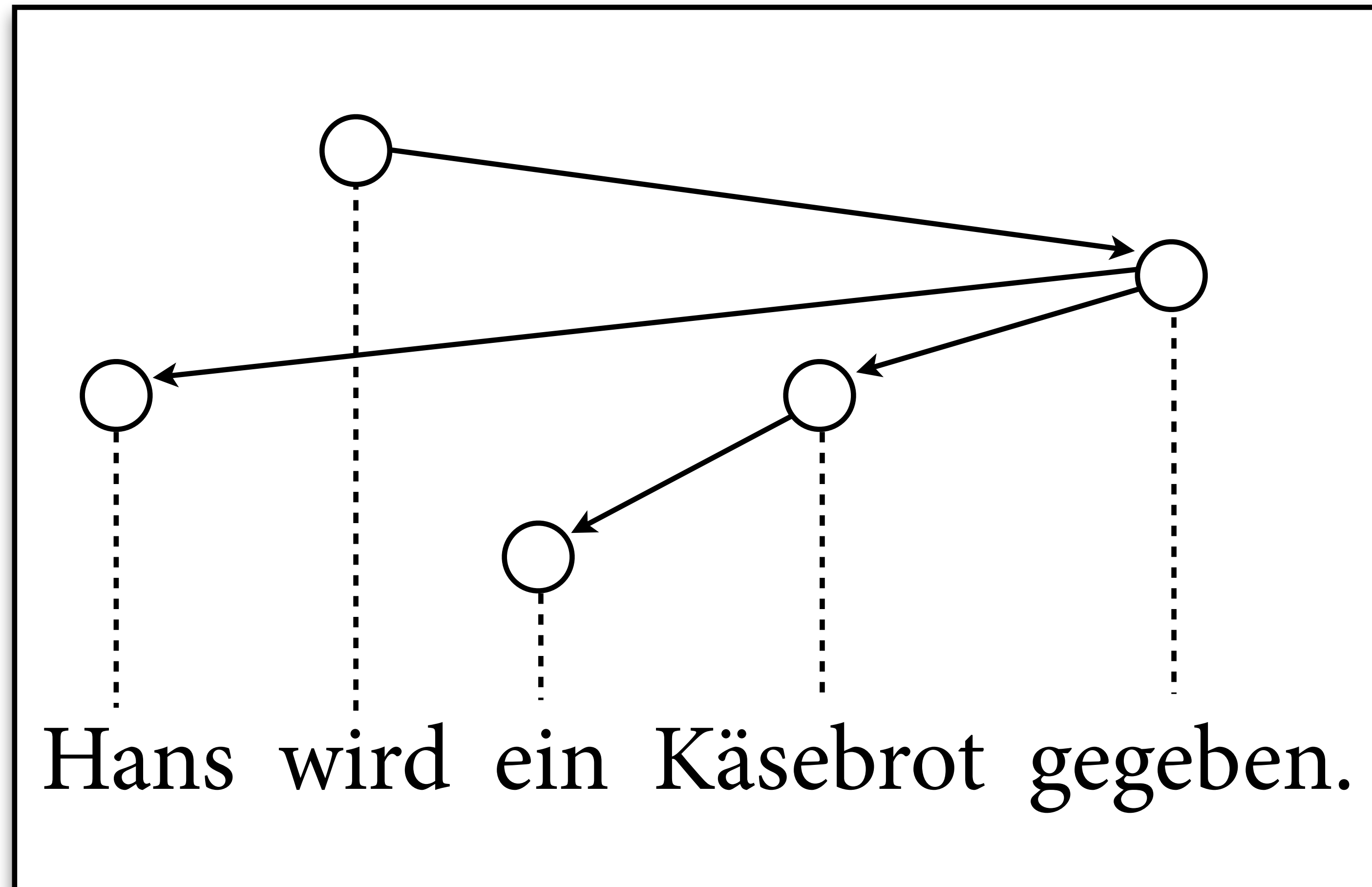




Nichtprojektive OAen



Baum mit Ordnungsannotationen

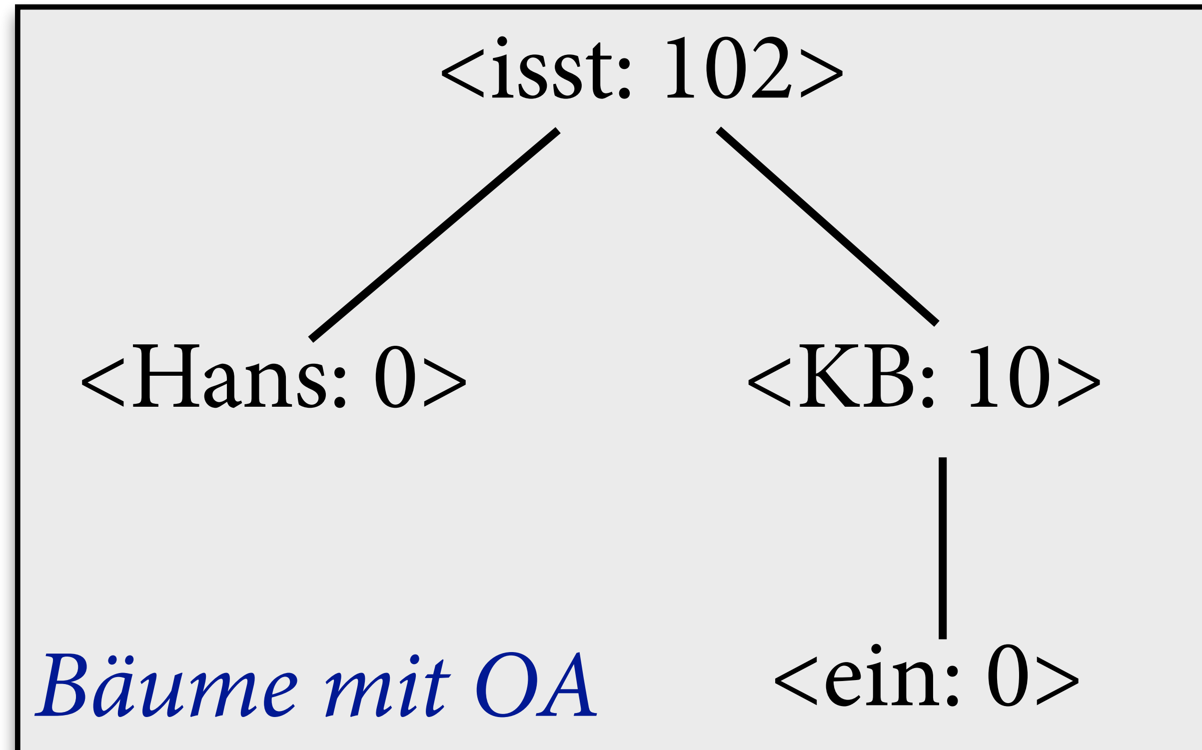


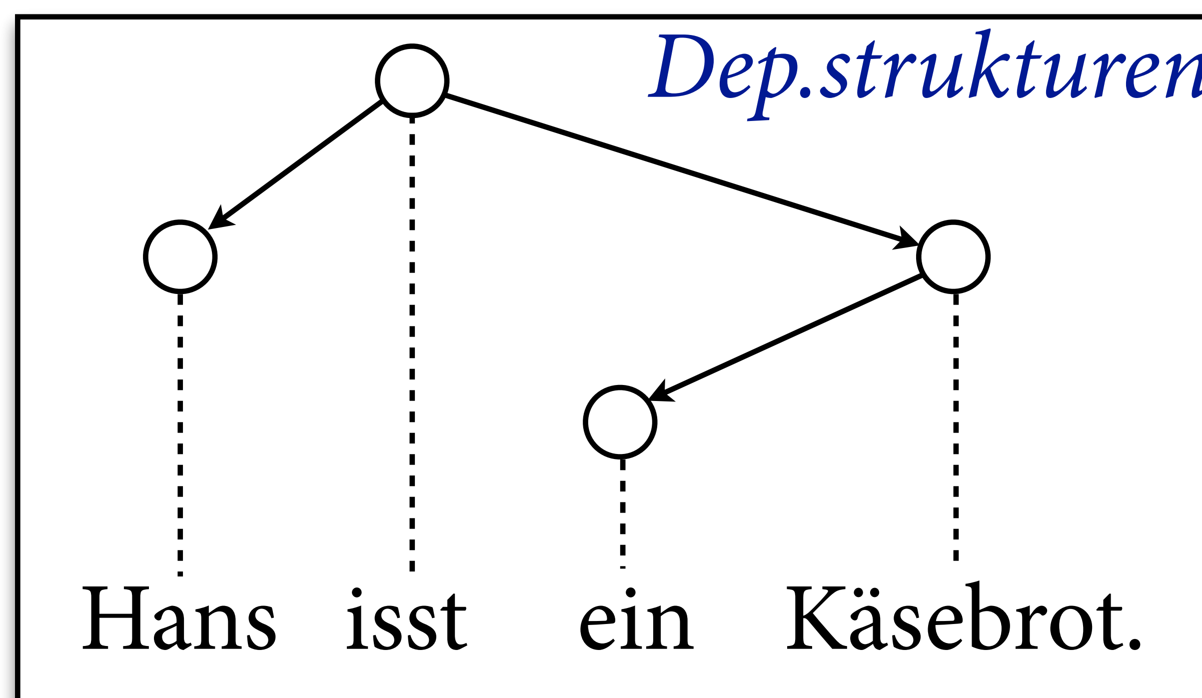
Dependenzstruktur

Beispiel

S → <isst: 102>(NP, VP)
NP → <Hans: 0>
NP → <KB: 10>(Det)
Det → <ein: 0>

RDG-Grammatik

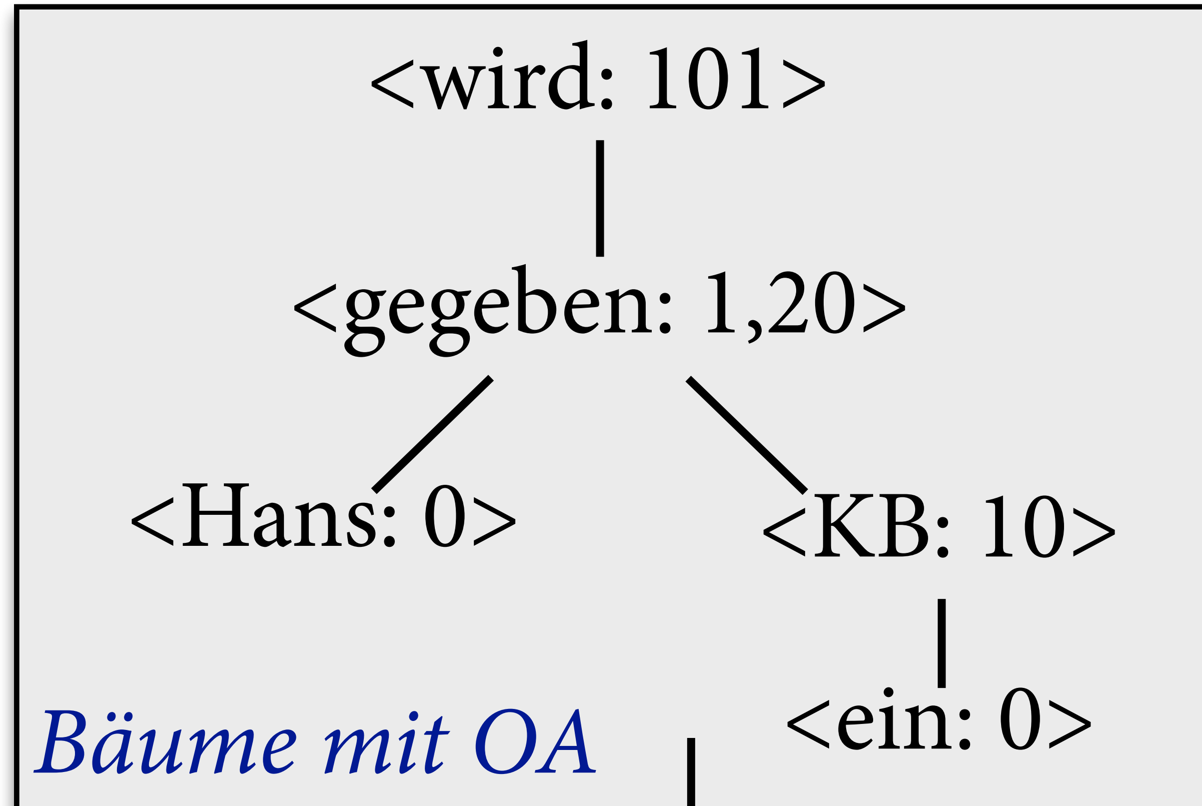


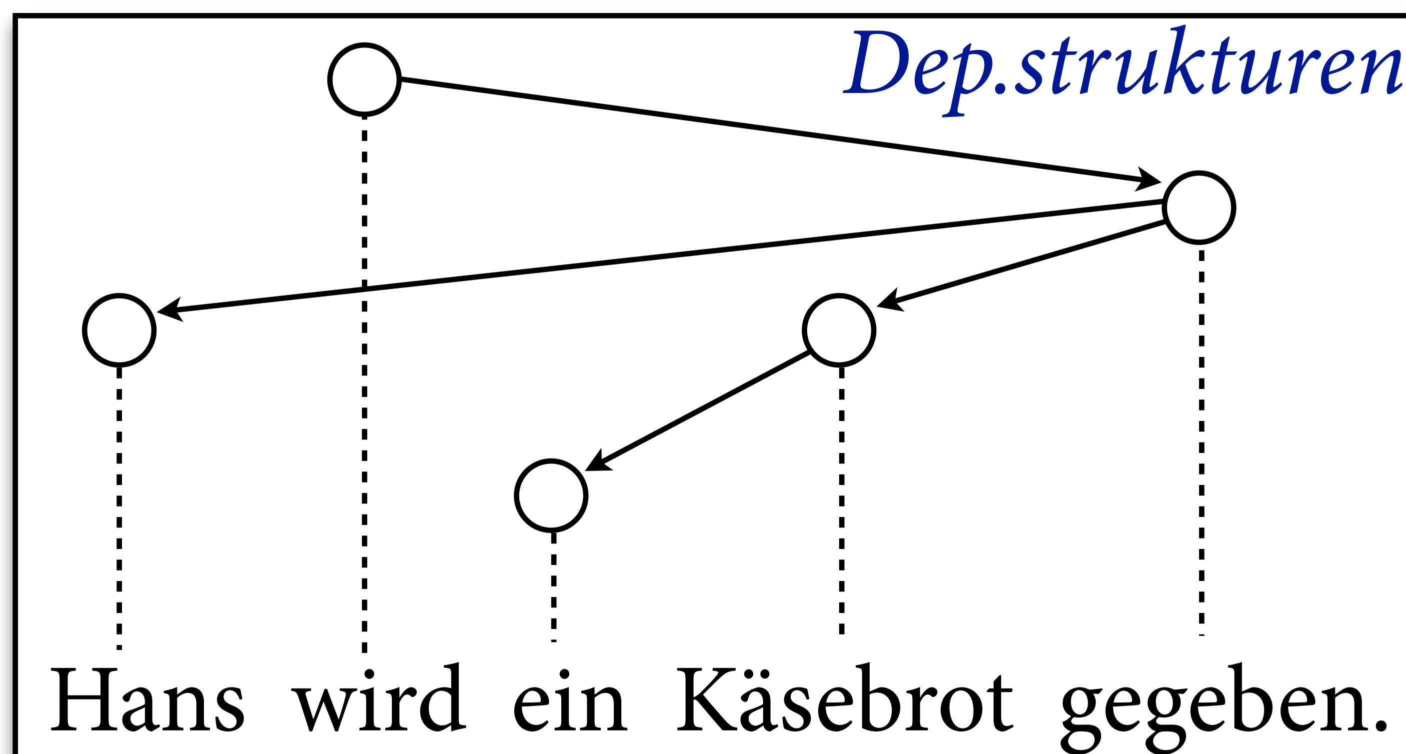


Beispiel

S → <wird: 101>(VP)
VP → <geg: 1,20>(NP, NP)
NP → <Hans: 0>
NP → <KB: 10>(Det)
Det → <ein: 0>

RDG-Grammatik





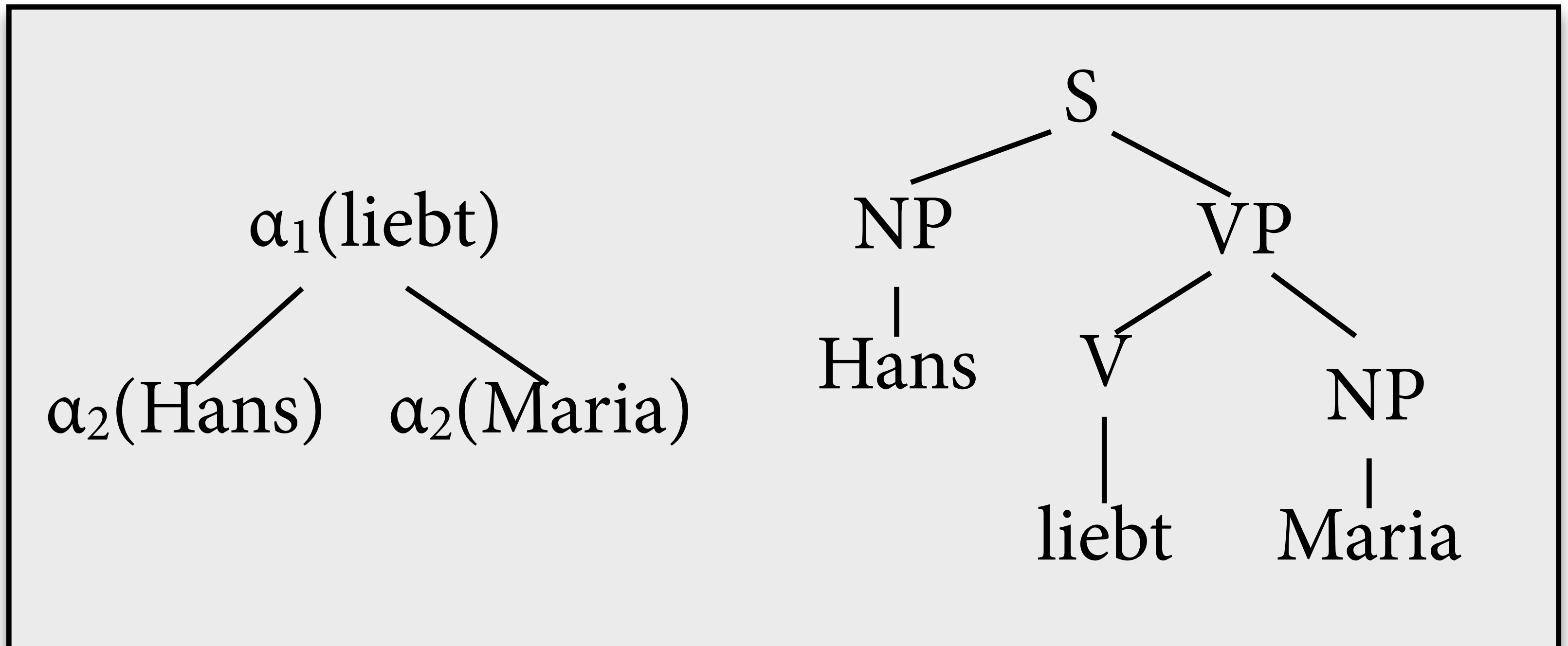
Übersicht

- *Starke Äquivalenz* von lexikalisierten Grammatikformalismen bzgl. Dep.strukturen:
  - lexikalisierte TSGs und kontextfreie Grammatiken
  - lexikalisierte TAGs
- Hierarchie von regulären Dependenzsprachen
- Parsing von regulären Dependenzgrammatiken

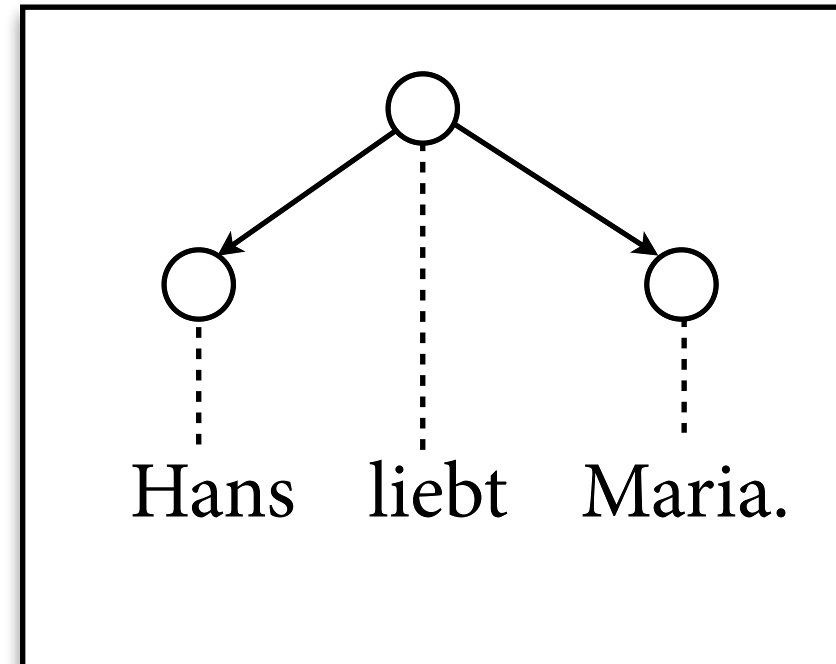
Zweck von Grammatiken

- Eine (lexikalisierte) Grammatik stellt einen Zusammenhang her zwischen:
  - Valenz: welches Wort füllt welche syntaktische Rolle eines anderen Wortes?
  - Wortstellung: in welcher Reihenfolge können die Wörter im Satz stehen?
- In Dependenzgrammatiken sehr explizit.
  - Dependenzstruktur = Valenz + Wortstellung
  - Ordnungsannotation: ordnet Valenzen eines Wortes an

LTSG → RDG: Ableitungen



LTSG-Ableitung

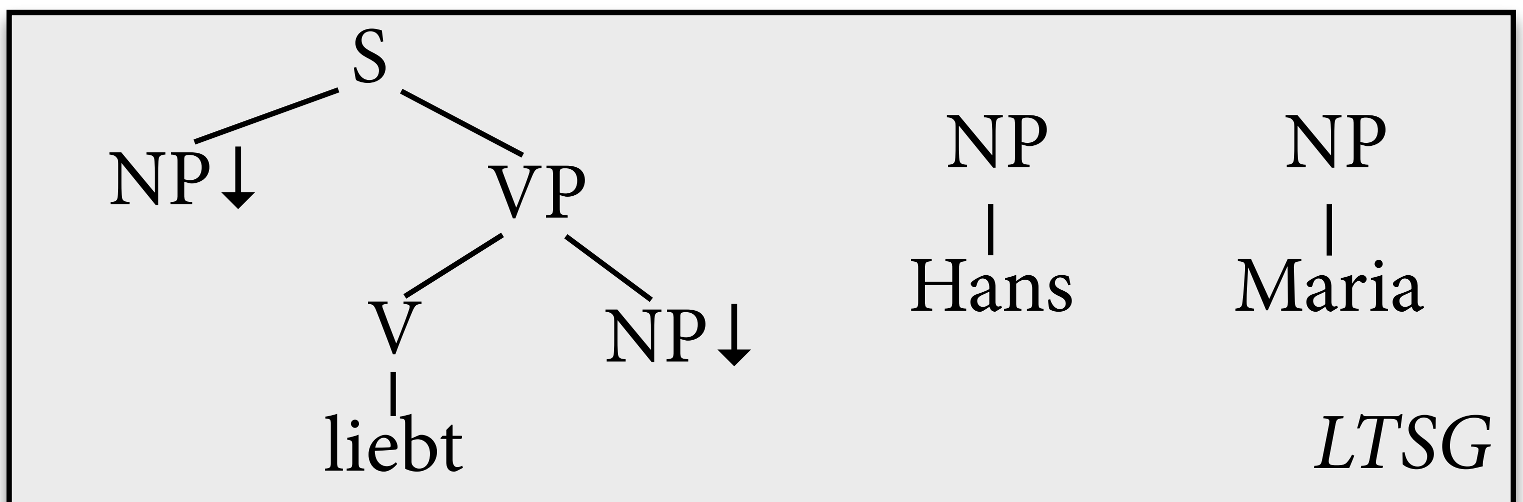


Dep.struktur

- Übersetzung LTSG-Ableitungsbaum in Dependenzstruktur:
  - Baum = Ableitungsbaum (= Valenz) (= Dominanz)
  - Ordnung = Wortstellung im abgeleiteten Baum (= Präzedenz)

LTSG → RDG: Grammatiken

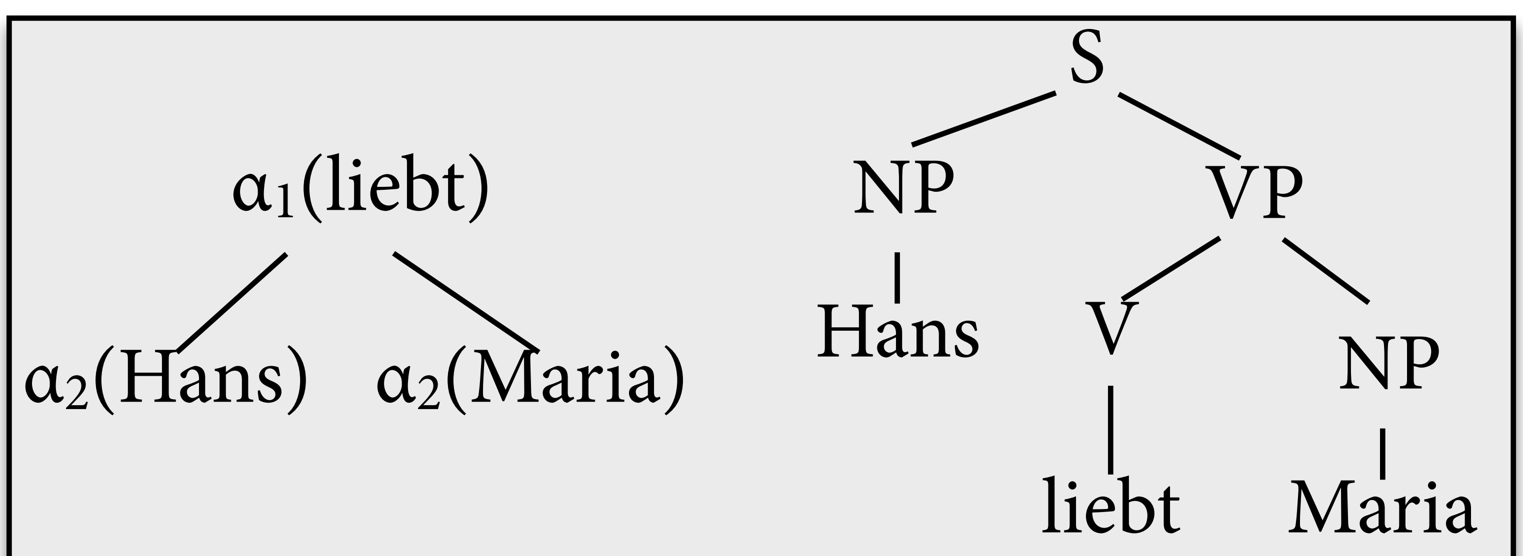
- Übersetzung einer ganzen Grammatik:
  - jeder Elementarbaum der LTSG → eine Regel der RDG
  - Wortstellung im Elementarbaum mit OA darstellen

