

# Einführung in die Computerlinguistik und Sprachtechnologie

Vorlesung im WiSe 2016/17  
(B-GSW-12)

**Prof. Dr. Udo Hahn**

Lehrstuhl für Computerlinguistik  
Institut für Germanistische Sprachwissenschaft  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

<http://www.julielab.de>

# Exemplarisches zum Parsing

- Parsing-Protokoll: Strukturbaum
- Parsing-Strategien
  - top-down vs. bottom-up
  - depth-first vs. breadth-first
  - Left corner
- Parsing und Ambiguität
  - lexikalische Ambiguität
  - strukturelle Ambiguität

der folgende Teil der Vorlesung  
ist einer Ausarbeitung entnommen von

**Prof. Harold Somers**

Professor of Language Engineering  
University of Manchester  
Institute of Science & Technology  
(UMIST)

# 1. Top-down with simple grammar

~~the man shot an elephant~~

Phrase structure  
tree

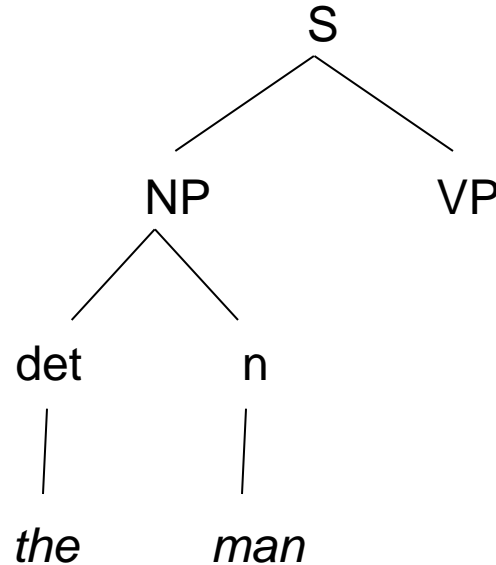
$S \rightarrow NP VP$

$NP \rightarrow det n$

$det \rightarrow \{an, the\}$

$n \rightarrow \{elephant, man\}$

$VP \rightarrow v$



$S \rightarrow NP VP$

$NP \rightarrow det n$

$VP \rightarrow v$

$VP \rightarrow v NP$

Lexicon

$det \rightarrow \{an, the\}$

$n \rightarrow \{elephant, man\}$

$v \rightarrow shot$

# 1. Top-down with simple grammar

~~the man shot~~ an elephant

Phrase structure  
tree

$S \rightarrow NP VP$   
 $NP \rightarrow \text{det } n$   
 $VP \rightarrow v$   
 $VP \rightarrow v NP$

$S \rightarrow NP VP$

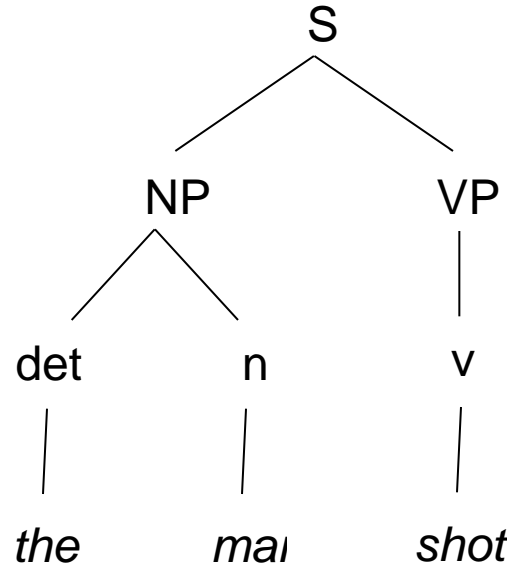
$NP \rightarrow \text{det } n$

$\text{det} \rightarrow \{an, the\}$

$n \rightarrow \{elephant, man\}$

$VP \rightarrow v$

$v \rightarrow shot$



Lexicon

$\text{det} \rightarrow \{an, the\}$

$n \rightarrow \{elephant, man\}$

$v \rightarrow shot$

No more rules, but input is not completely accounted for...

So we must backtrack, and try the other VP rule

# 1. Top-down with simple grammar

~~the man shot an elephant~~

$S \rightarrow NP VP$

$NP \rightarrow det n$

$det \rightarrow \{an, the\}$

$n \rightarrow \{elephant, man\}$

~~$VP \rightarrow v$~~

$VP \rightarrow v NP$