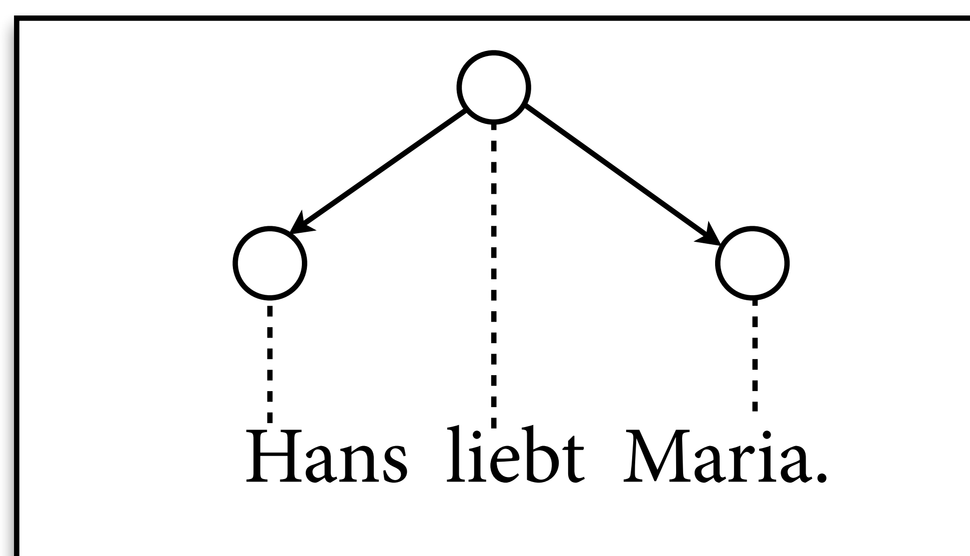


S → <liebt: 102>(NP, NP)
NP → <Hans: 0>
NP → <Maria: 0>

RDG

Grammatik



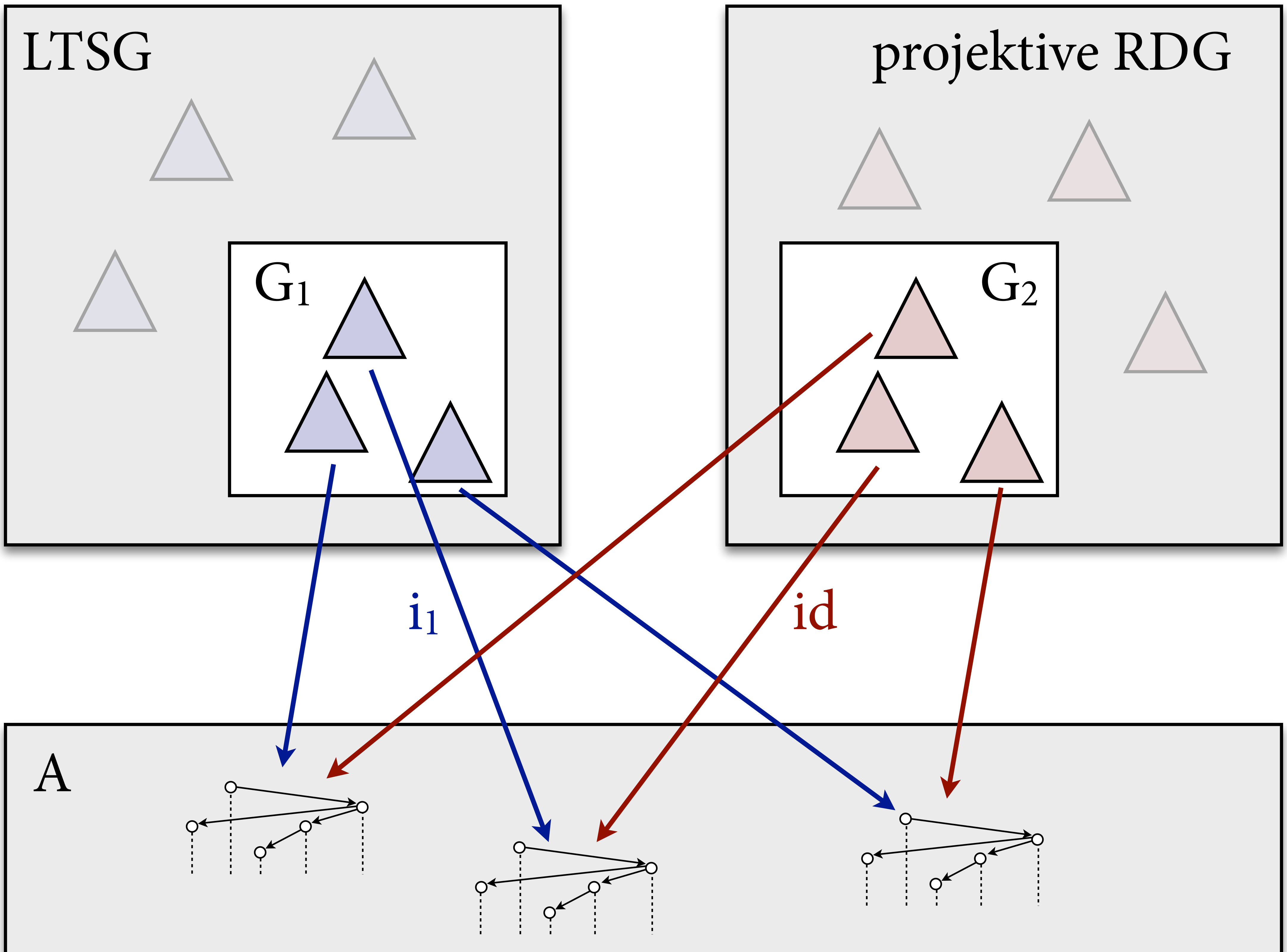


Ableitung

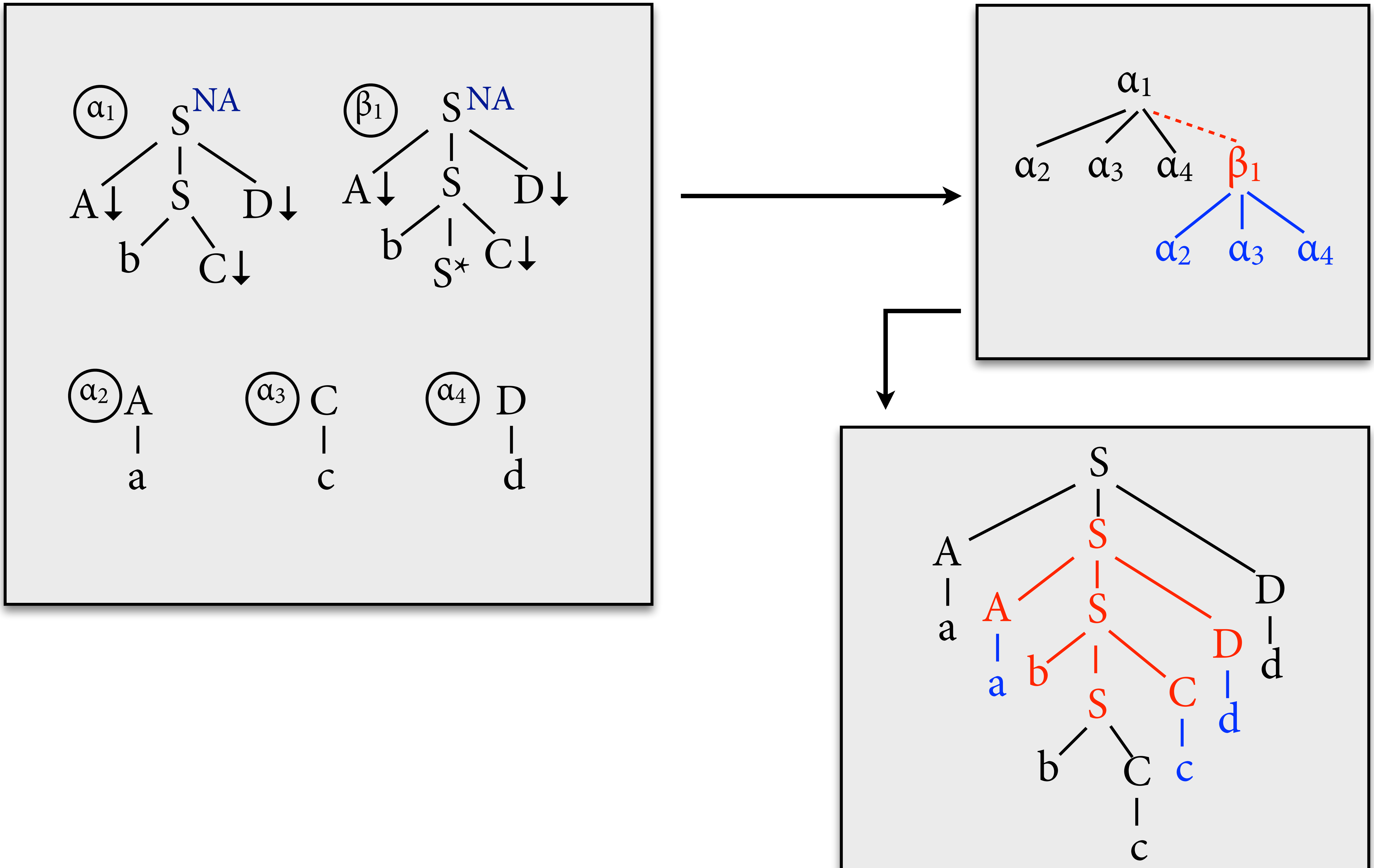
LTSG → RDG

- Übersetzung LTSG → RDG:
  - jede LTSG-Ableitung in eine Dependenzstruktur
  - jede LTSG-Grammatik in eine RDG-Grammatik, die genau die gleichen Dependenzstrukturen beschreibt
- RDG ist immer projektiv. Umgekehrt jede projektive RDG in stark äquivalente LTSG übersetzbar.
- LTSG und RDG *stark äquivalent* bzgl. Dep.strukturen.
- (*Schwache* Äquivalenz von kfG und projektiven Dep.grammatiken seit 1960ern bekannt: Hays/Gaifman.)

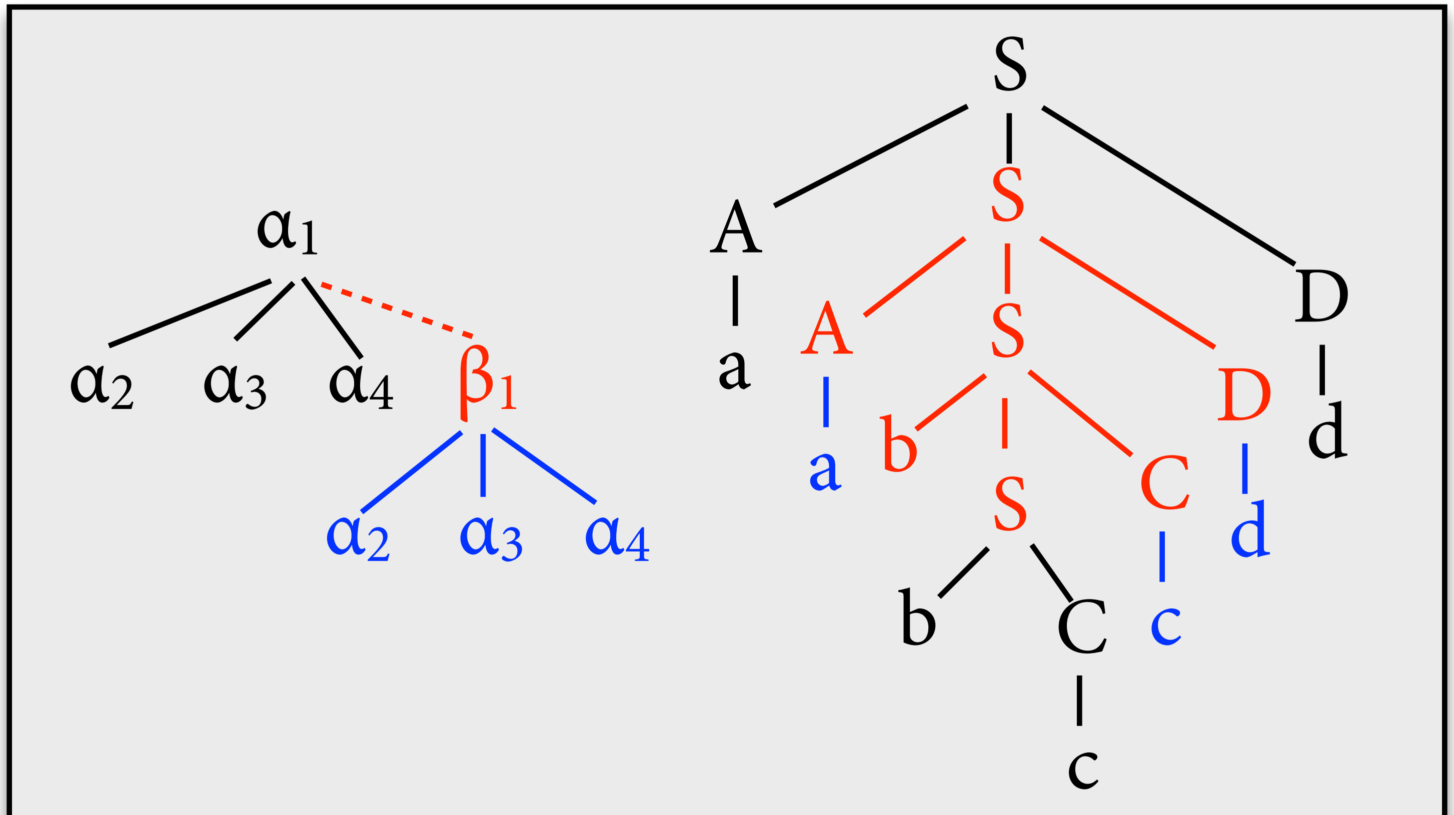
Äquivalenz bzgl. Dependenzstrukturen



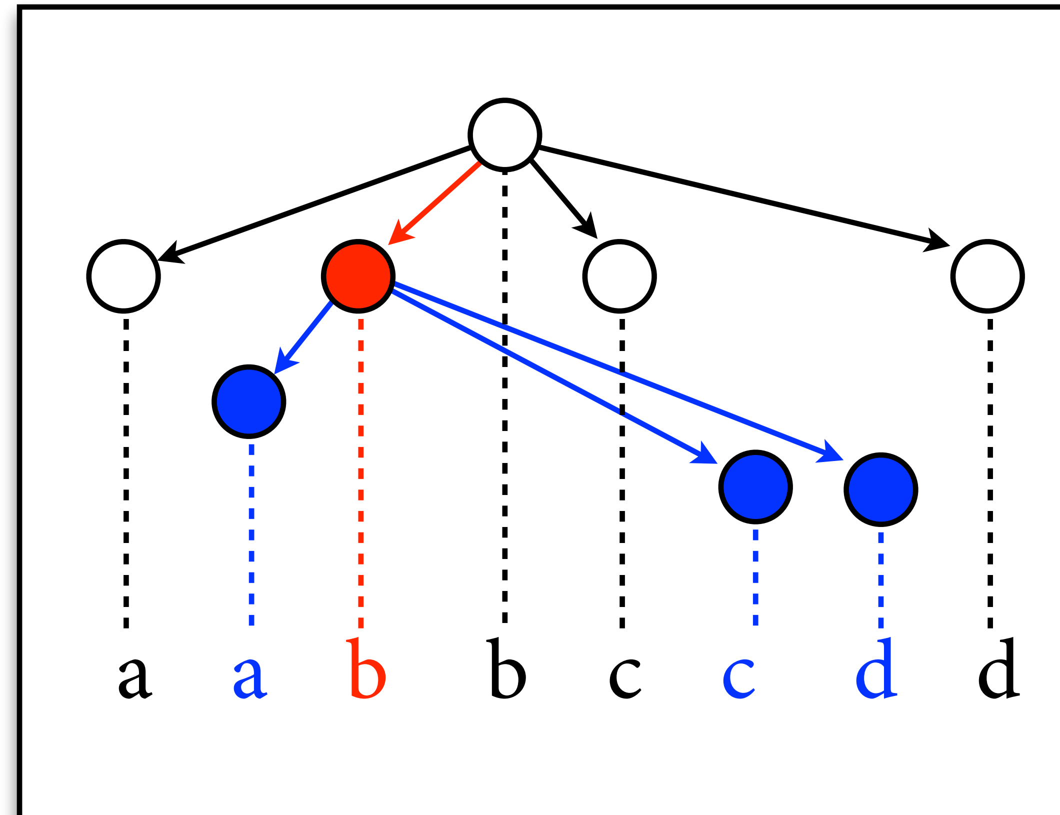
LTAG für COUNT(4)



LTAG → RDG: Ableitungen



LTAG-Ableitung



Dependenzstruktur

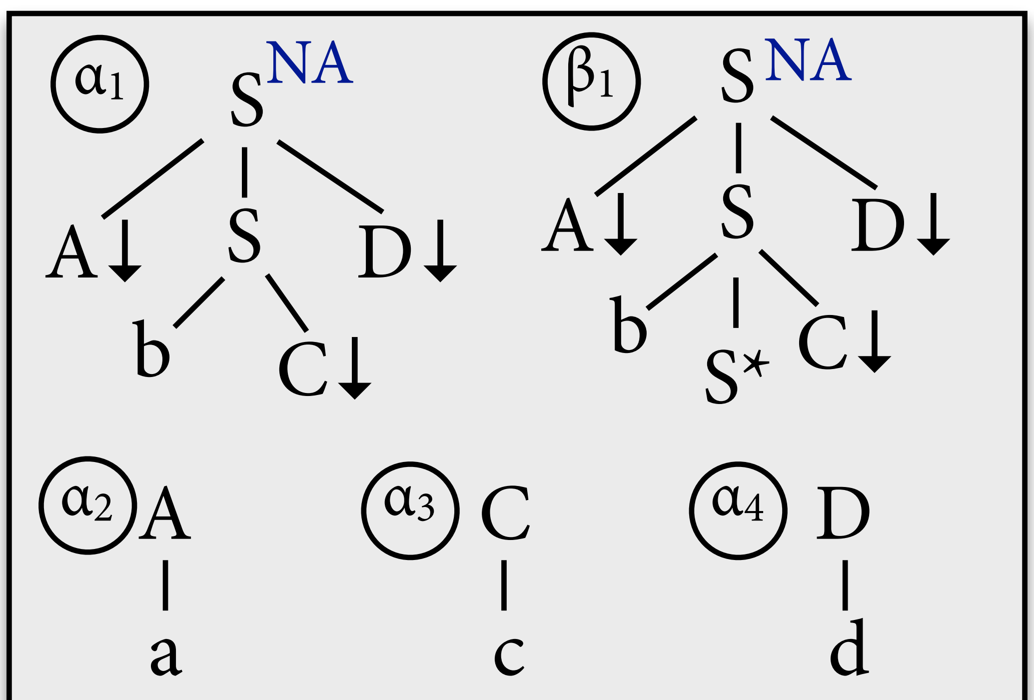
- Übersetzung LTAG-Ableitungsbaum in Dependenzstruktur:
  - Baum = Ableitungsbaum
  - Ordnung = Wortstellung im abgeleiteten Baum

LTAG → RDG: Grammatiken

- Für jede TAG-Grammatik ist *Sprache der Ableitungsbäume* reguläre Baumsprache.
  - RTG hat Nichtterminalsymbole N_S (für Substitution) und N_A (für Adjunktion).
  - Elementarbaum α → RTG-Regel mit Terminalsymbol α

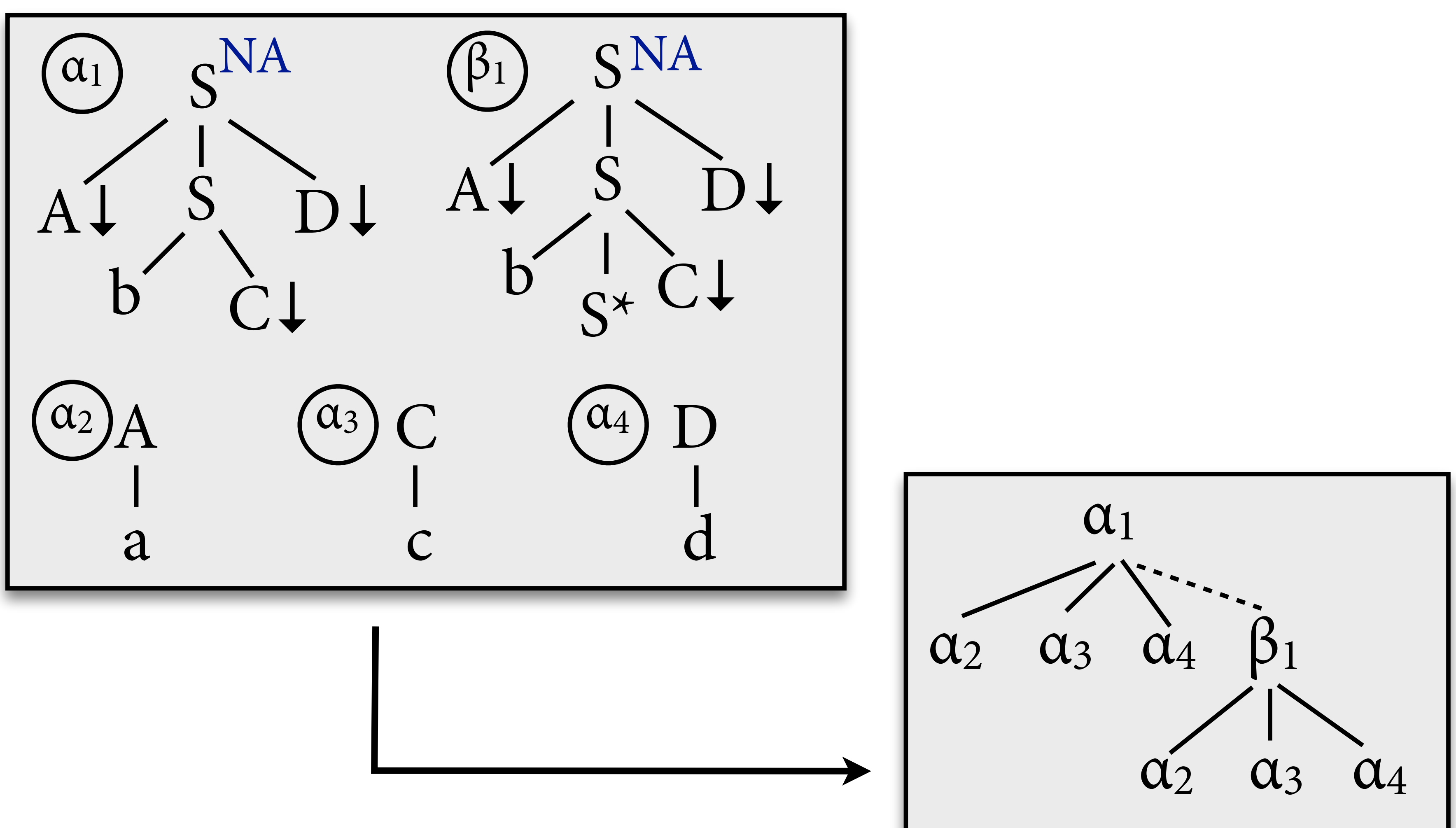
LTAG → RDG: Grammatiken

- Für jede TAG-Grammatik ist *Sprache der Ableitungsbäume* reguläre Baumsprache.
    - RTG hat Nichtterminalsymbole N_S (für Substitution) und N_A (für Adjunktion).
    - Elementarbaum α → RTG-Regel mit Terminalsymbol α



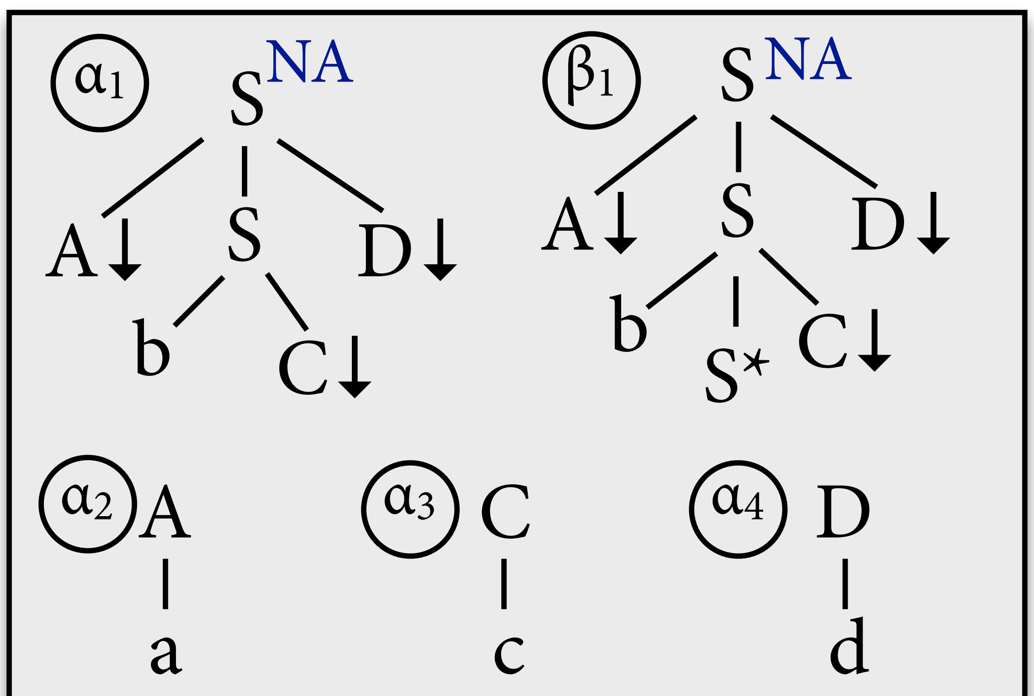
LTAG → RDG: Grammatiken

- Für jede TAG-Grammatik ist *Sprache der Ableitungsbäume* reguläre Baumsprache.
  - RTG hat Nichtterminalsymbole N_S (für Substitution) und N_A (für Adjunktion).
  - Elementarbaum α → RTG-Regel mit Terminalsymbol α

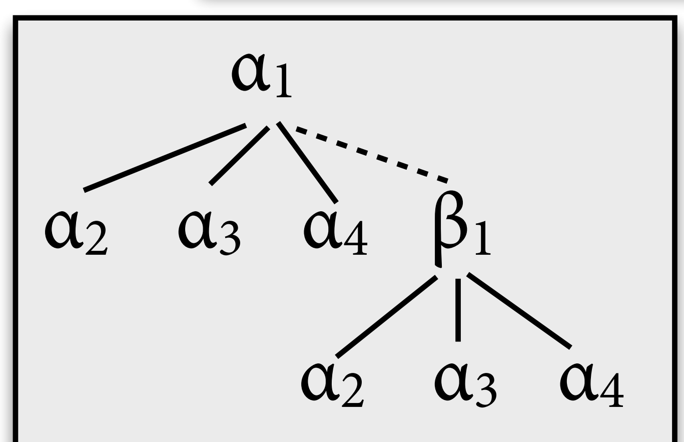


LTAG → RDG: Grammatiken

- Für jede TAG-Grammatik ist *Sprache der Ableitungsbäume* reguläre Baumsprache.
  - RTG hat Nichtterminalsymbole N_S (für Substitution) und N_A (für Adjunktion).
  - Elementarbaum α → RTG-Regel mit Terminalsymbol α

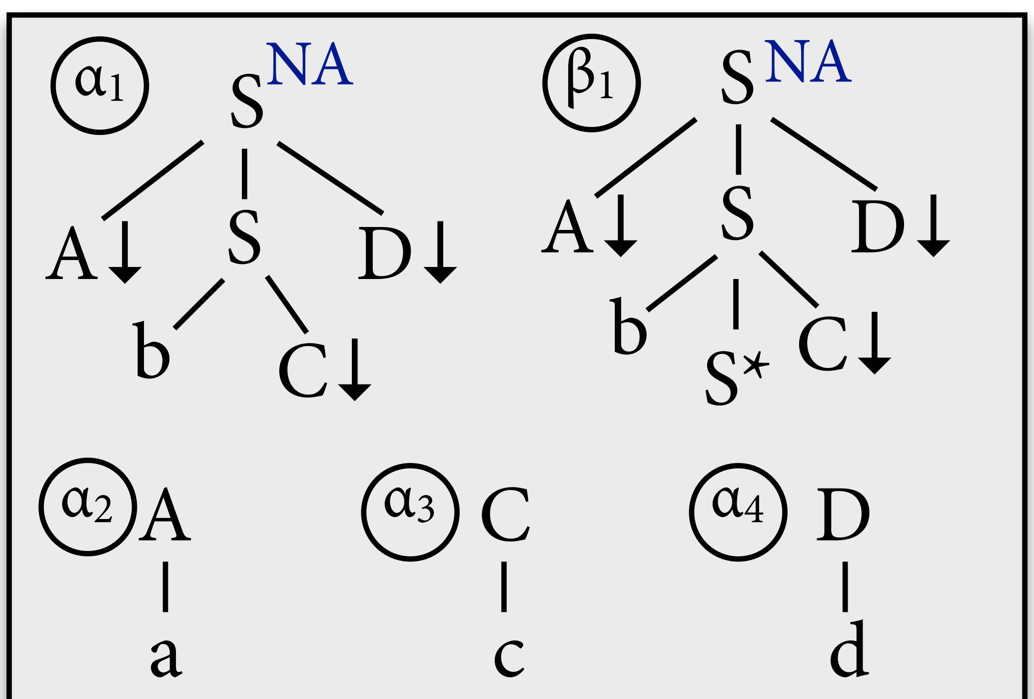


$$S_S \rightarrow \alpha_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$
$$S_S \rightarrow \alpha_1(A_S, C_S, D_S)$$
$$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$
$$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S)$$
$$A_S \rightarrow \alpha_2 \quad C_S \rightarrow \alpha_3 \quad D_S \rightarrow \alpha_4$$

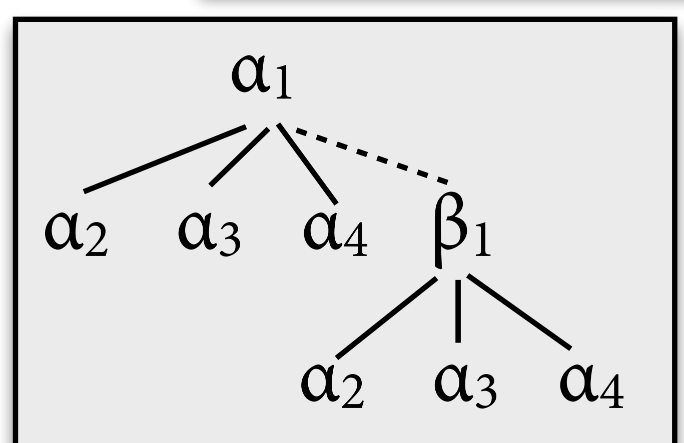


LTAG → RDG: Grammatiken

- Für jede TAG-Grammatik ist *Sprache der Ableitungsbäume* reguläre Baumsprache.
  - RTG hat Nichtterminalsymbole N_S (für Substitution) und N_A (für Adjunktion).
  - Elementarbaum α → RTG-Regel mit Terminalsymbol α

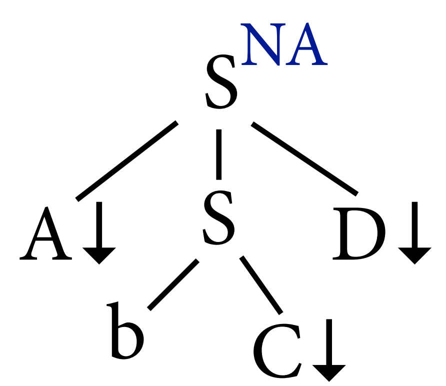


$$S_S \rightarrow \alpha_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$
$$S_S \rightarrow \alpha_1(A_S, C_S, D_S)$$
$$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$
$$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S)$$
$$A_S \rightarrow \alpha_2 \quad C_S \rightarrow \alpha_3 \quad D_S \rightarrow \alpha_4$$

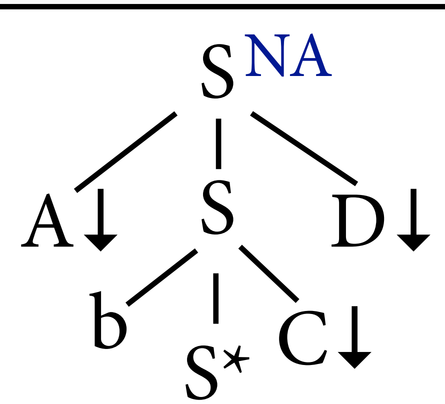


Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



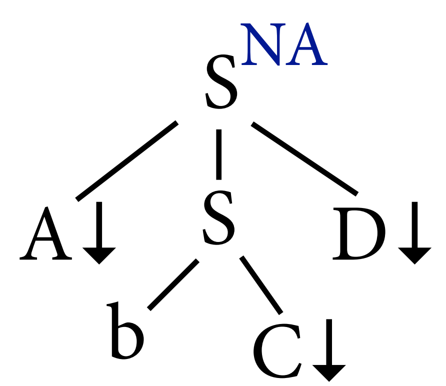
$S_S \rightarrow \alpha_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$



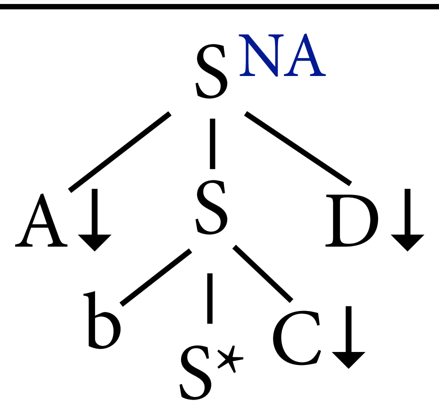
$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



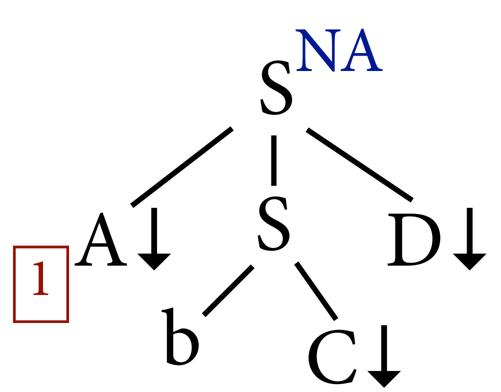
$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S,}\ \overset{\boxed{2}}{C_S,}\ \overset{\boxed{3}}{D_S,}\ \overset{\boxed{4}}{S_A})$$



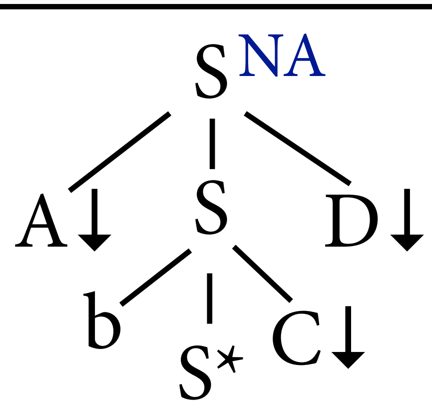
$$S_A \to \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



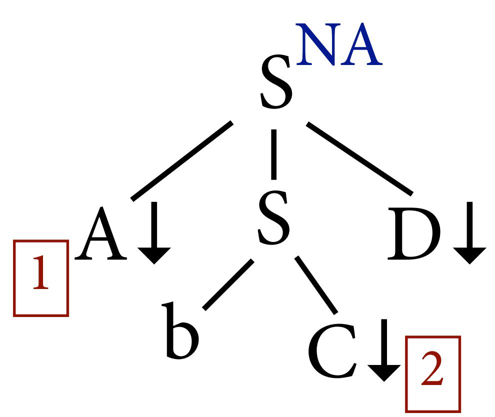
$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$



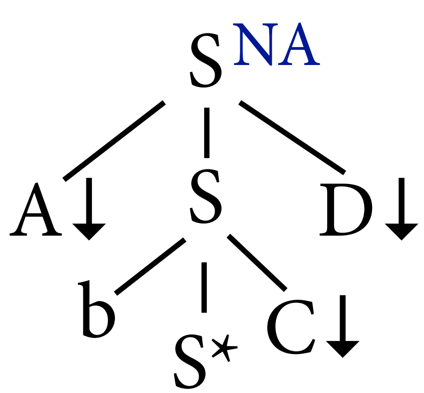
$$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



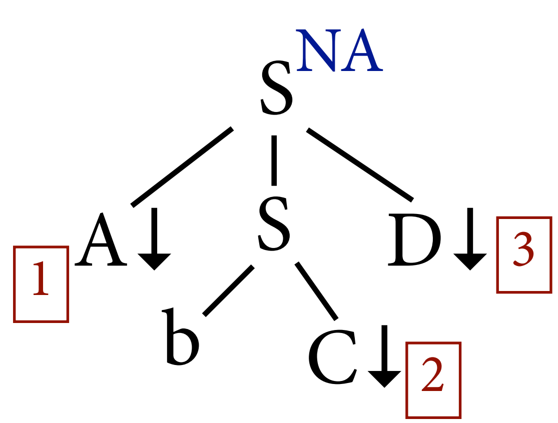
$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$



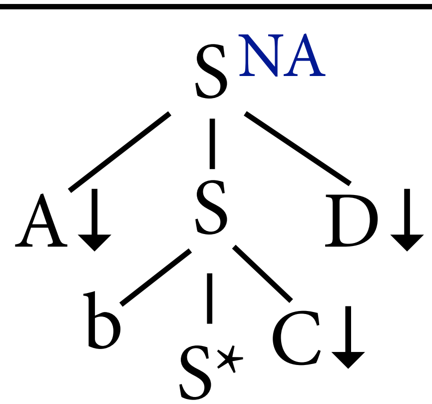
$$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



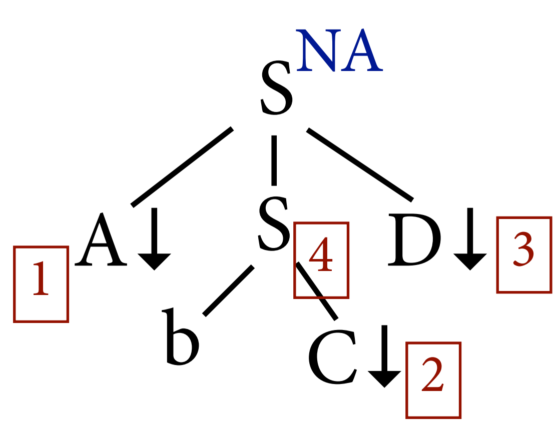
$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$



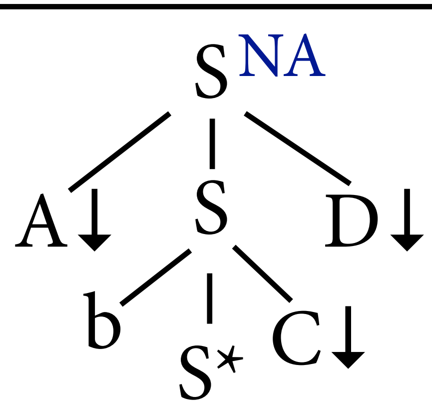
$$S_A \to \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



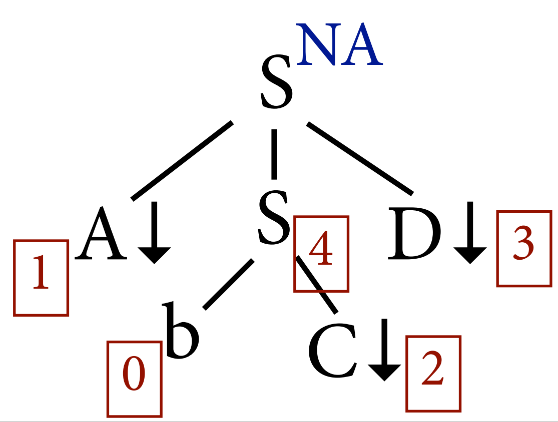
$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$



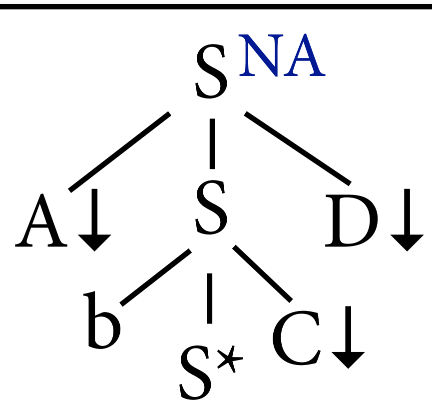
$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



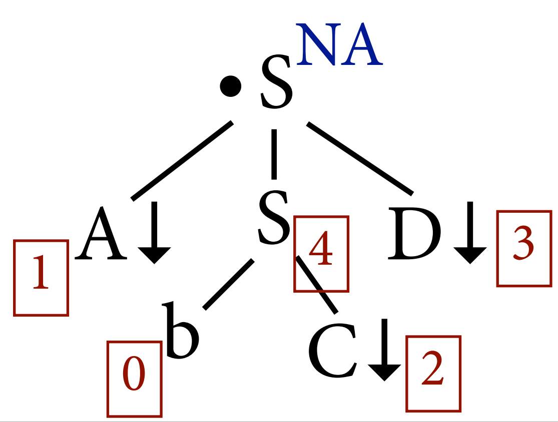
$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$



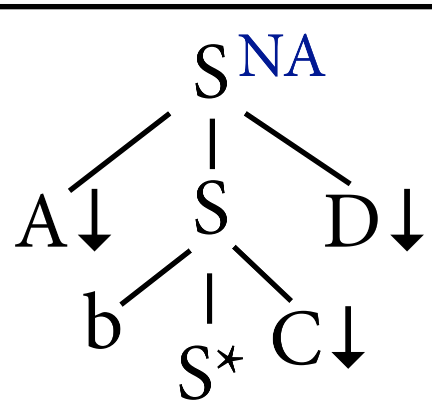
$$S_A \to \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



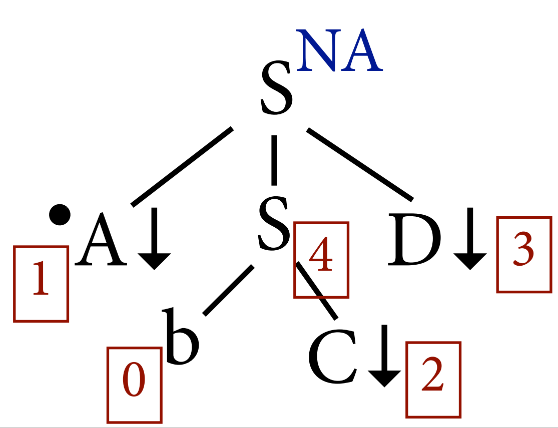
$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$



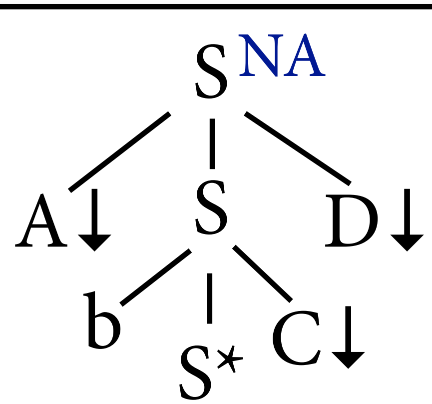
$S_A \to \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



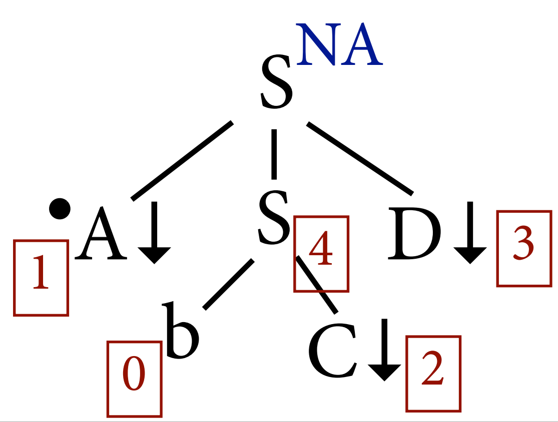
$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$



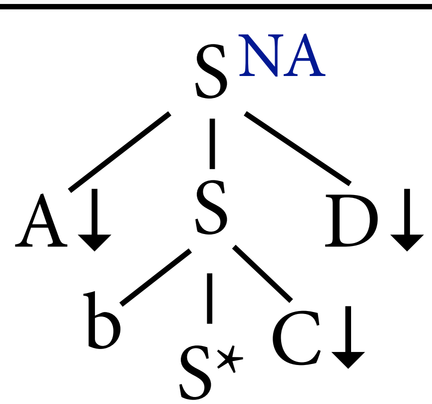
$$S_A \to \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



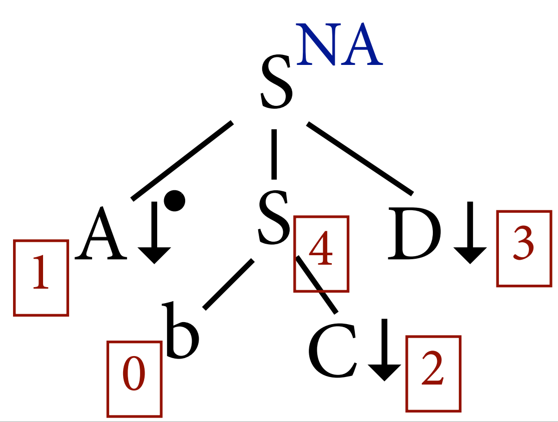
$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1$$



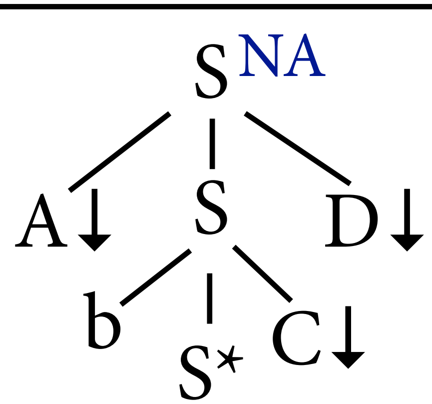
$$S_A \to \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



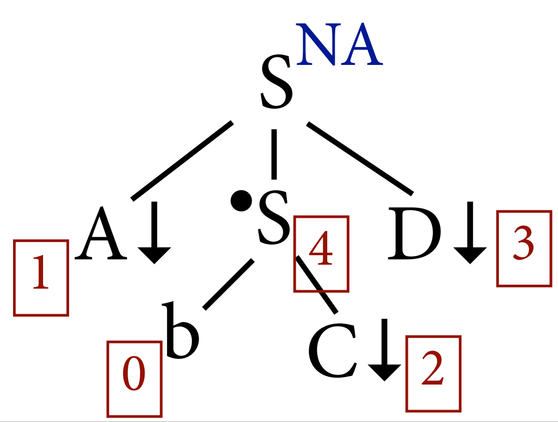
$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1$$



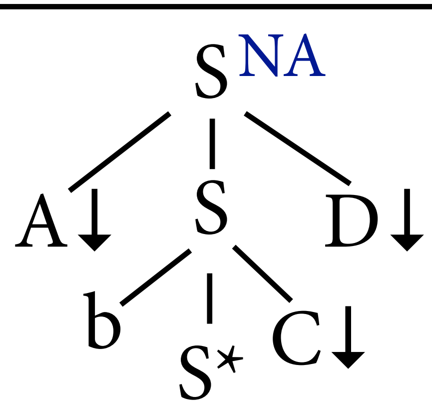
$$S_A \to \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



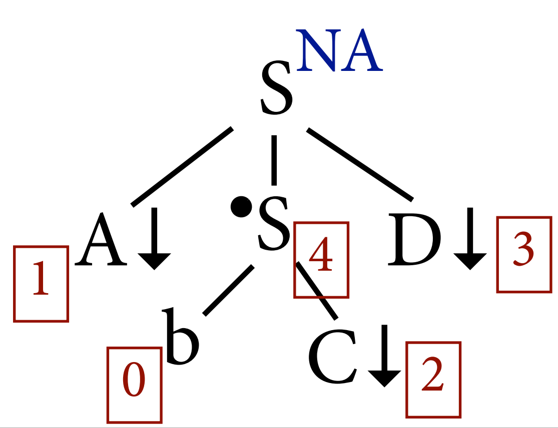
$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1$$



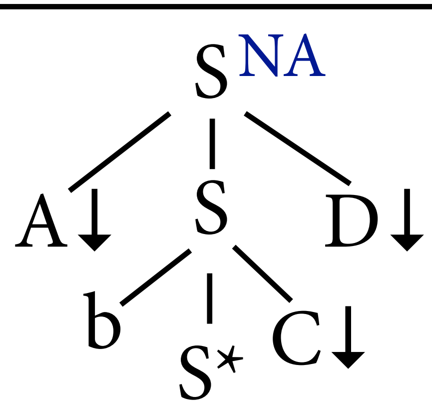
$$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



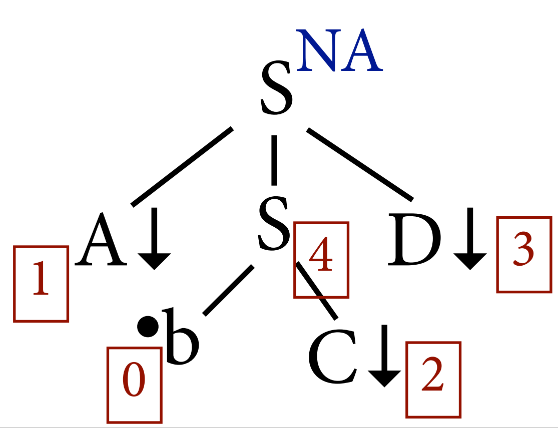
$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4



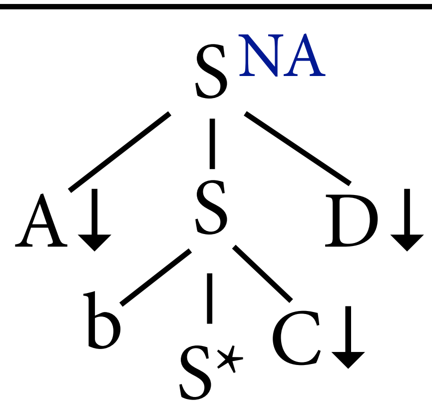
$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



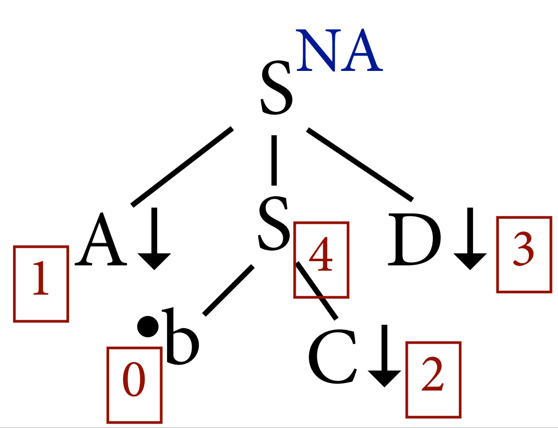
$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4



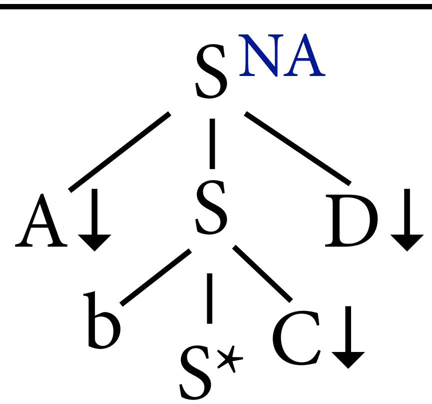
$S_A \to \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



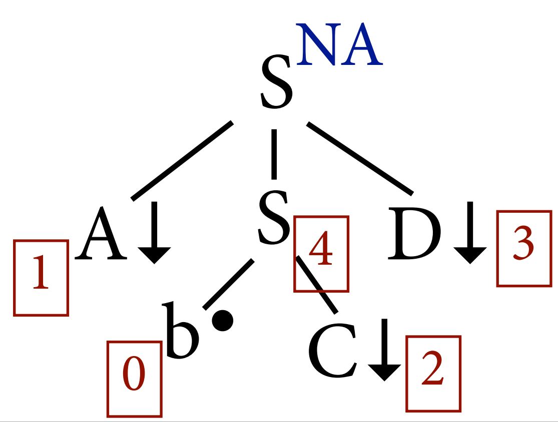
$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0



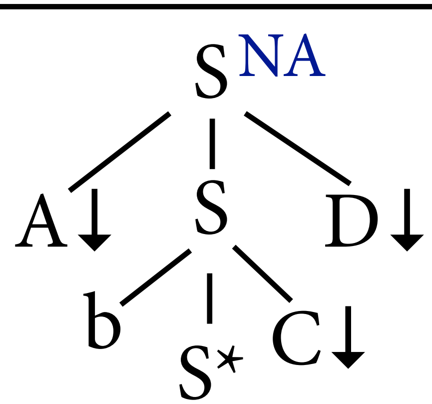
$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



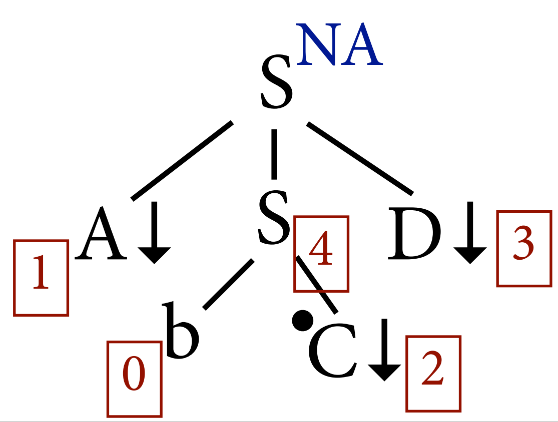
$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0



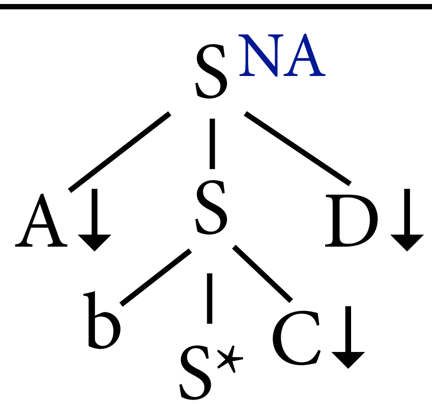
$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



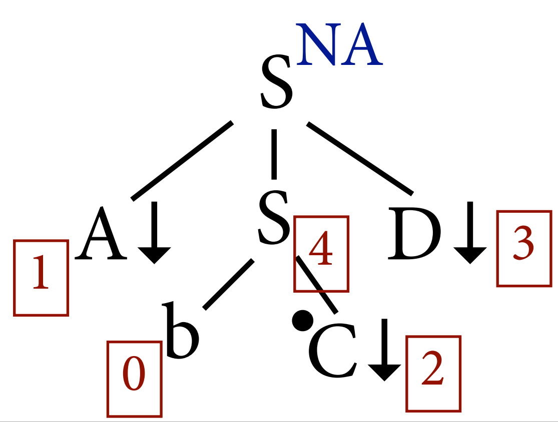
$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0



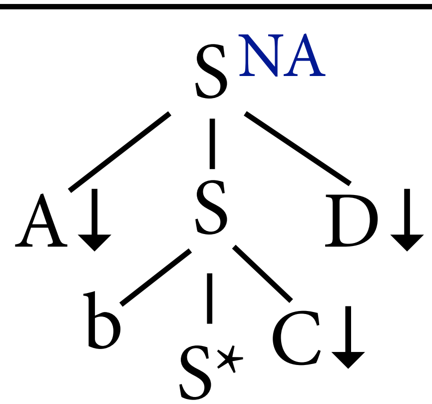
$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



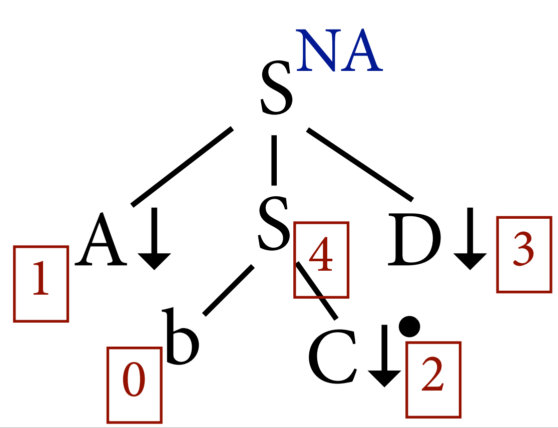
$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 2



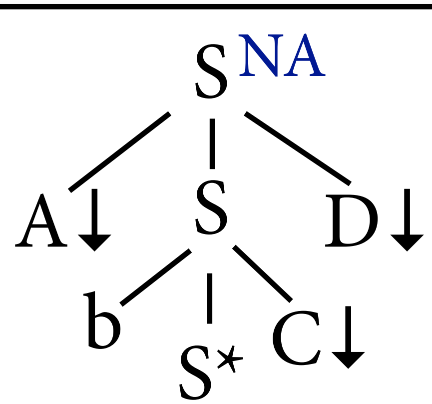
$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



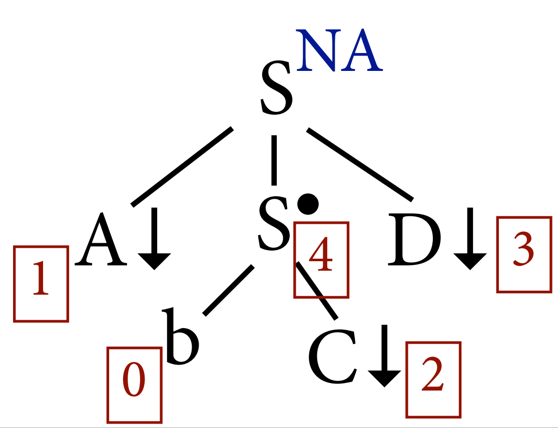
$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 2



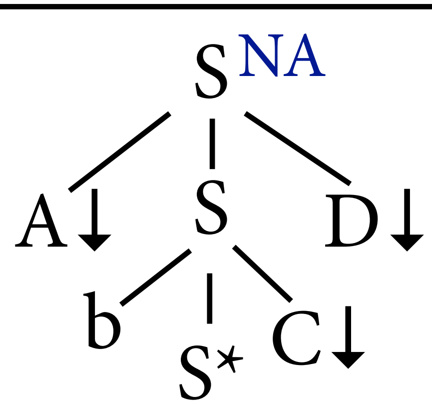
$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



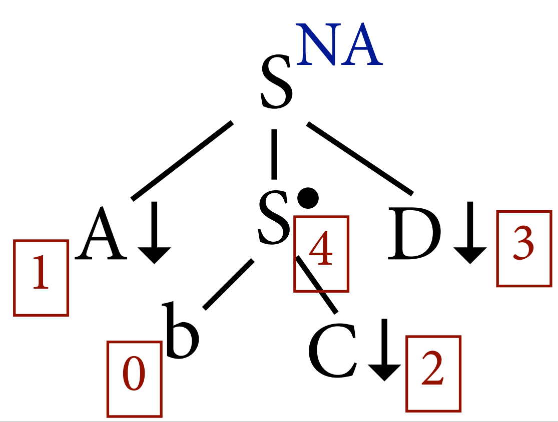
$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2$$



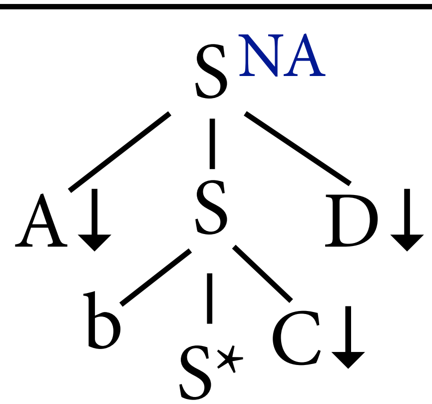
$$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



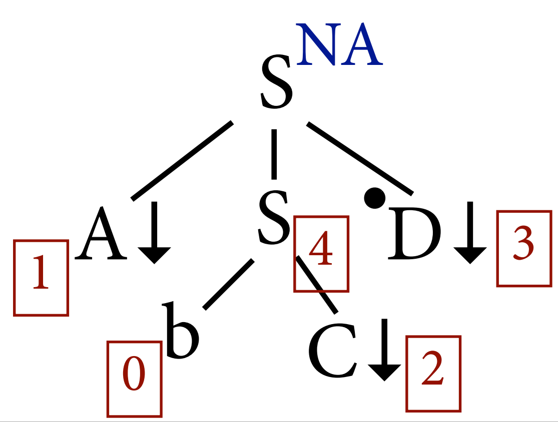
$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4$$



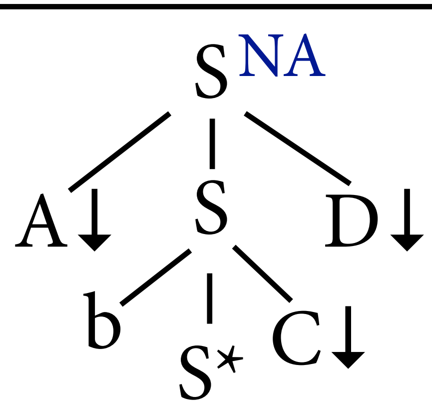
$$S_A \to \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



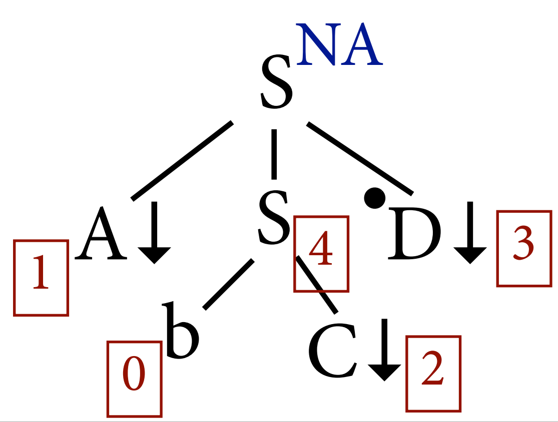
$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 2 4



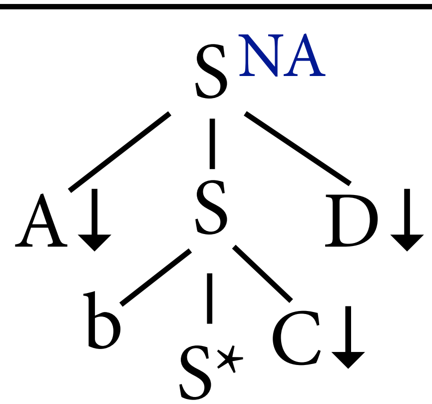
$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



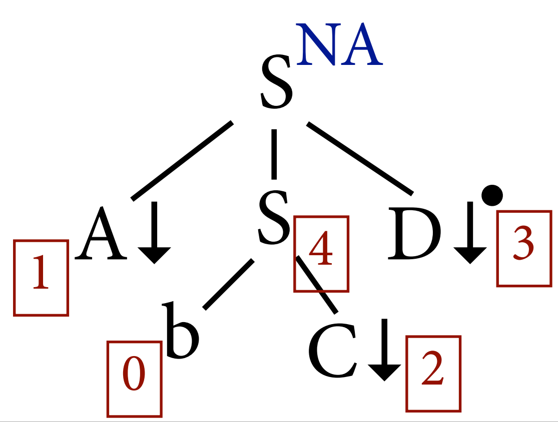
$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 2 4 3



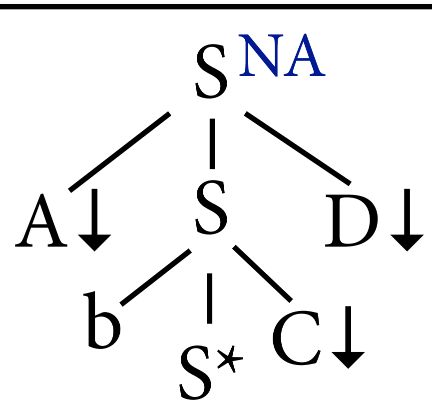
$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



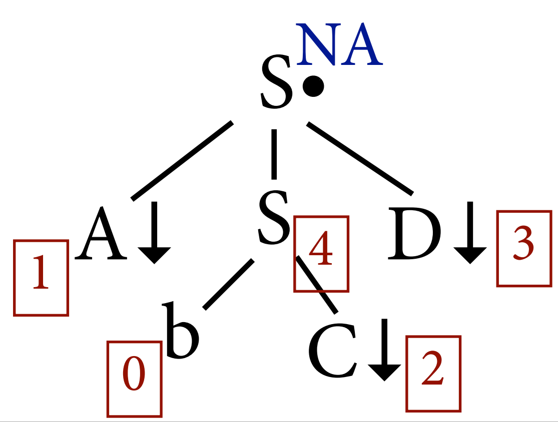
$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \;\; 4 \;\; 0 \;\; 2 \;\; 4 \;\; 3$$



$$S_A \to \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

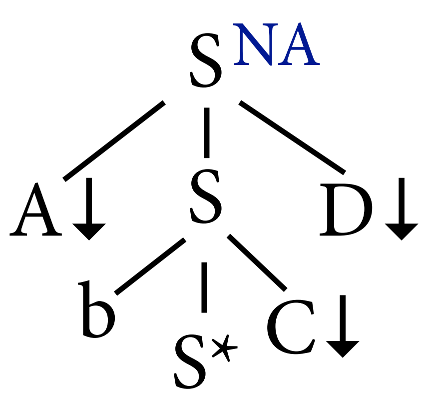
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$

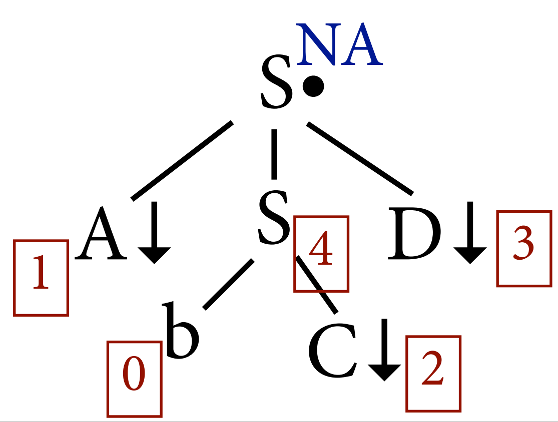
1 4 0 2 4 3



$$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

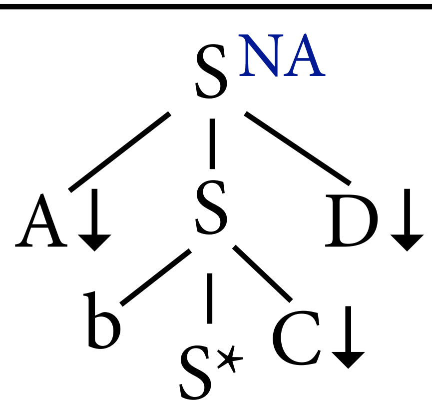
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S},\ \overset{\boxed{2}}{C_S},\ \overset{\boxed{3}}{D_S},\ \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1\ \ 4\ \ 0\ \ 2\ \ 4\ \ 3$$

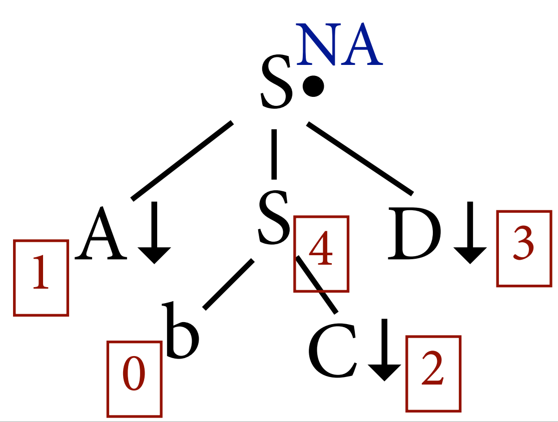
$$S_S \rightarrow \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$$

Ordnungsannotationen für TAG

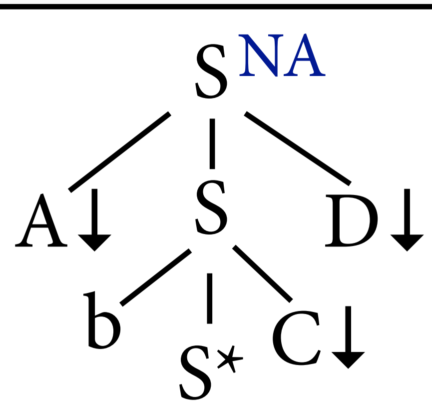
- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$\boxed{1}\quad \boxed{2}\quad \boxed{3}\quad \boxed{4}$

$S_S \rightarrow \alpha_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$ 1 4 0 2 4 3

$S_S \rightarrow <\alpha_1{:}140243>(A_S, C_S, D_S, S_A)$

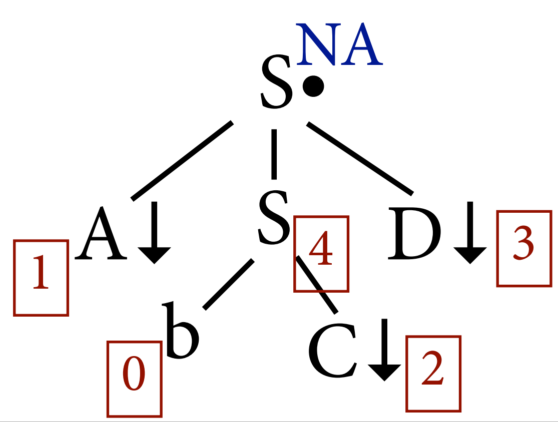


$\boxed{1}\quad \boxed{2}\quad \boxed{3}\quad \boxed{4}$

$S_A \rightarrow \beta_1(A_S, C_S, D_S, S_A)$

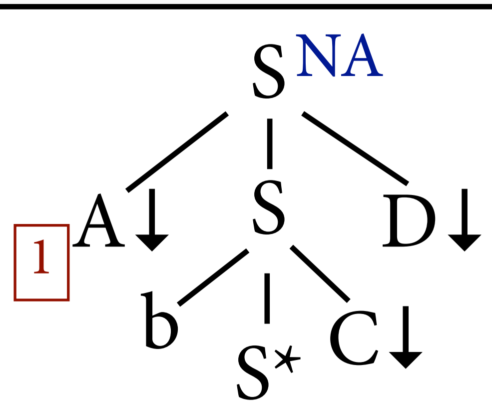
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

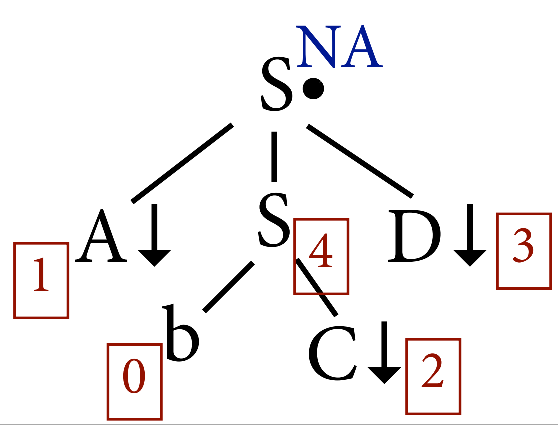
$$S_S \to \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$

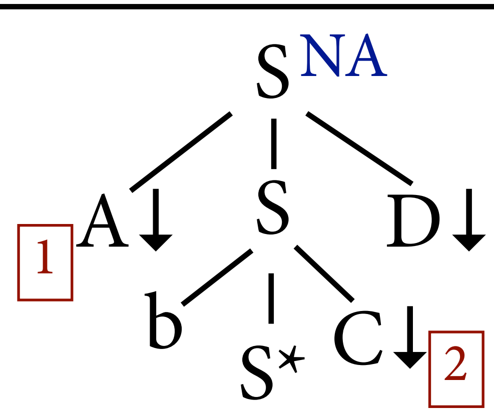
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

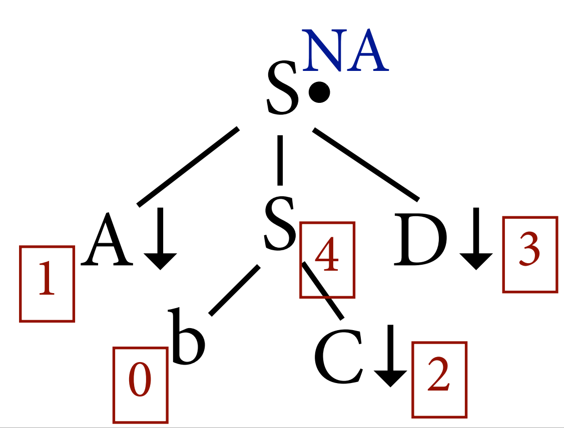
$$S_S \rightarrow \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$

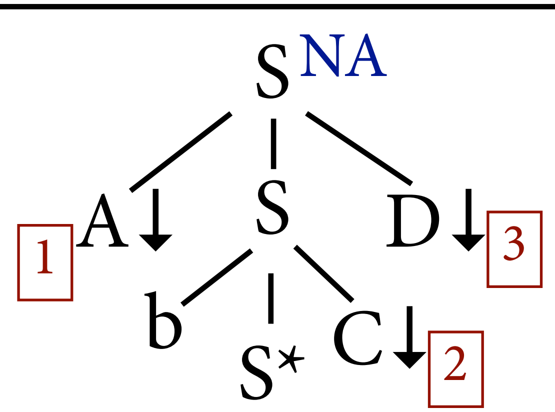
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

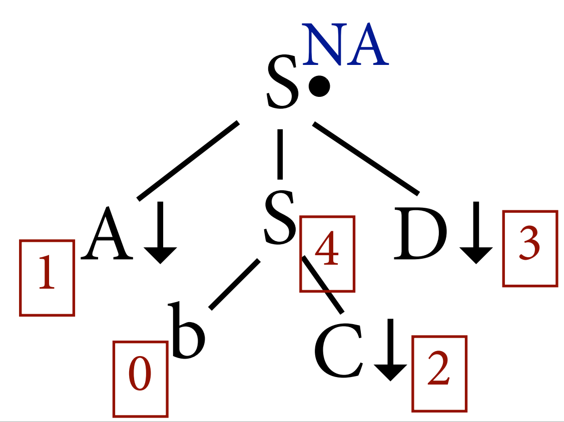
$$S_S \rightarrow \langle \alpha_1{:}140243 \rangle (A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$

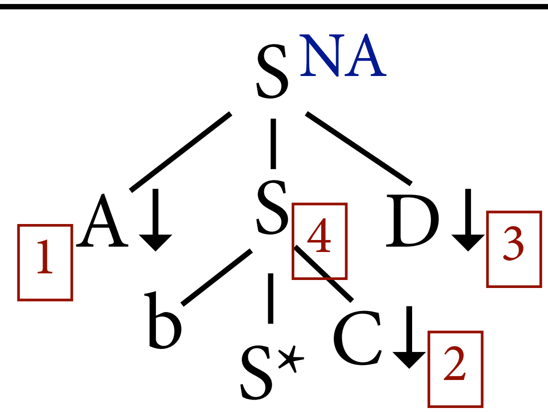
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1\ \ 4\ \ 0\ \ 2\ \ 4\ \ 3$$

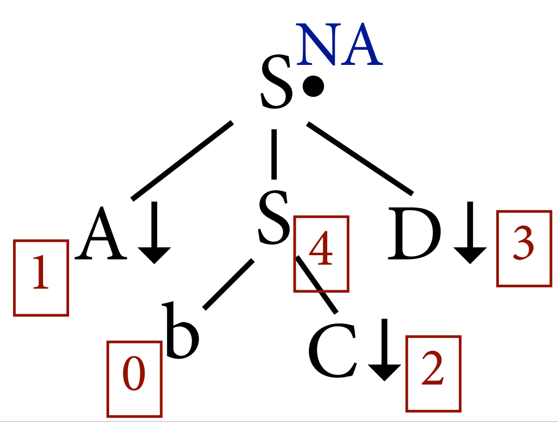
$$S_S \to \langle \alpha_1{:}140243 \rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$

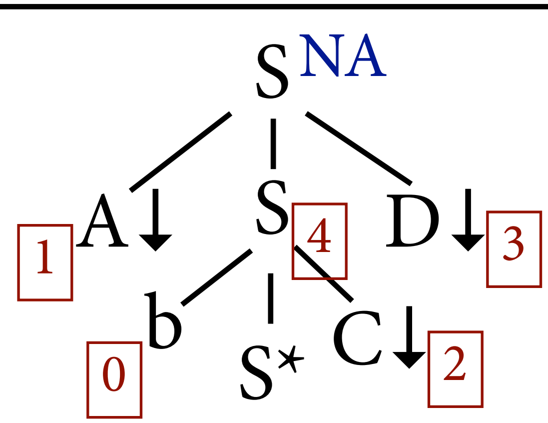
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

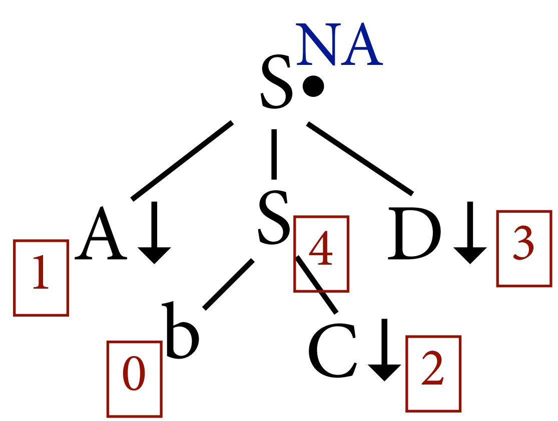
$$S_S \to \langle \alpha_1{:}140243 \rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$

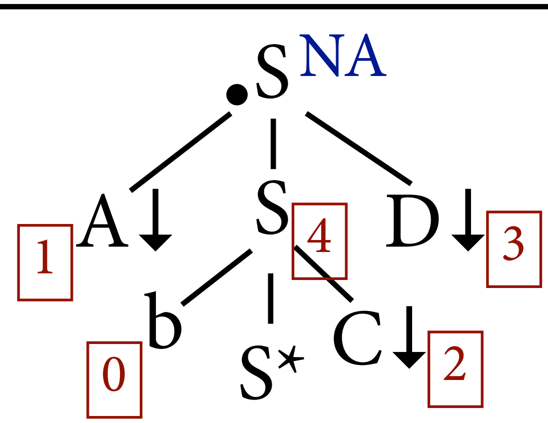
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

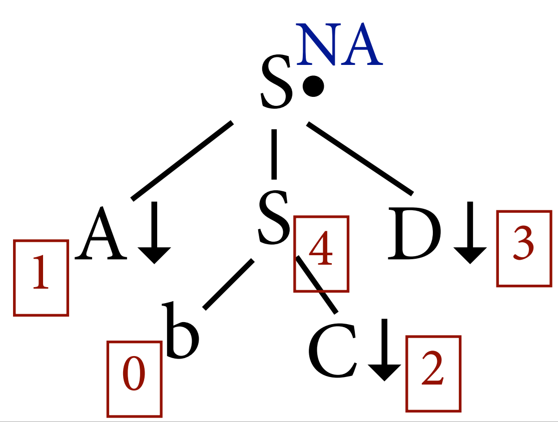
$$S_S \to \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$

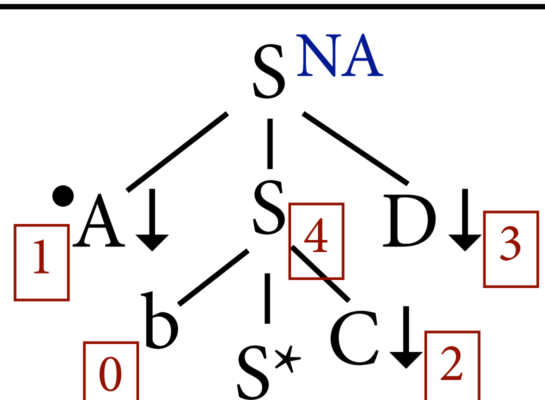
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \;\; 4 \;\; 0 \;\; 2 \;\; 4 \;\; 3$$

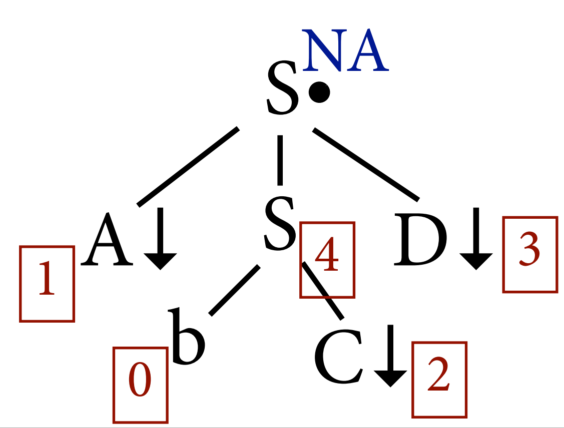
$$S_S \rightarrow \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$$

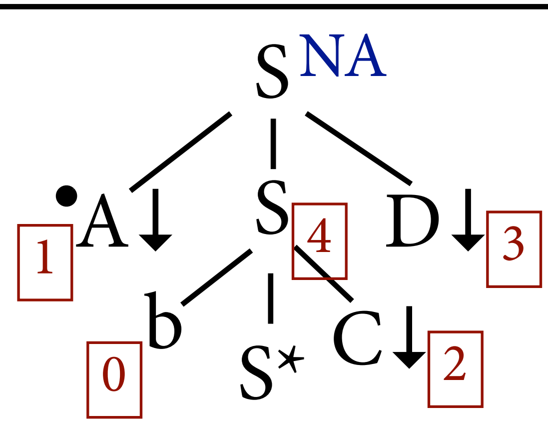
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 2 4 3

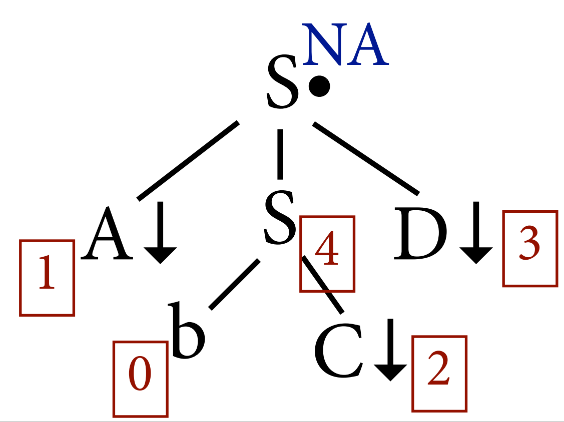
$S_S \to \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$



$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1

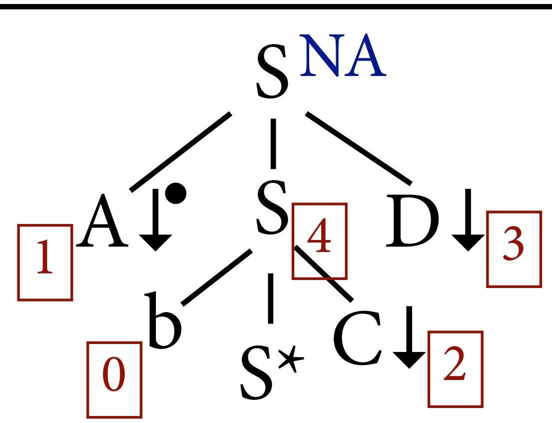
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\underbrace{A_S}_{\boxed{1}}, \underbrace{C_S}_{\boxed{2}}, \underbrace{D_S}_{\boxed{3}}, \underbrace{S_A}_{\boxed{4}}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

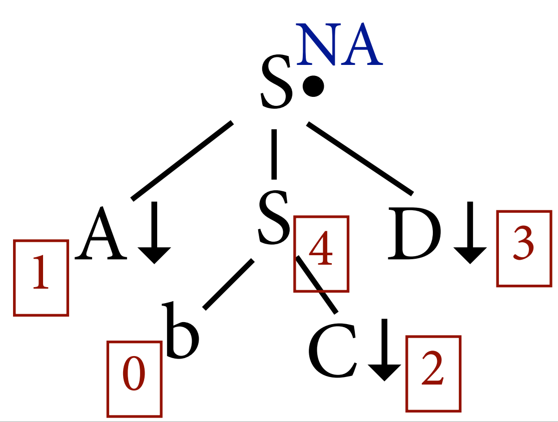
$$S_S \to \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\underbrace{A_S}_{\boxed{1}}, \underbrace{C_S}_{\boxed{2}}, \underbrace{D_S}_{\boxed{3}}, \underbrace{S_A}_{\boxed{4}}) \qquad 1$$

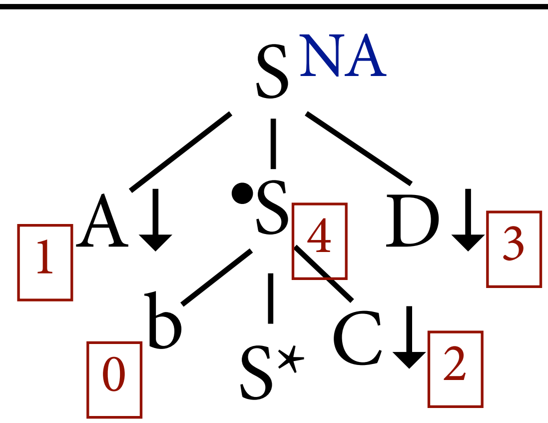
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \;\; 4 \;\; 0 \;\; 2 \;\; 4 \;\; 3$$

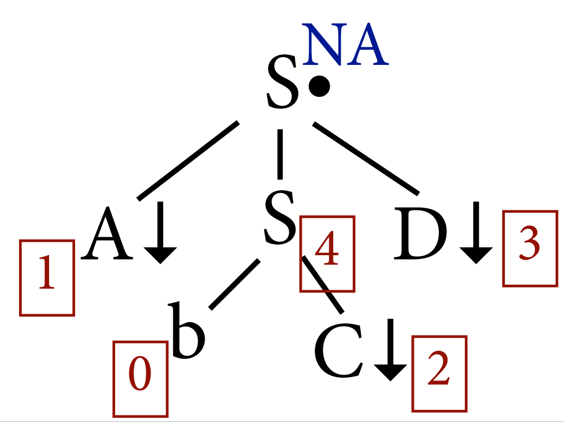
$$S_S \rightarrow \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1$$

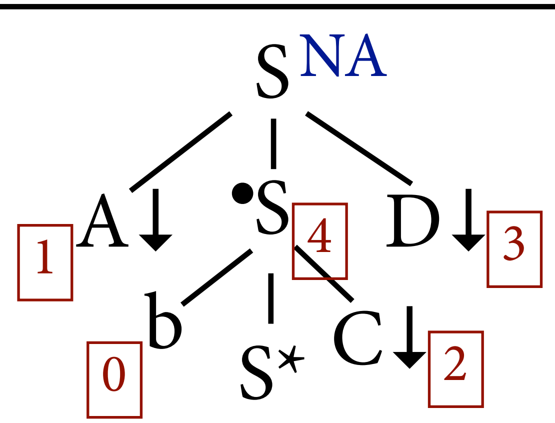
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 2 4 3

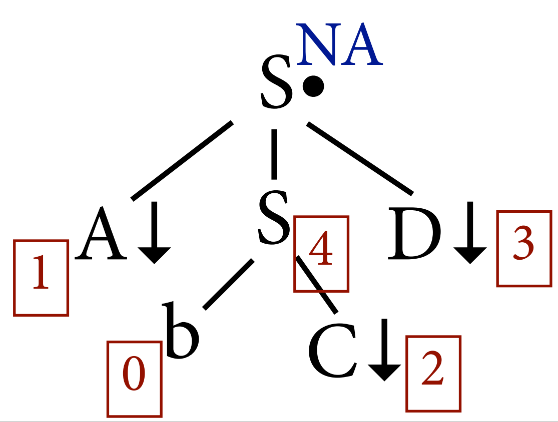
$S_S \to \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$



$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4

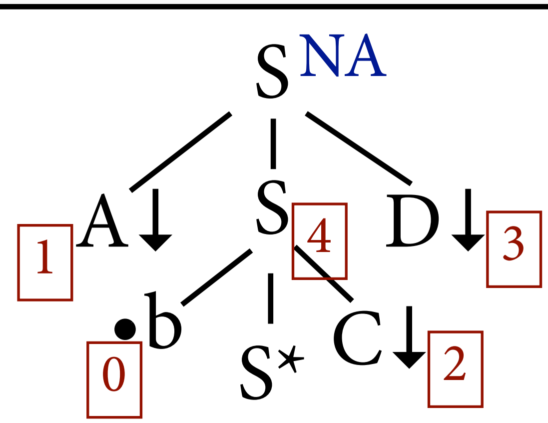
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

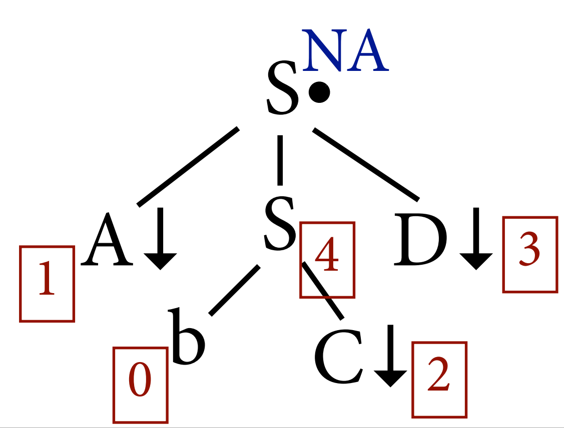
$$S_S \rightarrow \langle \alpha_1{:}140243 \rangle (A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4$$

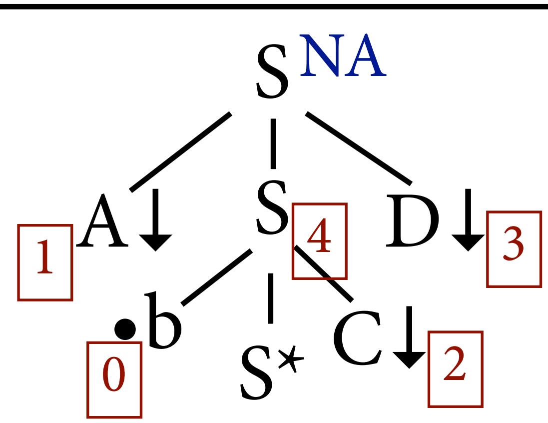
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \;\; 4 \;\; 0 \;\; 2 \;\; 4 \;\; 3$$

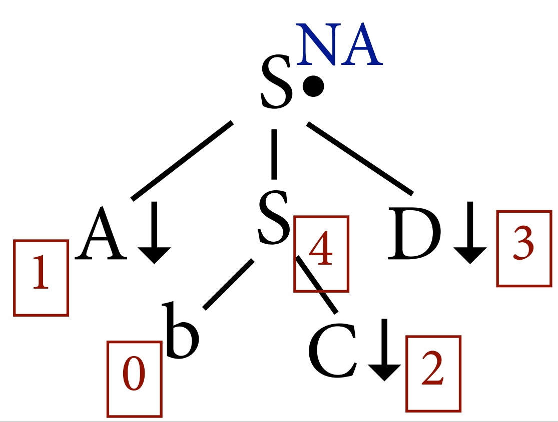
$$S_S \to \langle \alpha_1{:}140243 \rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \;\; 4 \;\; 0$$

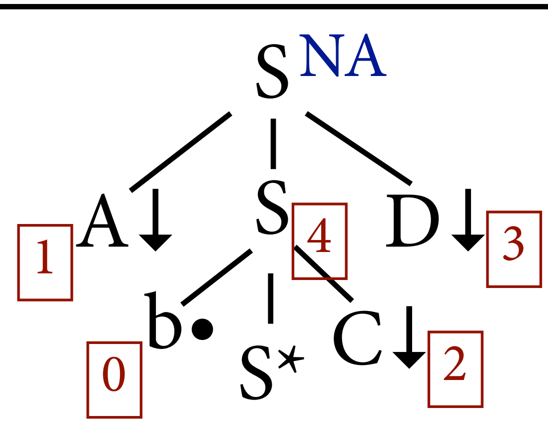
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

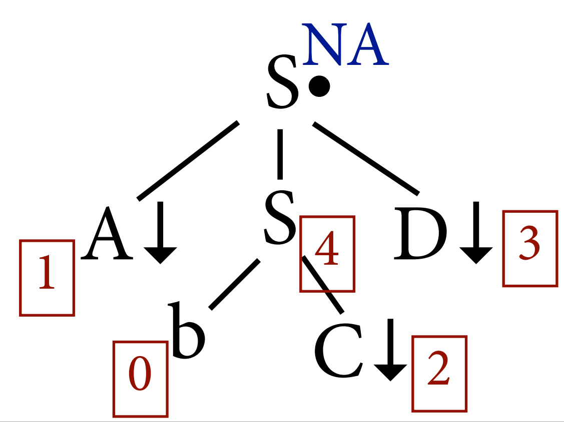
$$S_S \rightarrow \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0$$

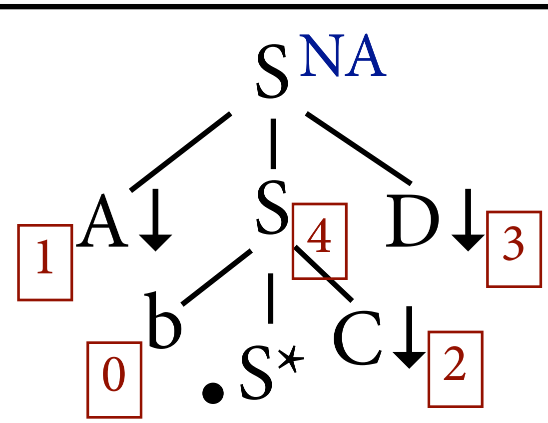
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

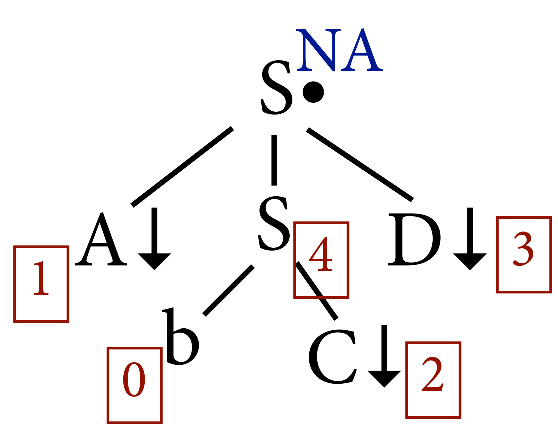
$$S_S \to \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0$$

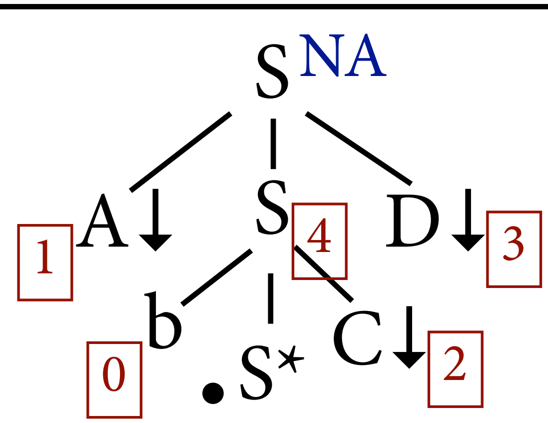
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \;\; 4 \;\; 0 \;\; 2 \;\; 4 \;\; 3$$

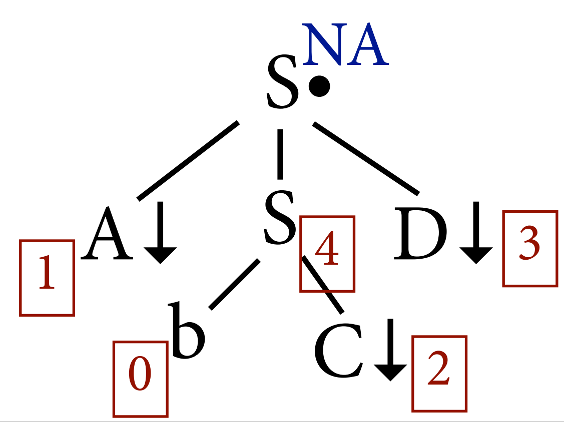
$$S_S \to \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \;\; 4 \;\; 0 \;\; ,$$

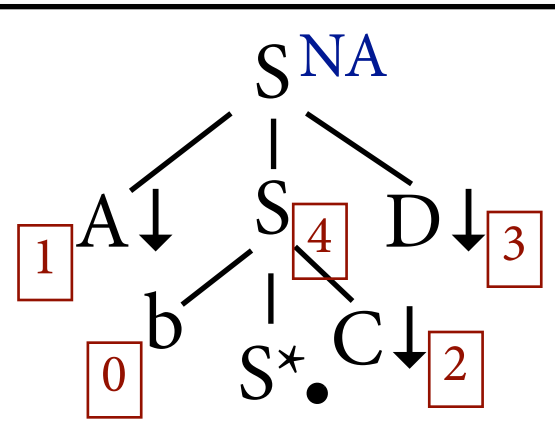
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\boxed{1}A_S, \boxed{2}C_S, \boxed{3}D_S, \boxed{4}S_A) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

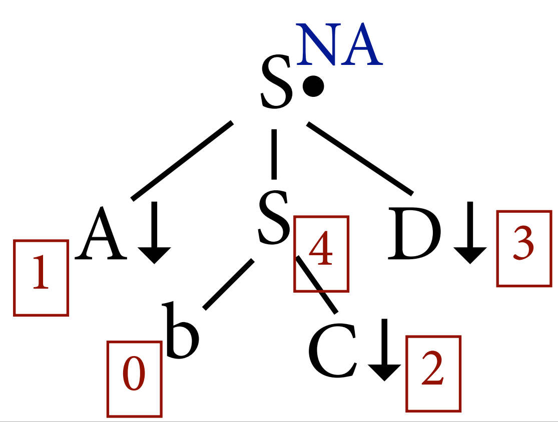
$$S_S \rightarrow \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \rightarrow \beta_1(\boxed{1}A_S, \boxed{2}C_S, \boxed{3}D_S, \boxed{4}S_A) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad ,$$

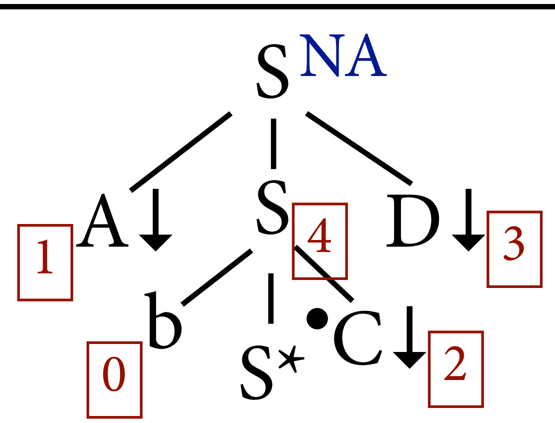
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

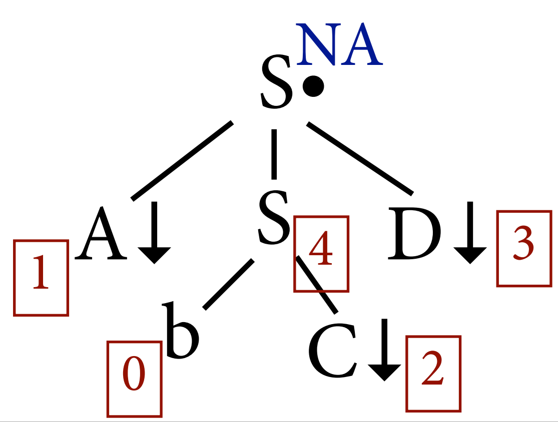
$$S_S \rightarrow \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad ,$$

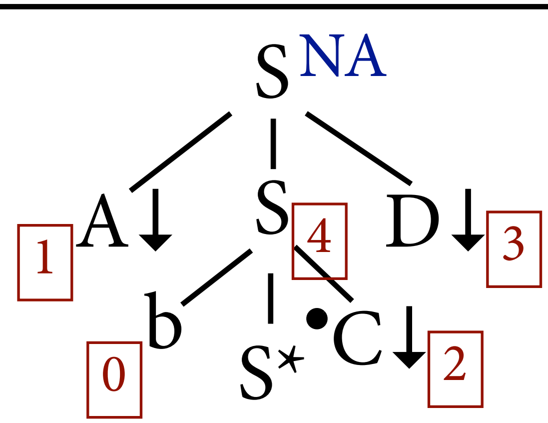
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

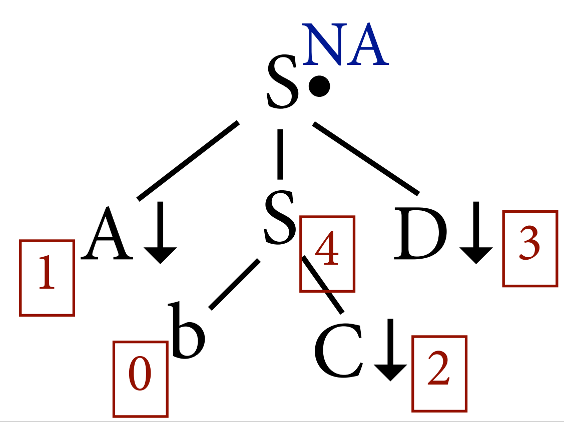
$$S_S \to \langle \alpha_1{:}140243 \rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad , \quad 2$$

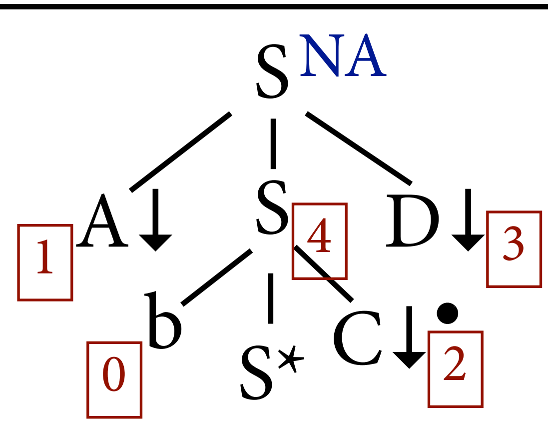
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 2 4 3

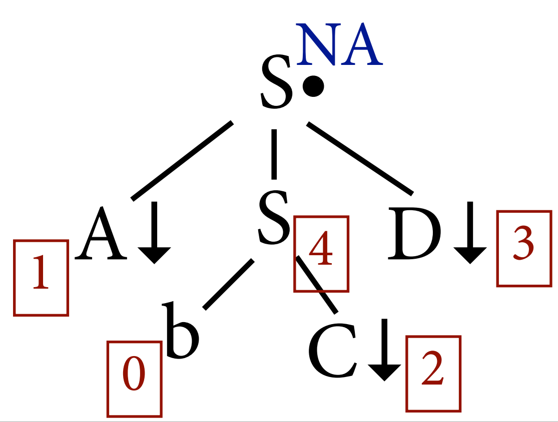
$S_S \rightarrow \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$



$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 , 2

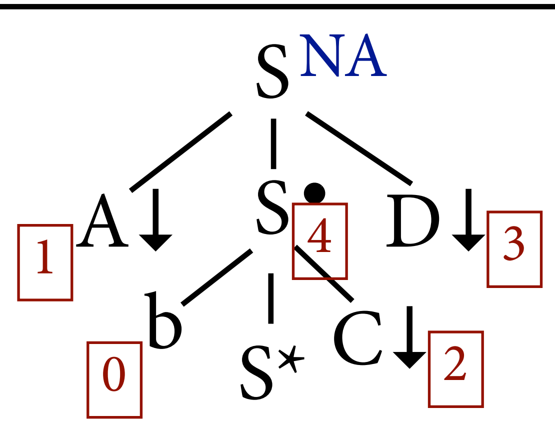
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1\ \ 4\ \ 0\ \ 2\ \ 4\ \ 3$$

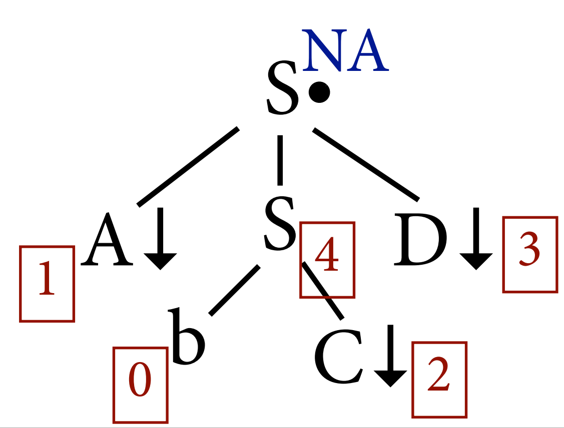
$$S_S \to \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1\ \ 4\ \ 0\ \ ,\ \ 2$$

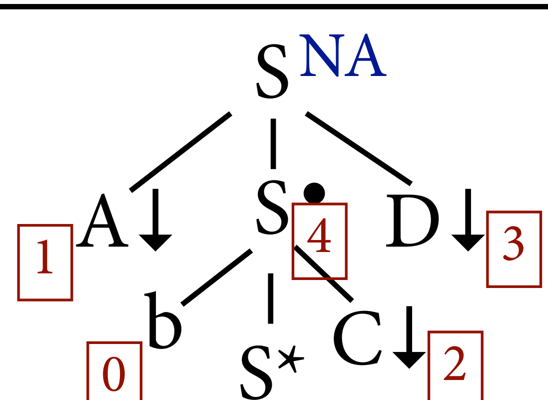
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

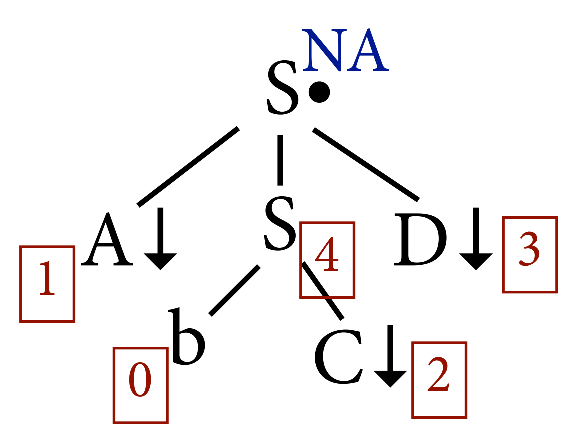
$$S_S \to \langle \alpha_1{:}140243 \rangle (A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad , \quad 2 \quad 4$$

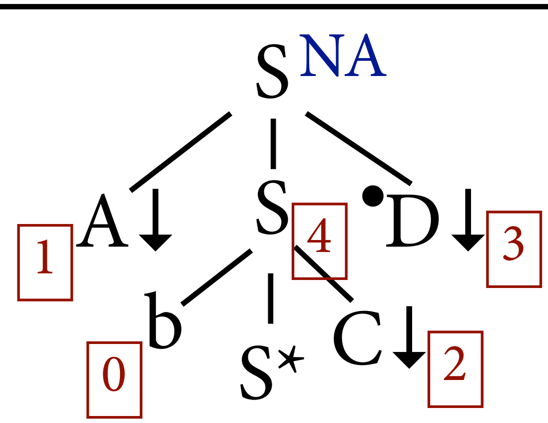
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 3$$

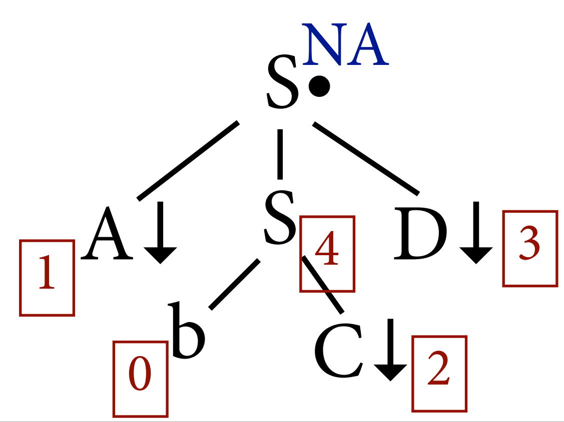
$$S_S \to \langle \alpha_1{:}140243 \rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \quad 4 \quad 0 \quad , \quad 2 \quad 4$$

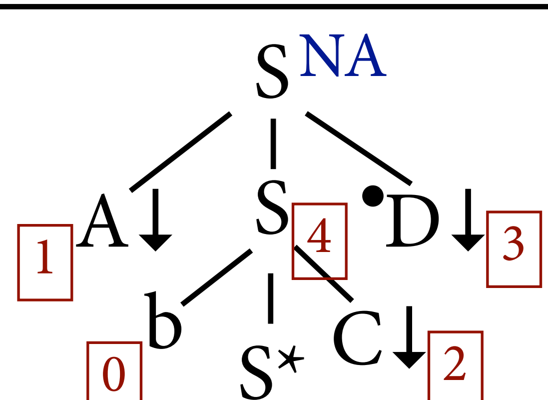
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 2 4 3

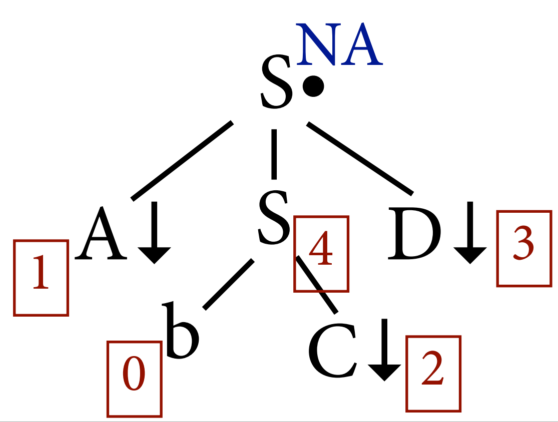
$S_S \rightarrow \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$



$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 , 2 4 3

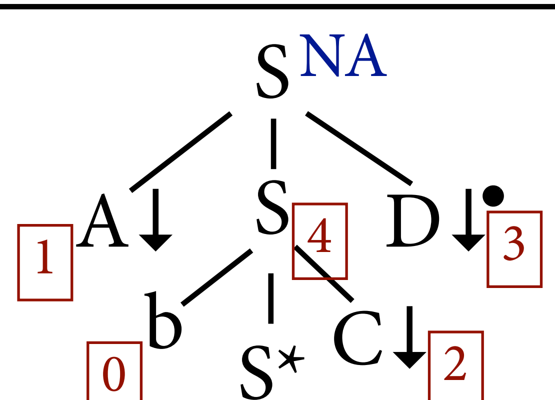
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1\ \ 4\ \ 0\ \ 2\ \ 4\ \ 3$$

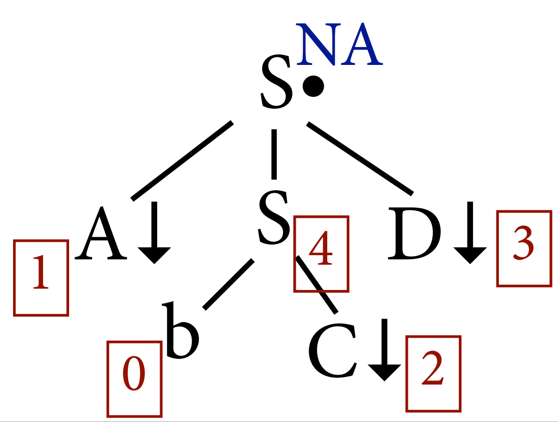
$$S_S \rightarrow \langle\alpha_1{:}140243\rangle(A_S, C_S, D_S, S_A)$$



$$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1\ \ 4\ \ 0\ \ ,\ \ 2\ \ 4\ \ 3$$

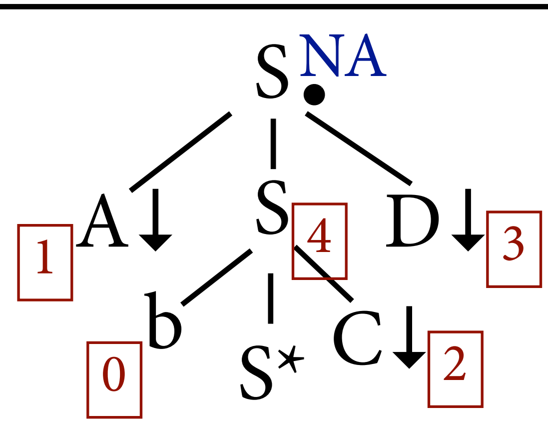
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$S_S \to \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 2 4 3

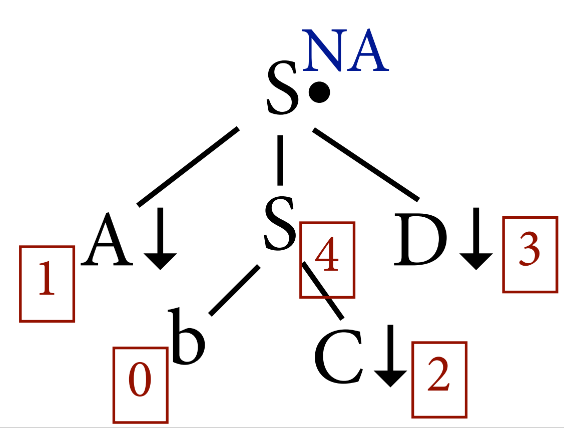
$S_S \to <\alpha_1{:}140243>(A_S, C_S, D_S, S_A)$



$S_A \to \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A})$ 1 4 0 , 2 4 3

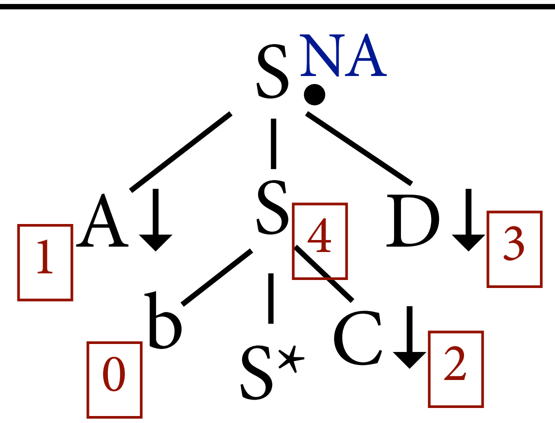
Ordnungsannotationen für TAG

- Tiefensuche durch jeden Elementarbaum:
  - Besuch von Substitutionsknoten → OA
  - Besuch + Verlassen von Knoten, an denen adjungiert werden kann → OA
  - Besuch von Anker → 0; von Fußknoten → Komma in OA



$$S_S \rightarrow \alpha_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \;\; 4 \;\; 0 \;\; 2 \;\; 4 \;\; 3$$

$$S_S \rightarrow \langle \alpha_1{:}140243 \rangle (A_S, C_S, D_S, S_A)$$

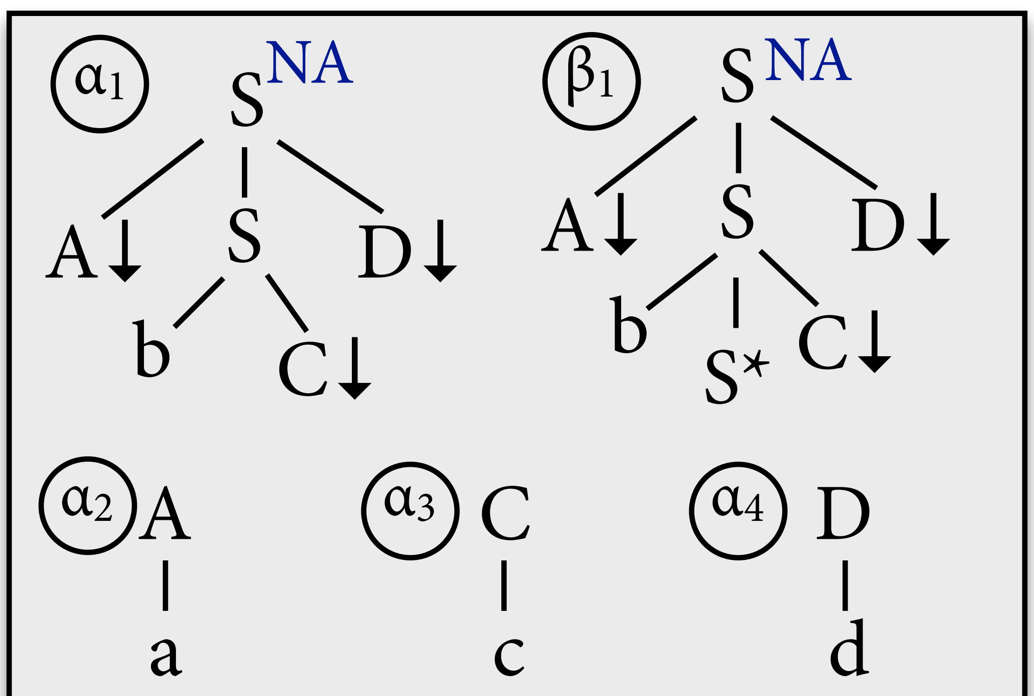


$$S_A \rightarrow \beta_1(\overset{\boxed{1}}{A_S}, \overset{\boxed{2}}{C_S}, \overset{\boxed{3}}{D_S}, \overset{\boxed{4}}{S_A}) \qquad 1 \;\; 4 \;\; 0 \;\; , \;\; 2 \;\; 4 \;\; 3$$

$$S_A \rightarrow \langle \beta_1{:}\ 140{,}243 \rangle (A_S, C_S, D_S, S_A)$$

LTAG → RDG: Grammatiken

- Auf diese Weise OAen an jede Regel:
  - Initialbäume/Substitution: Blockgrad 1
  - Auxiliarbäume/Adjunktion: Blockgrad 2
  - Adjunktion ist optional, daher Varianten mit und ohne Adjunktion an jedem Knoten, z.B. 140243 und 1023.



LTAG-Grammatik

$S_S \rightarrow \langle \alpha_1{:}140243 \rangle (A_S, C_S, D_S, S_A)$

$S_S \rightarrow \langle \alpha_1{:}1023 \rangle (A_S, C_S, D_S)$

$S_A \rightarrow \langle \beta_1{:}140,243 \rangle (A_S, C_S, D_S, S_A)$

$S_A \rightarrow \langle \beta_1{:}10,23 \rangle (A_S, C_S, D_S)$

$A_S \rightarrow \langle \alpha_2{:}0 \rangle$ $\quad$ $C_S \rightarrow \langle \alpha_3{:}0 \rangle$

$D_S \rightarrow \langle \alpha_4{:}0 \rangle$

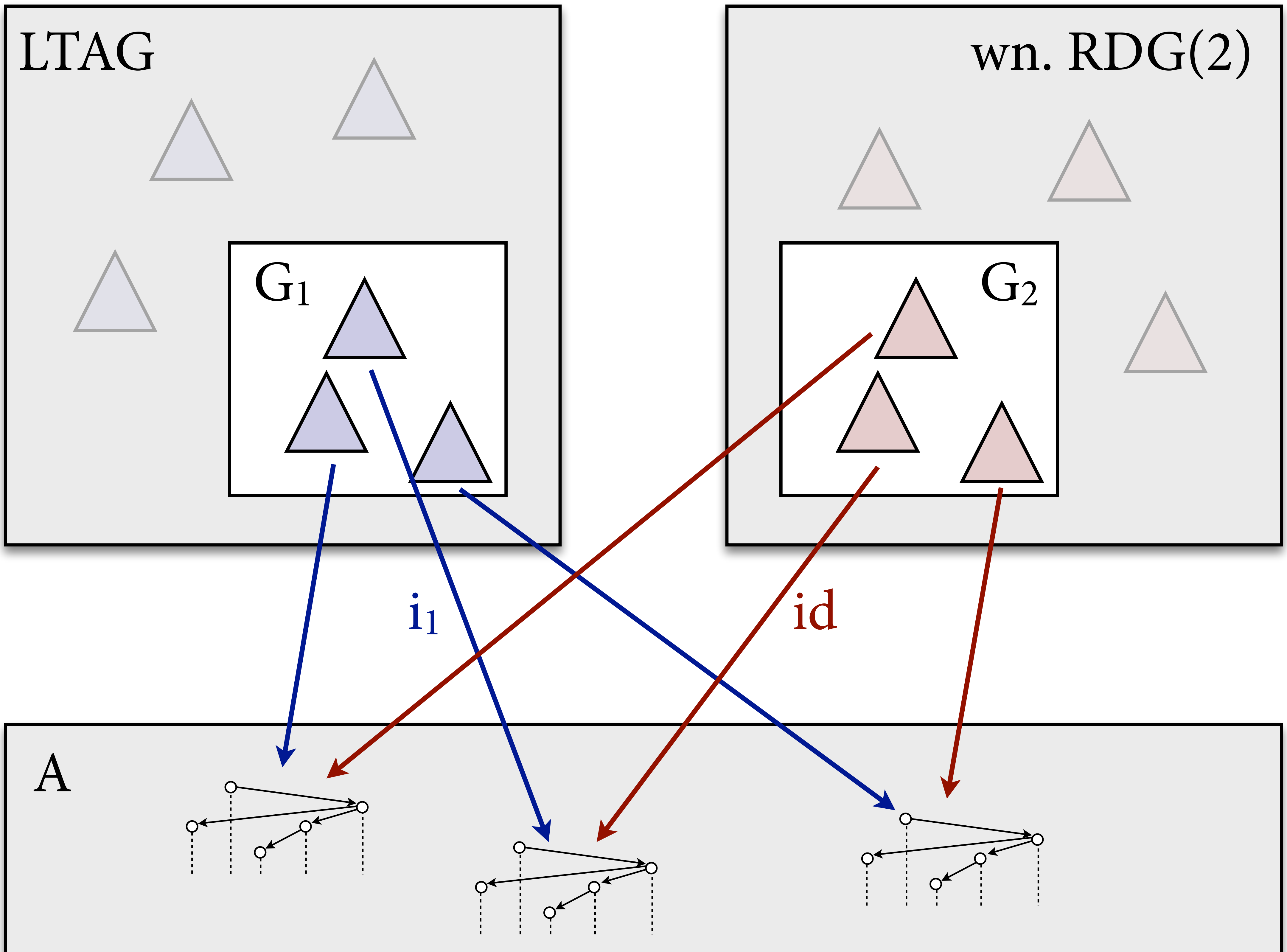
RDG-Grammatik

LTAG → RDG

- Kann jede LTAG-Grammatik in stark äquivalente RDG-Grammatik übersetzen.
  - RDG ist nicht unbedingt projektiv.
  - Ordnungsannotationen haben höchstens Blockgrad 2.
  - Außerdem *wohlgeschachtelt (well-nested, wn.):*
    OAen enthalten niemals Substring der Form i ... j ... i ... j

- Umgekehrt jede wohlgeschachtelte RDG-Grammatik von Blockgrad ≤ 2 in LTAG übersetzbar
  ⇒ starke Äquivalenz.

Äquivalenz bzgl. Dependenzstrukturen



Expressivität von RDG

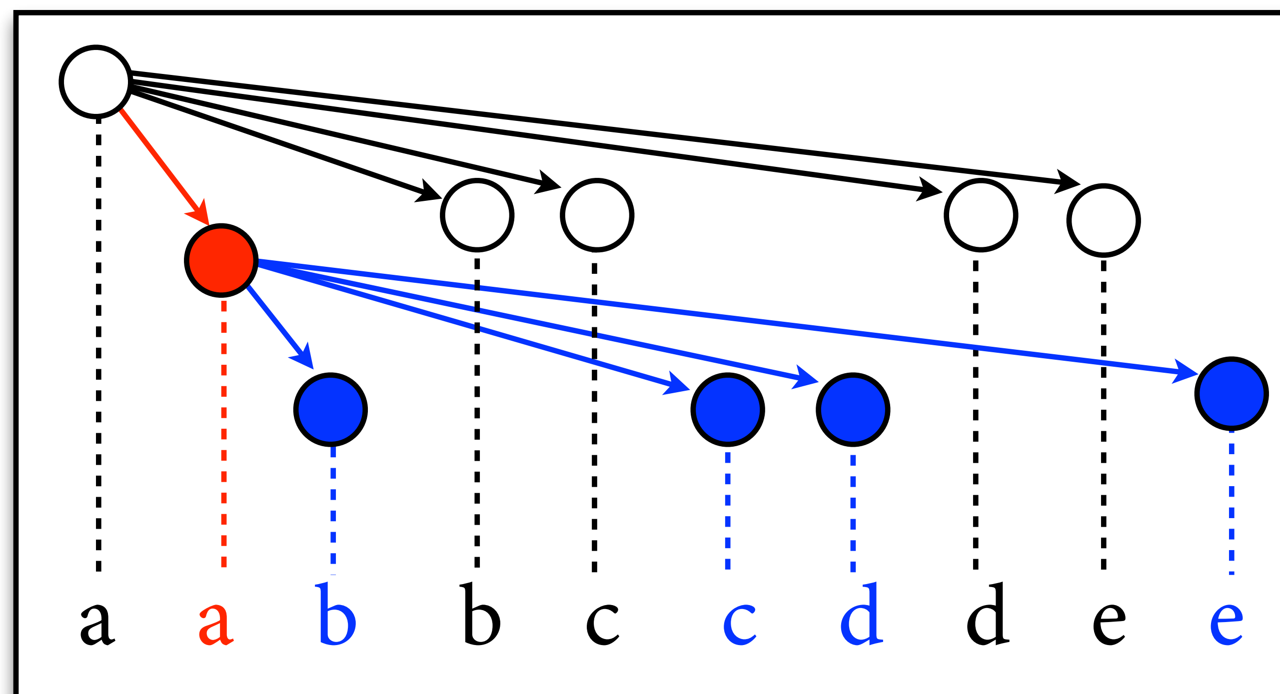
- Betrachte Stringsprachen für RDGen mit verschiedenem Blockgrad.
  - Sei RDL(k) die Klasse der Stringsprachen, die man mit RDGen von Blockgrad $\leq$ k darstellen kann.
  - RDL(1) = kontextfreie Sprachen
  - RDL(2) (+ wohlgeschachtelt) = TAG-Sprachen

- Was passiert bei höherem Blockgrad?

Expressivität

- RDG von Blockgrad k kann die Sprache COUNT(2k), aber nicht COUNT(2k + 1) darstellen.

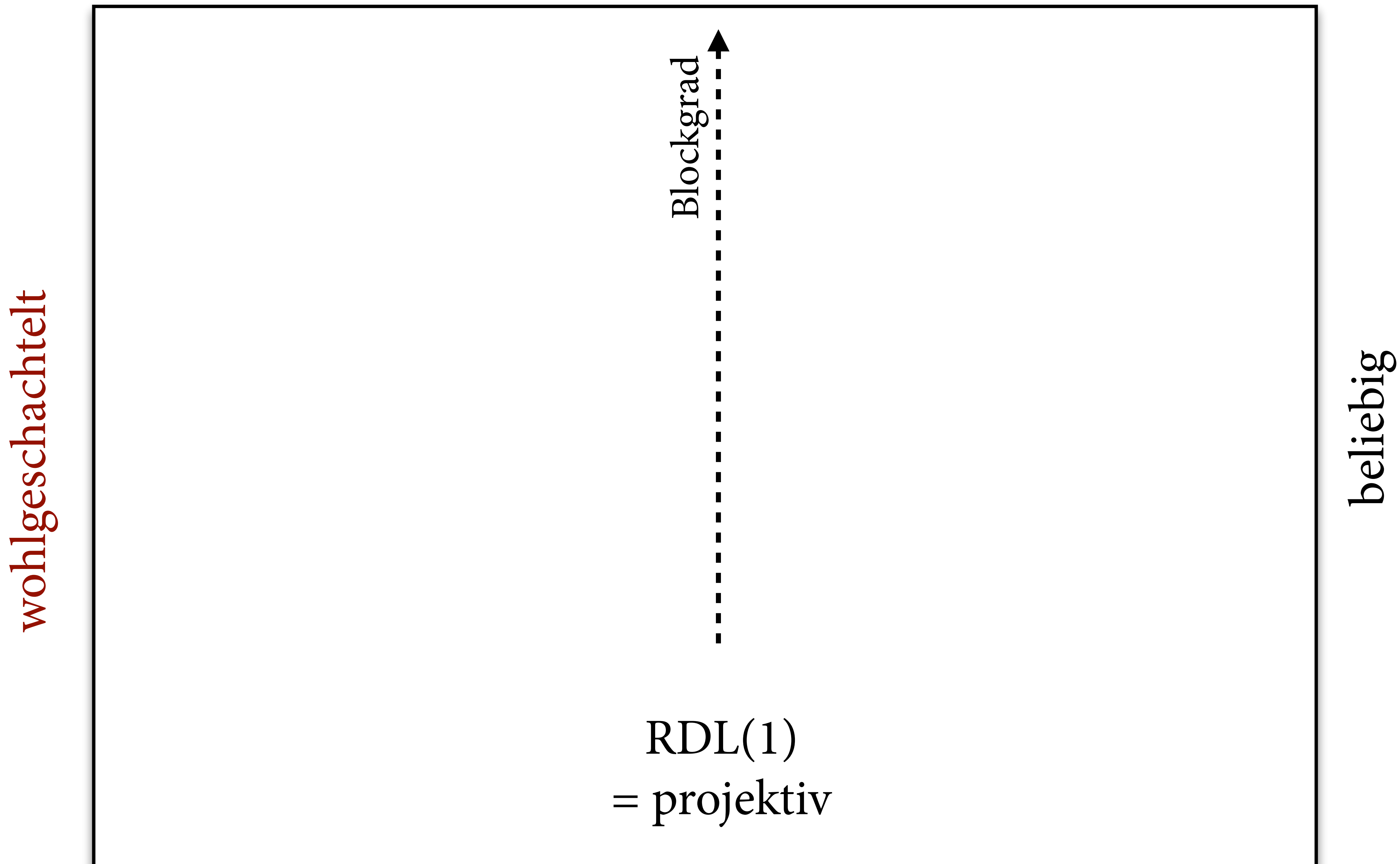
A → <a:01231451>(A, B, C, D, E)
A → <a:012,314,51>(A, B, C, D, E)
A → <a:01,23,4>(B, C, D, E)
B → <b:0> C → <c:0>
D → <d:0> E → <e:0>



RDG von Blockgrad 3 für COUNT(5)

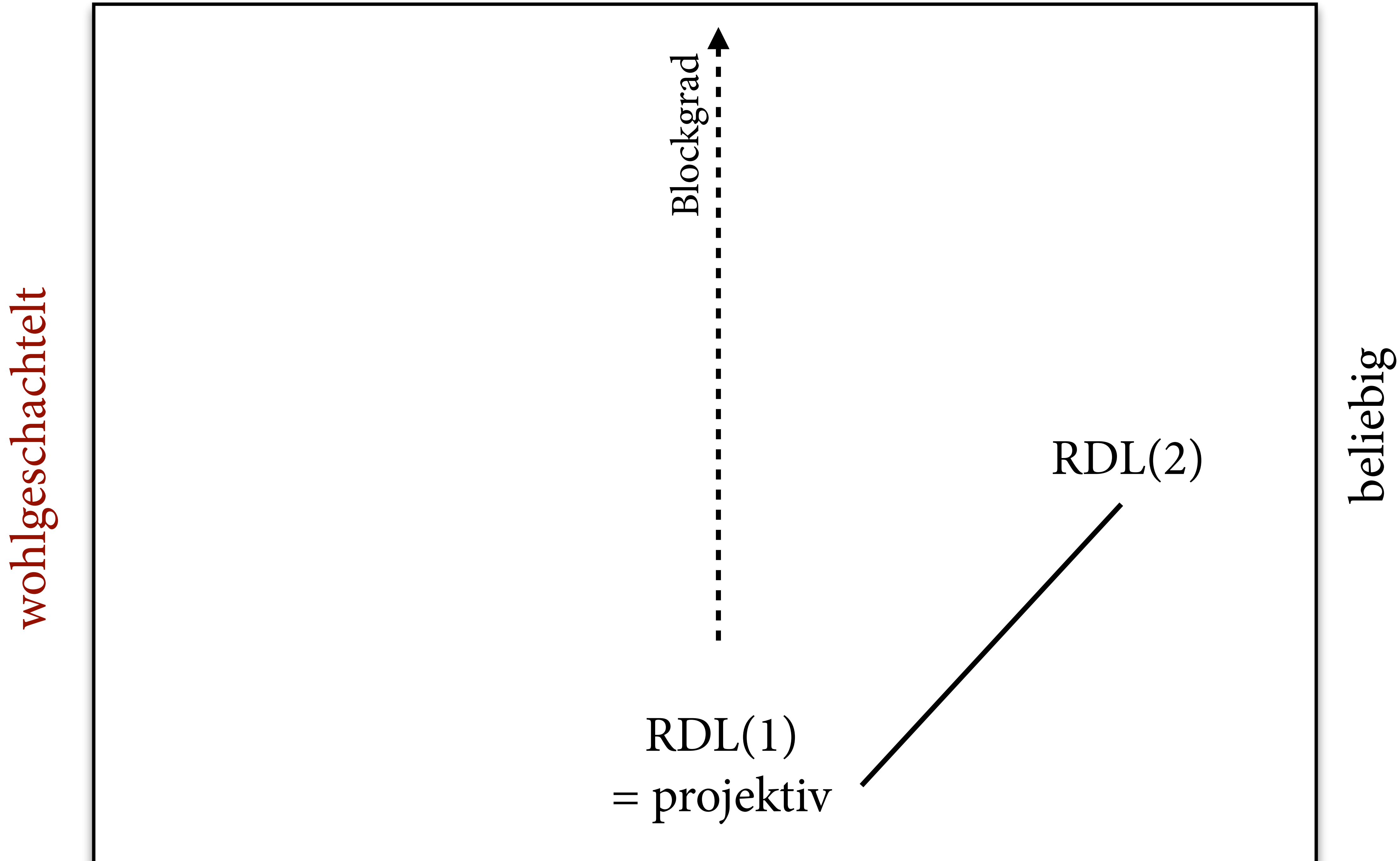
(Ich zeige aus Platzgründen nur COUNT(5), aber COUNT(6) geht genauso.)

Hierarchie von Sprachen



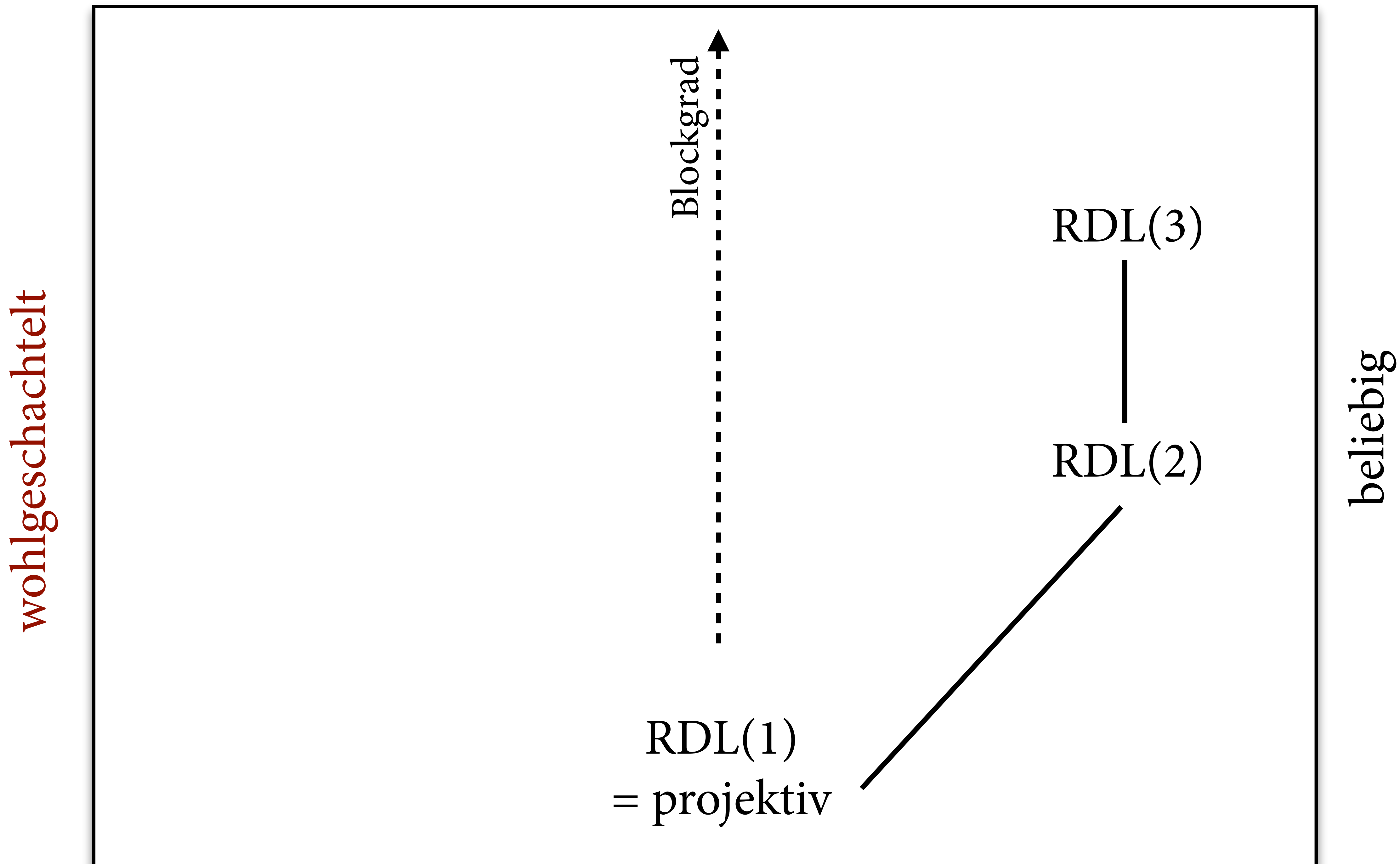
Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Hierarchie von Sprachen



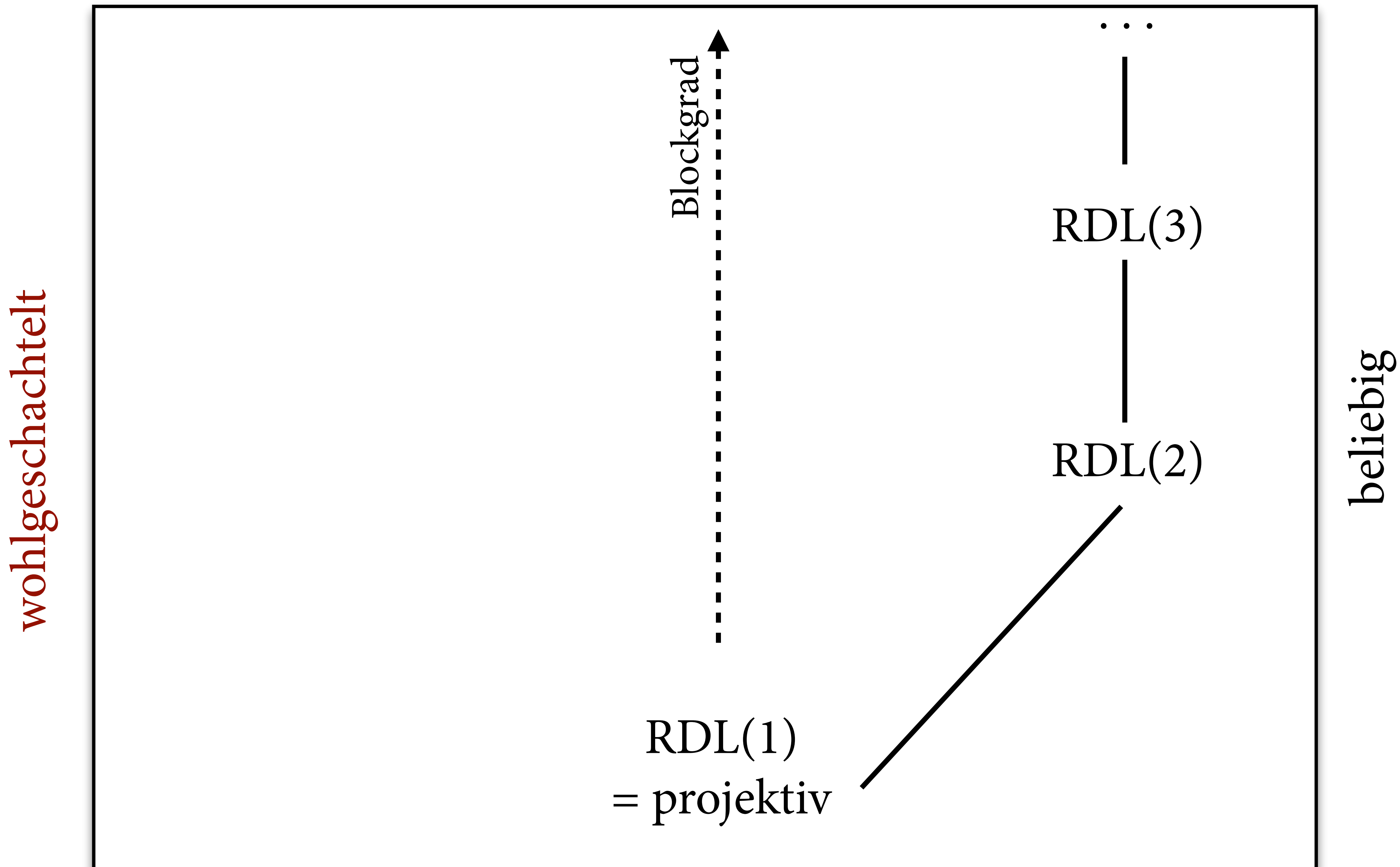
Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Hierarchie von Sprachen



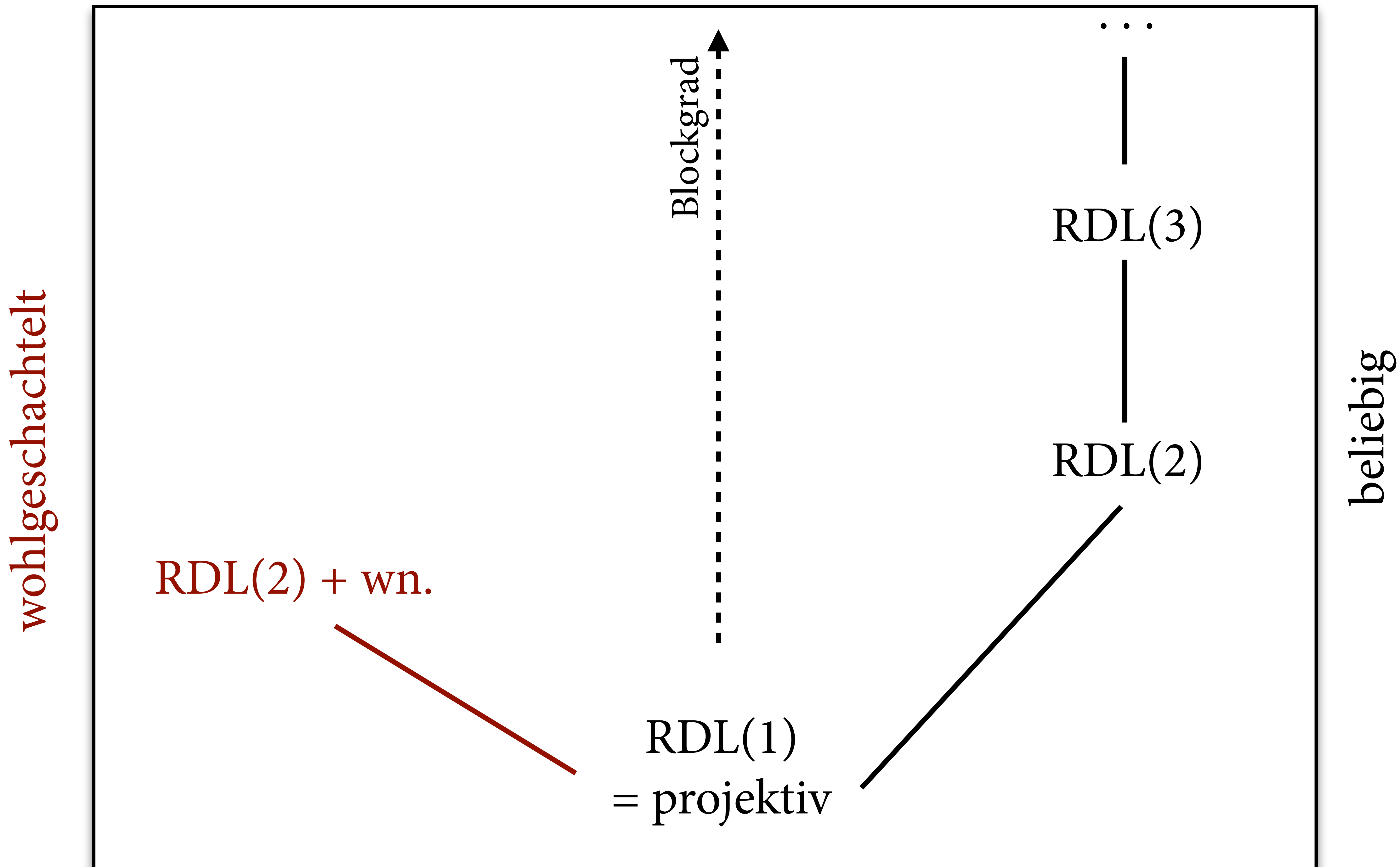
Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Hierarchie von Sprachen



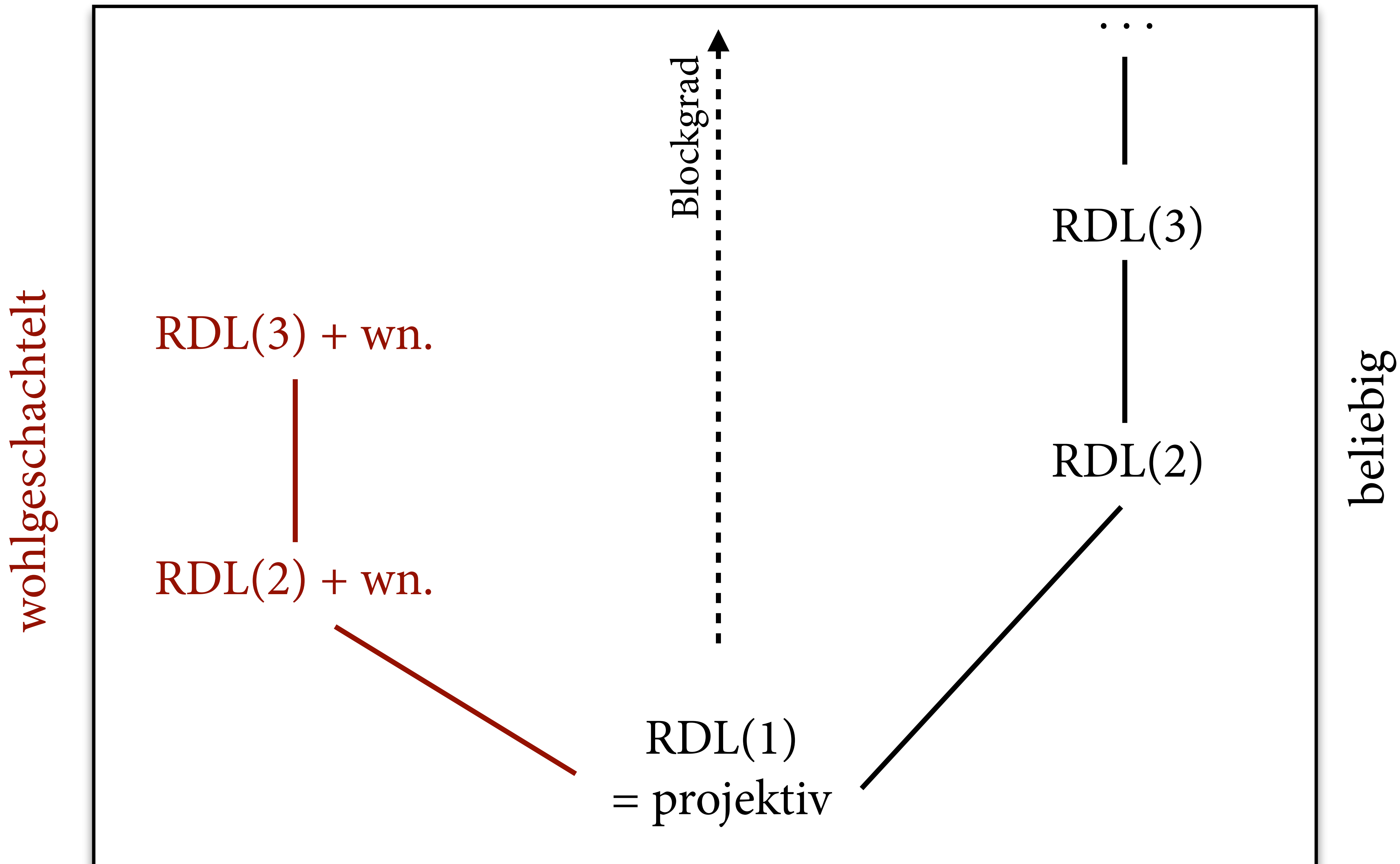
Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Hierarchie von Sprachen



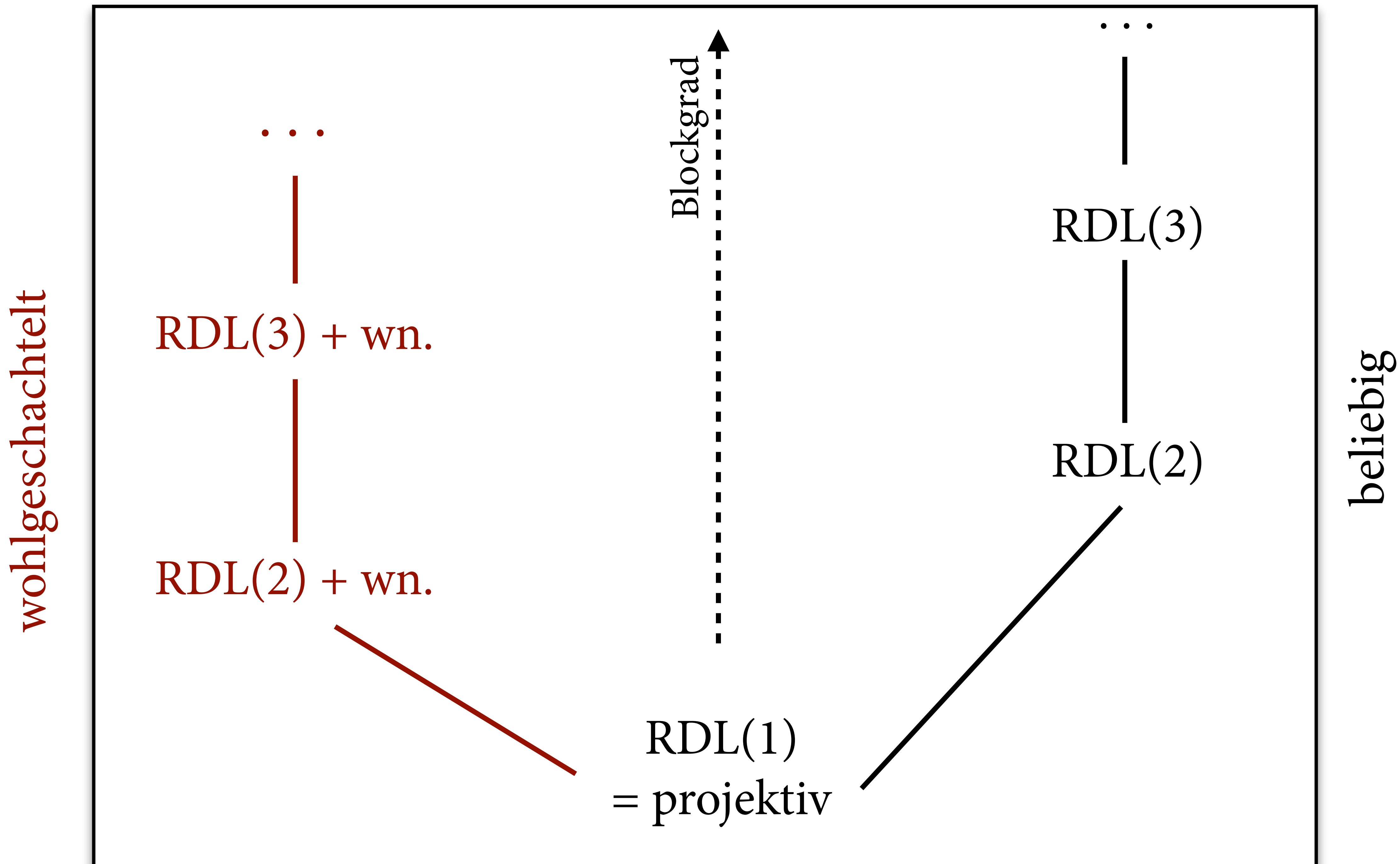
Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Hierarchie von Sprachen



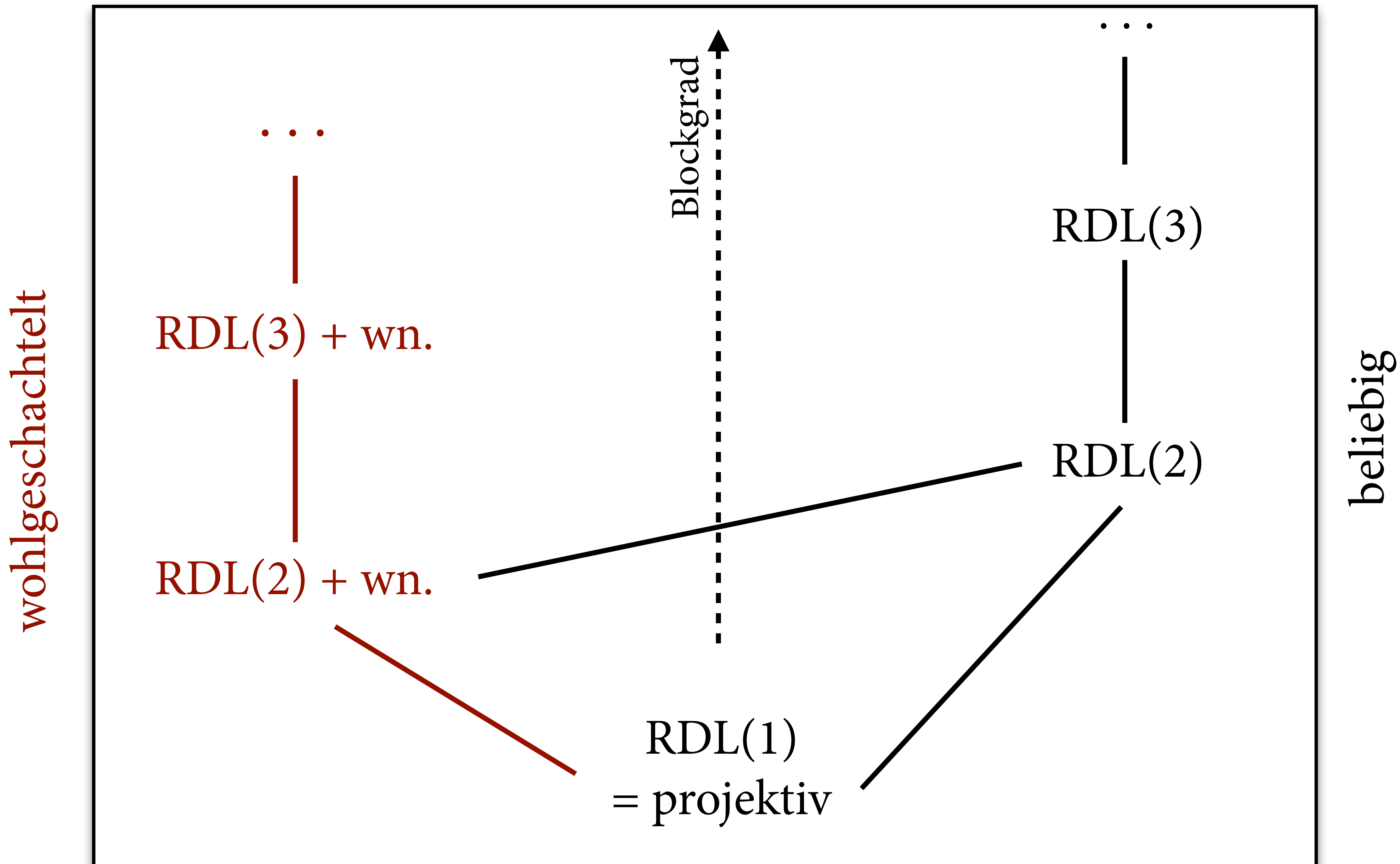
Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Hierarchie von Sprachen



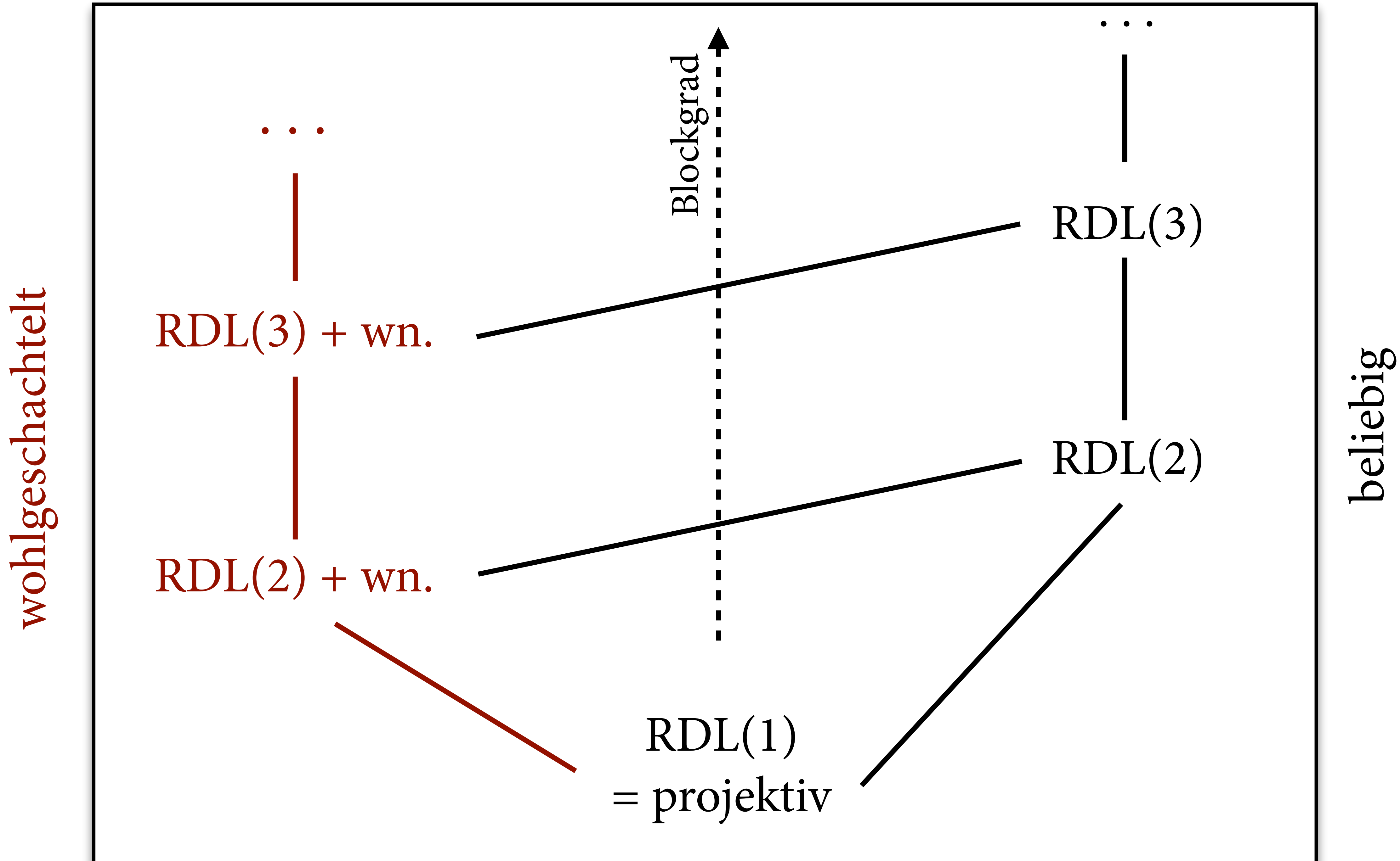
Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Hierarchie von Sprachen



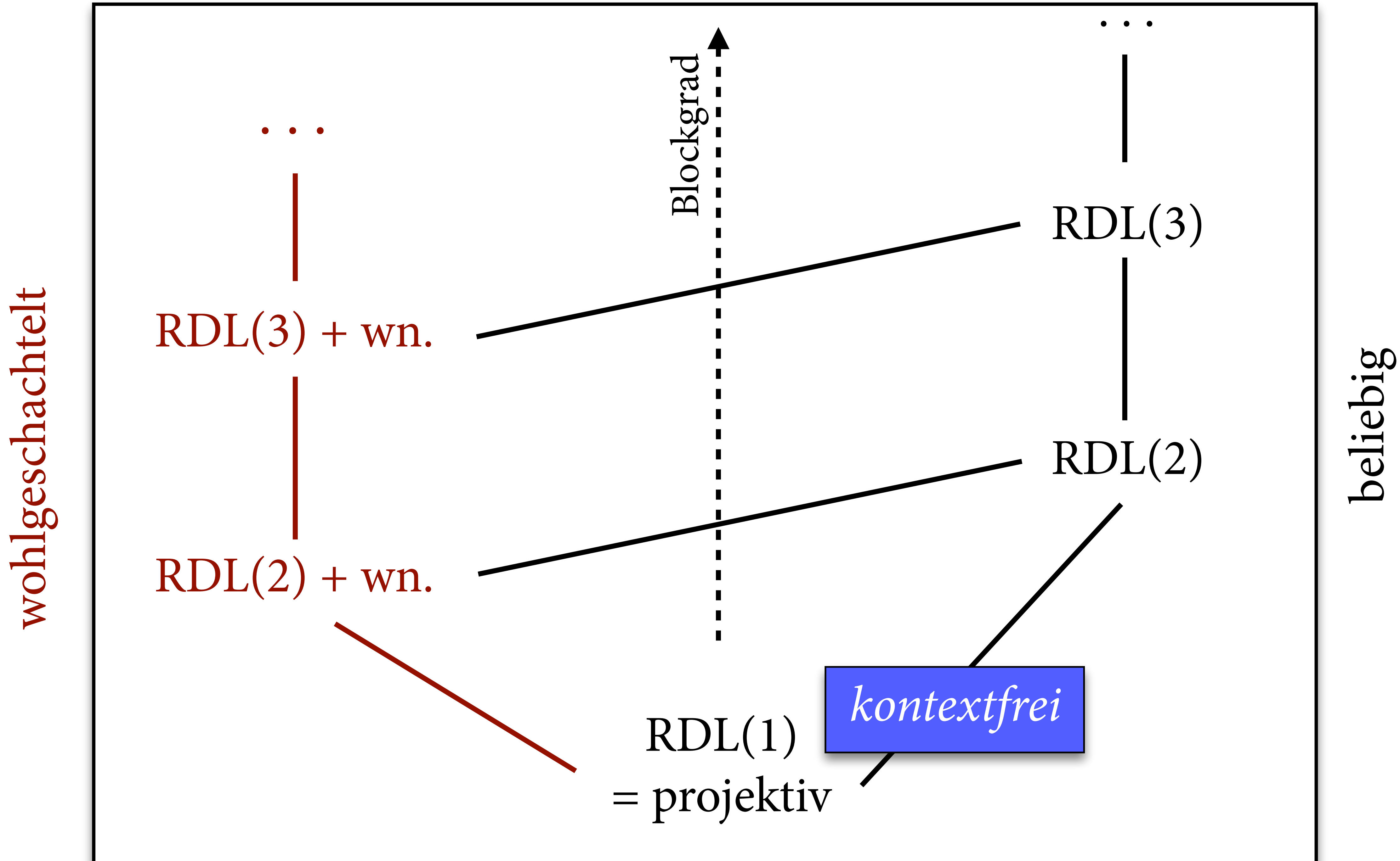
Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Hierarchie von Sprachen



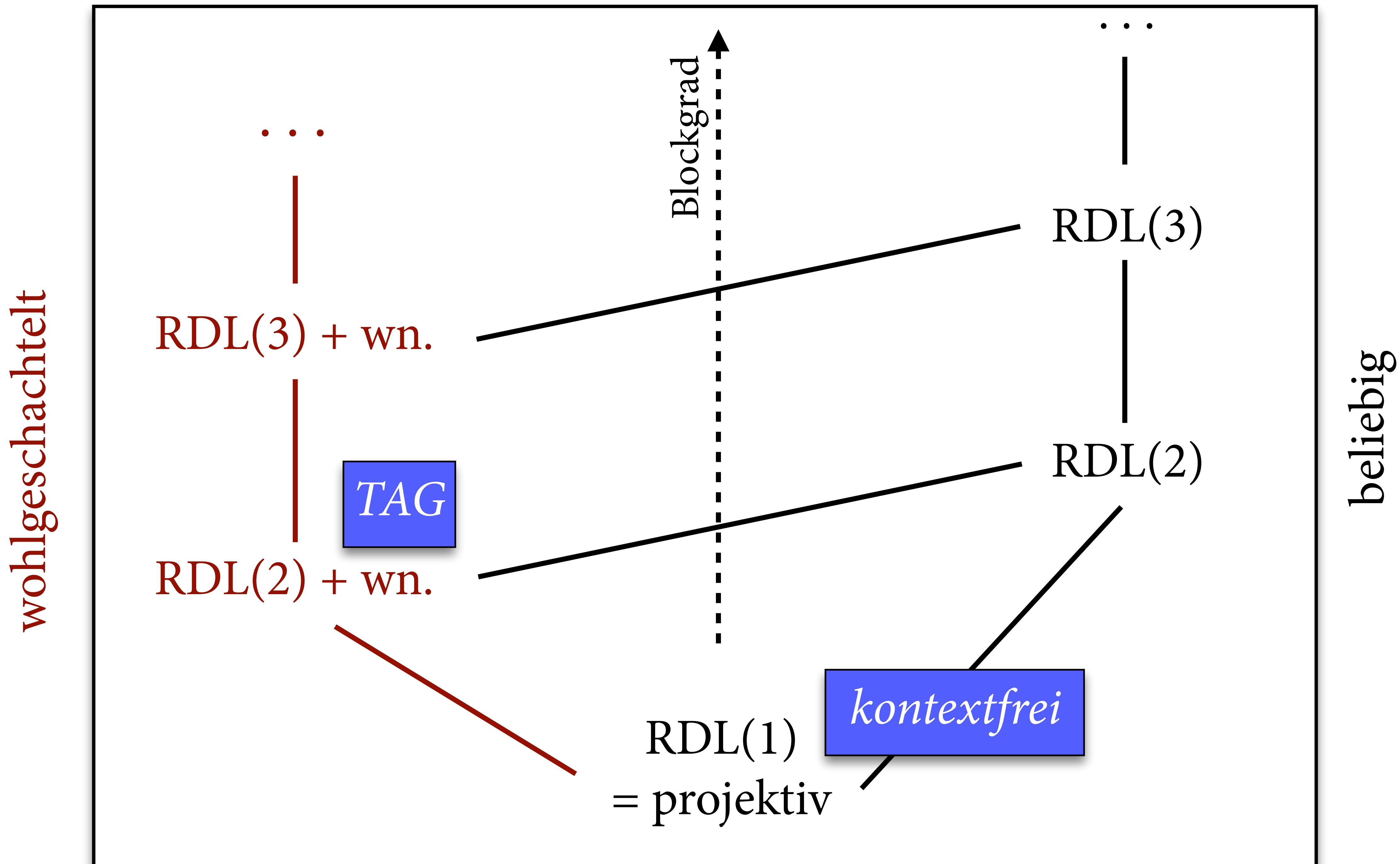
Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Hierarchie von Sprachen



Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Hierarchie von Sprachen



Höhere Sprachklasse ist in allen Fällen echt größer.

Empirische Frage

- Was ist der Blockgrad natürlicher Sprachen?
  - minimales k, damit NL ⊆ RDL(k)?
  - minimales k, so dass RDG von Blockgrad k auch die richtigen grammatischen Strukturen abbildet?
  - k = 1 kann nicht reichen, da NL nicht kontextfrei
- Frage kann man empirisch klären.
  - existierende Dependenz-Baumbanken (CoNLL) in Dependenzstrukturen konvertieren und nachzählen

Blockgrad in Baumbanken

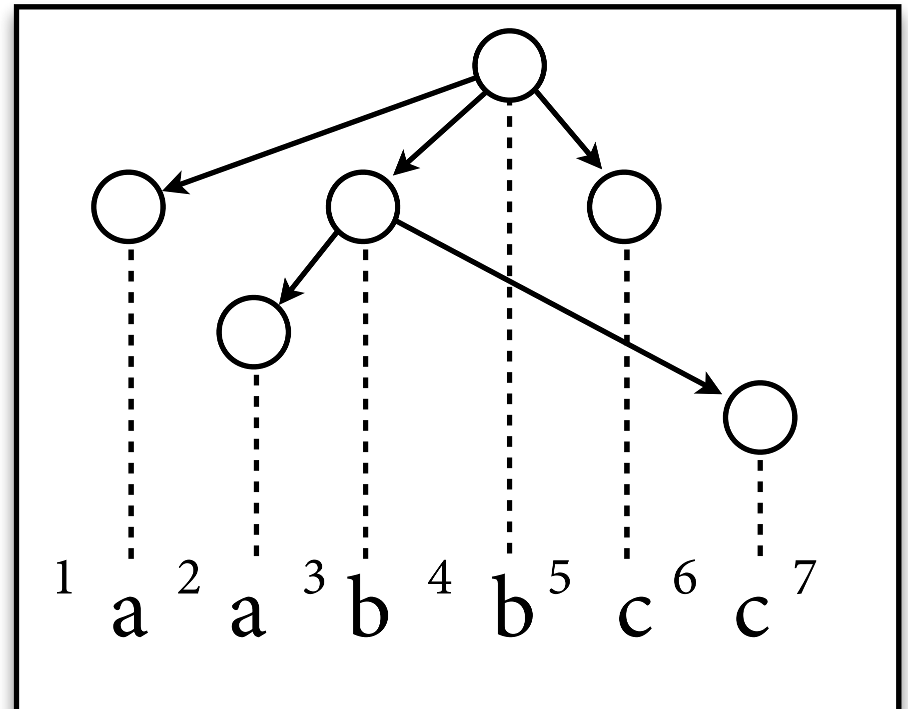
	projektiv	Blockgrad ≤ 2	wohlgeschachtelt
Arabisch	93,2 %	99,5 %	100,0 %
Tschechisch	76,8 %	99,6 %	99,9 %
Dänisch	84,1 %	99,8 %	99,9 %
Niederländisch	63,6 %	96,7 %	99,9 %
Latein	49,8 %	94,2 %	94,5 %
Portugiesisch	81,1 %	95,4 %	99,9 %
Slowenisch	72,2 %	94,4 %	99,7 %
Schwedisch	90,2 %	99,7 %	99,4 %
Türkisch	87,7 %	99,5 %	99,6 %

⇒ expressive Kapazität von TAG genau richtig für natürliche Sprachen?

Kuhlmann & Nivre 06; Gomez-Rodriguez et al. 11

RDG-Parsing: Grundidee

$S_S \rightarrow$ <b: 102>(A_S, C_S)
$S_S \rightarrow$ <b: 13023>(A_S, C_S, S_A)
$S_A \rightarrow$ <b: 10,2>(A_S, C_S)
$S_A \rightarrow$ <b: 130,23>(A_S, C_S, S_A)
$A_S \rightarrow$ <a: 0> $C_S \rightarrow$ <c:0>



[b, 3] $[A_S, 2\text{-}3]$ $[C_S, 5\text{-}6]$

RDG-Parsing: Grundidee

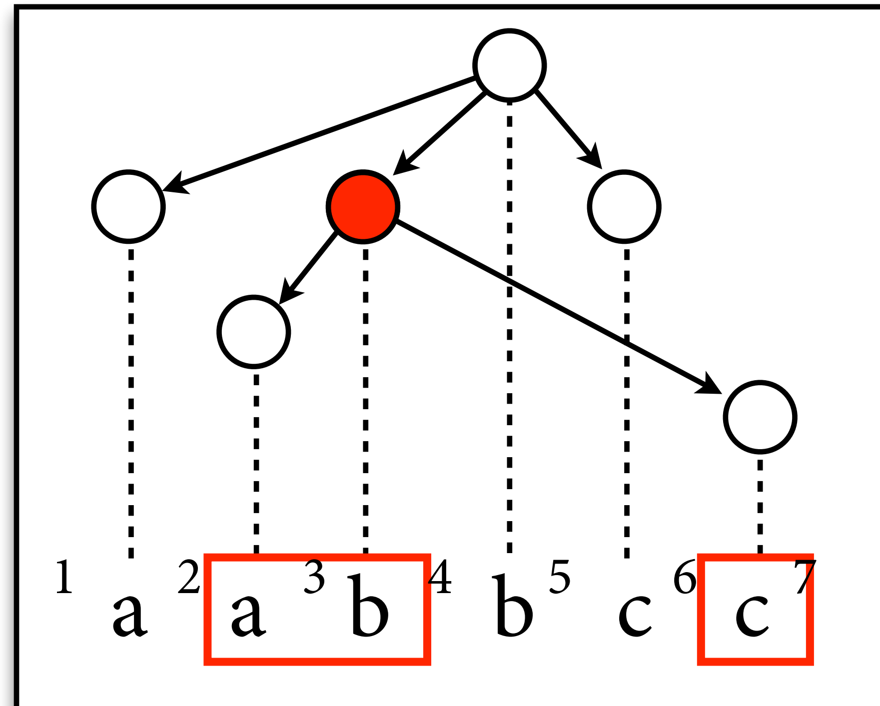
$S_S \rightarrow \langle b\text{: } 102\rangle(A_S, C_S)$

$S_S \rightarrow \langle b\text{: } 13023\rangle(A_S, C_S, S_A)$

$S_A \rightarrow \langle b\text{: } 10{,}2\rangle(A_S, C_S)$

$S_A \rightarrow \langle b\text{: } 130{,}23\rangle(A_S, C_S, S_A)$

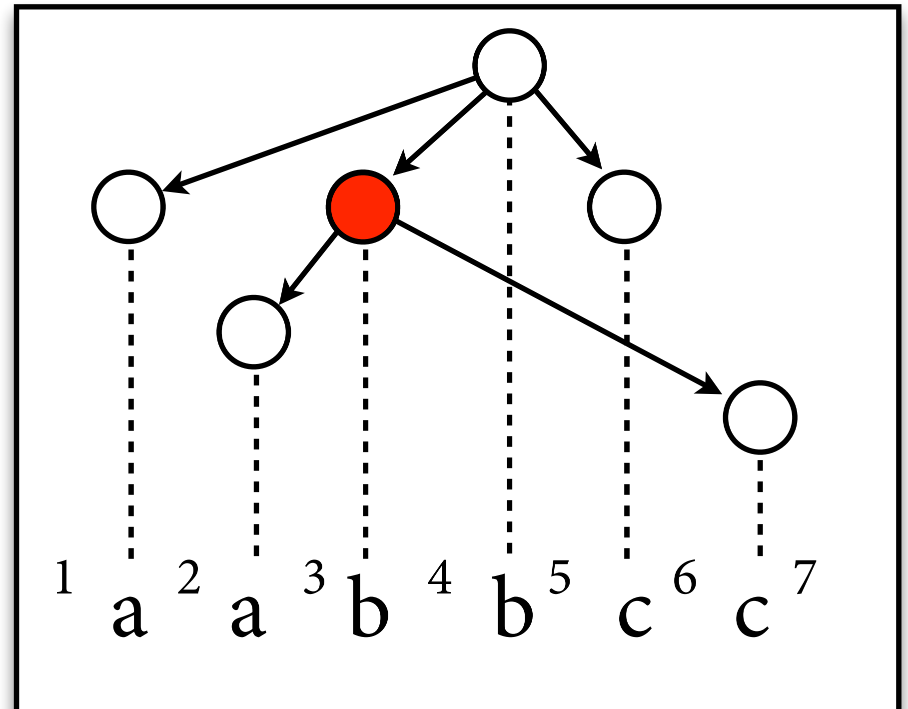
$A_S \rightarrow \langle a\text{: } 0\rangle \qquad C_S \rightarrow \langle c\text{:}0\rangle$



$$\frac{[b, 3] \quad [A_S, 2\text{-}3] \quad [C_S, 5\text{-}6]}{[S_A, 2\text{-}4, 5\text{-}6]} \; S_A \rightarrow \langle b\text{: } 10{,}2\rangle(A_S, C_S)$$

RDG-Parsing: Grundidee

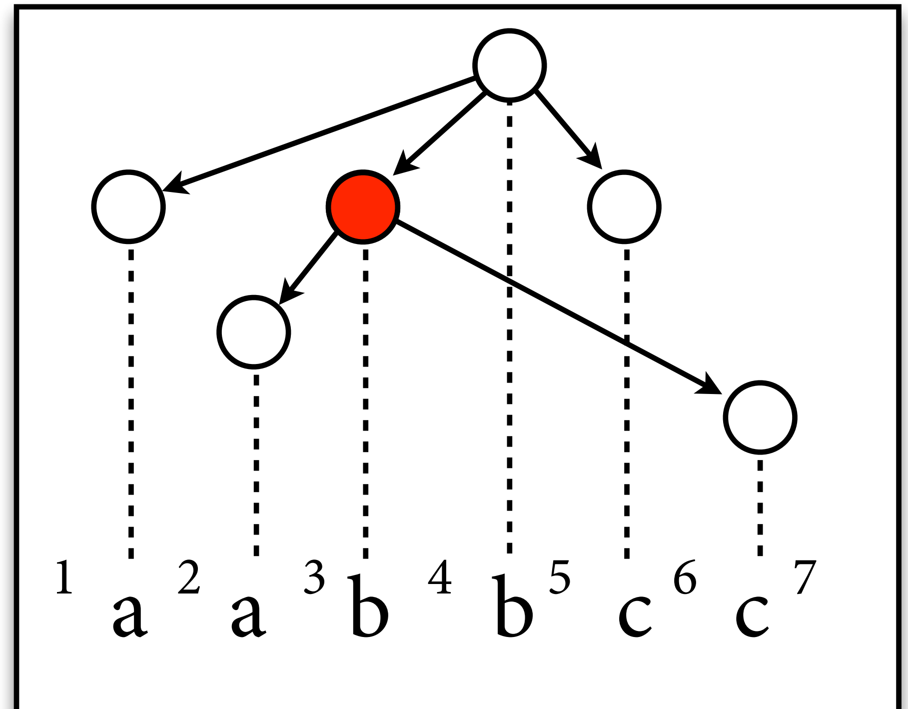
$S_S \rightarrow$ <b: 102>(A_S, C_S)
$S_S \rightarrow$ <b: 13023>(A_S, C_S, S_A)
$S_A \rightarrow$ <b: 10,2>(A_S, C_S)
$S_A \rightarrow$ <b: 130,23>(A_S, C_S, S_A)
$A_S \rightarrow$ <a: 0> $C_S \rightarrow$ <c:0>



$$\frac{[b, 3] \quad [A_S, 2\text{-}3] \quad [C_S, 5\text{-}6]}{[S_A, 2\text{-}4, 5\text{-}6]} \; S_A \rightarrow \langle b: 10{,}2\rangle(A_S, C_S)$$

RDG-Parsing: Grundidee

$S_S \rightarrow$ <b: 102>(A_S, C_S)
$S_S \rightarrow$ <b: 13023>(A_S, C_S, S_A)
$S_A \rightarrow$ <b: 10,2>(A_S, C_S)
$S_A \rightarrow$ <b: 130,23>(A_S, C_S, S_A)
$A_S \rightarrow$ <a: 0> $C_S \rightarrow$ <c:0>



$$\frac{[b, 3] \quad [A_S, 2\text{-}3] \quad [C_S, 5\text{-}6]}{[S_A, 2\text{-}4, 5\text{-}6]} \; S_A \rightarrow \text{<b: 10,2>}(A_S, C_S)$$

[b, 4] $[A_S, 1\text{-}2]$ $[C_S, 6\text{-}7]$

RDG-Parsing: Grundidee

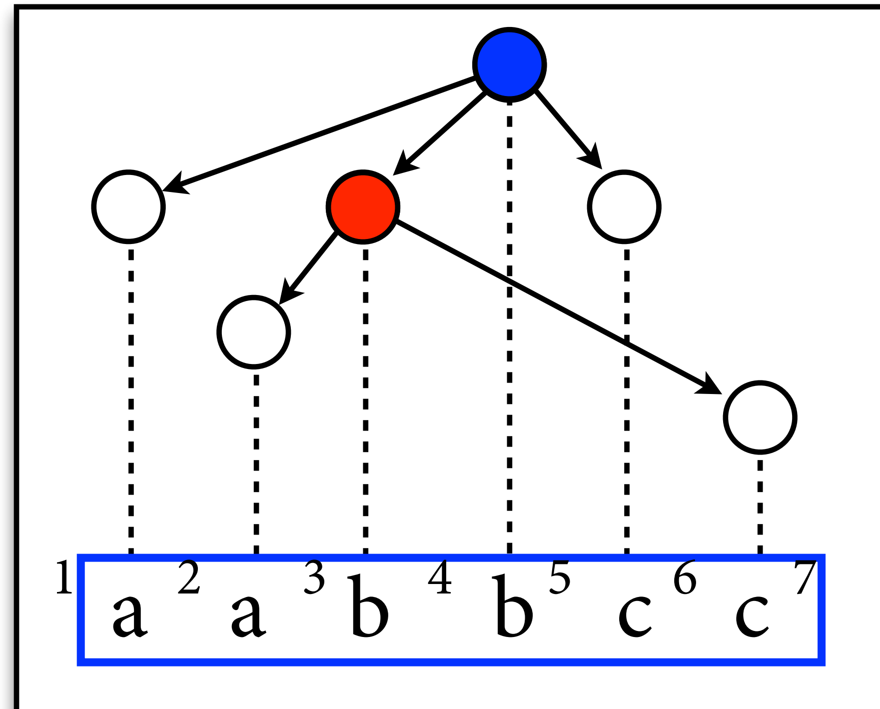
$S_S \rightarrow \langle b: 102\rangle(A_S, C_S)$

$S_S \rightarrow \langle b: 13023\rangle(A_S, C_S, S_A)$

$S_A \rightarrow \langle b: 10,2\rangle(A_S, C_S)$

$S_A \rightarrow \langle b: 130,23\rangle(A_S, C_S, S_A)$

$A_S \rightarrow \langle a: 0\rangle$ $\quad$ $C_S \rightarrow \langle c:0\rangle$



$$\cfrac{[b, 4] \quad [A_S, 1\text{-}2] \quad [C_S, 6\text{-}7] \quad \cfrac{[b, 3] \quad [A_S, 2\text{-}3] \quad [C_S, 5\text{-}6]}{[S_A, 2\text{-}4, 5\text{-}6]}\; S_A \rightarrow \langle b: 10,2\rangle(A_S, C_S)}{[S_S, 1\text{-}7]}\; S_S \rightarrow \langle b: 13023\rangle(A_S, C_S, S_A)$$

Parsingschema für RDGen

Item $[A, (l_1, r_1), ..., (l_k, r_k)]$: existiert Dep.struktur d mit $A \Rightarrow^* d$ und ertrag(d) = $\langle w_{l_1} \dots w_{r_1}, \dots, w_{l_k} \dots w_{r_k} \rangle$

$$\boxed{\frac{[a, s_0] \quad A \to \langle a : \omega \rangle (A_1, \dots, A_m) \qquad [A_1, s_{1,1}, \dots, s_{1,k_1}] \quad \dots \quad [A_m, s_{m,1}, \dots, s_{m,k_m}]}{[A, s_1, \dots, s_k]}}$$

falls außerdem $s_1, \dots, s_m$ zu ω passen

Parsingkomplexität

- Wortproblem von RDG mit *Blockgrad k* und *Rang m*:
  - Regelinstanz enthält 2 * (1 + k*m) Variablen
  - OA der Regel erzwingt, dass die meisten gleich sein müssen. Kann insgesamt nur k * (m+1) unabhängig wählen.

- Damit ist Wortproblem $O(n^{k*(m+1)})$. Spezialfälle:
  - binäre kfG: $k = 1, m = 2 \Rightarrow O(n^3)$
  - binäre TAG: $k = 2, m = 2 \Rightarrow O(n^6)$
  - kfG mit Regeln $A \rightarrow B_1 \ldots B_m$: $k = 1 \Rightarrow O(n^{m+1})$.

(Rang = # Nichtterminale auf rechter Seite)

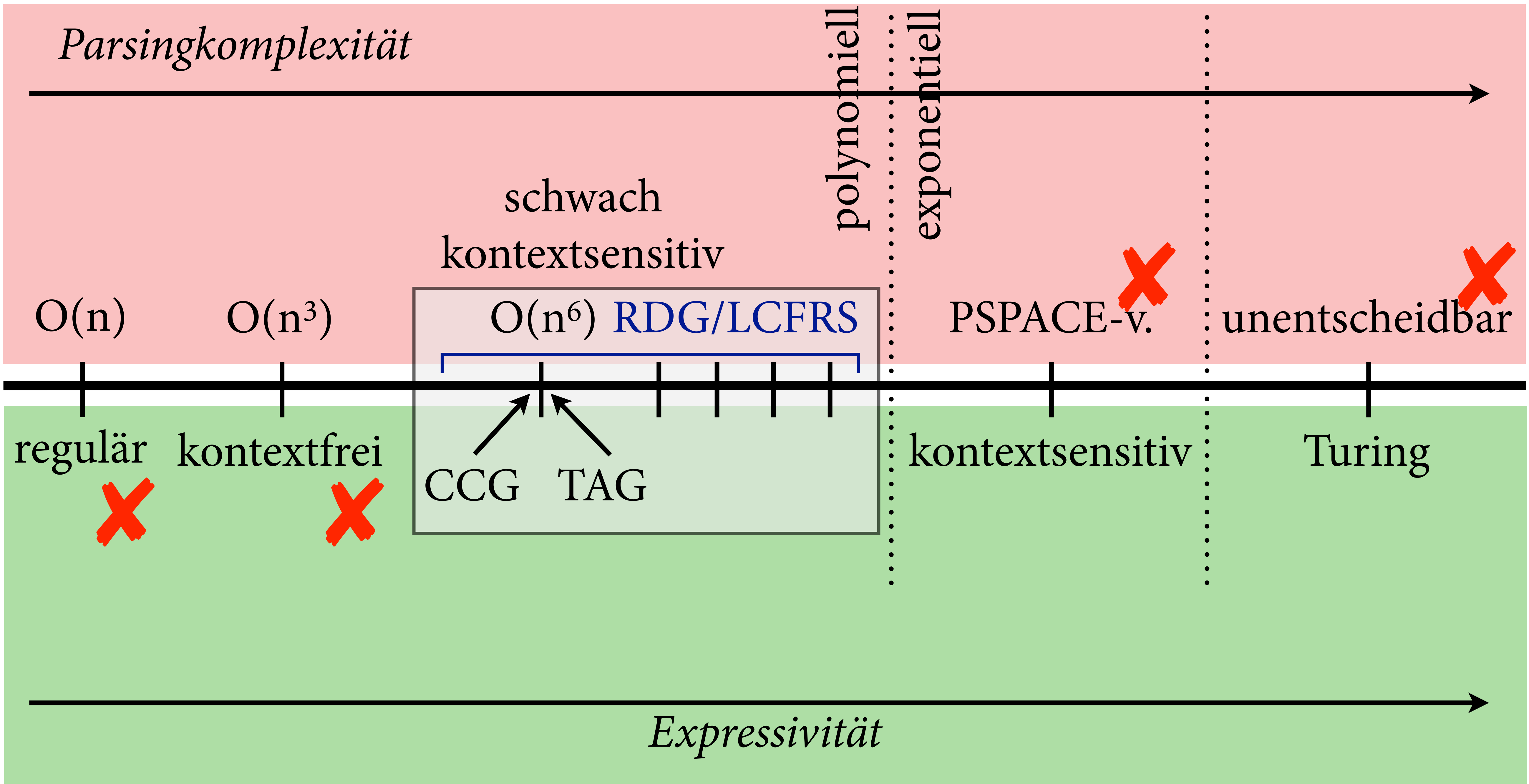
Binarisierung

- Jede kfG kann *binarisiert* werden, d.h. es gibt eine schwach äquivalente Grammatik mit Rang m = 2 (Chomsky-Normalform).

- Manche RDGen kann man nur in RDG mit höherem Blockgrad binarisieren (Rambow & Satta 99).

- Jede *wohlgeschachtelte* RDG ist mit gleichem Blockgrad binarisierbar (Gomez-Rodriguez et al. 2010).
    - Wortproblem von RDG(1) mit bel. Rang: $O(n^3)$
    - Wortproblem von wn. RDG(2) mit bel. Rang: $O(n^6)$

Fazit


Parsingkomplexität
polynomiell
exponentiell
schwach
kontextsensitiv
O(n)
O(n³)
O(n⁶)
RDG/LCFRS
PSPACE-v.
unentscheidbar
regulär
kontextfrei
CCG
TAG
kontextsensitiv
Turing
Expressivität

Zusammenfassung

- Codierung von kfGen und LTAG in RDG:
  - LTSG = RDG von Blockgrad 1 (stark)
  - kfG = RDG von Blockgrad 1 (schwach)
  - LTAG = wohlgeschachtelte RDG von Blockgrad 2 (stark)

- Parsing von RDG:
  - Standard-Wortproblem: $O(n^{k(m+1)})$.
  - Durch Binarisierung kann man $m = 2$ garantieren.
  - Komplexität wächst exponentiell mit dem Blockgrad.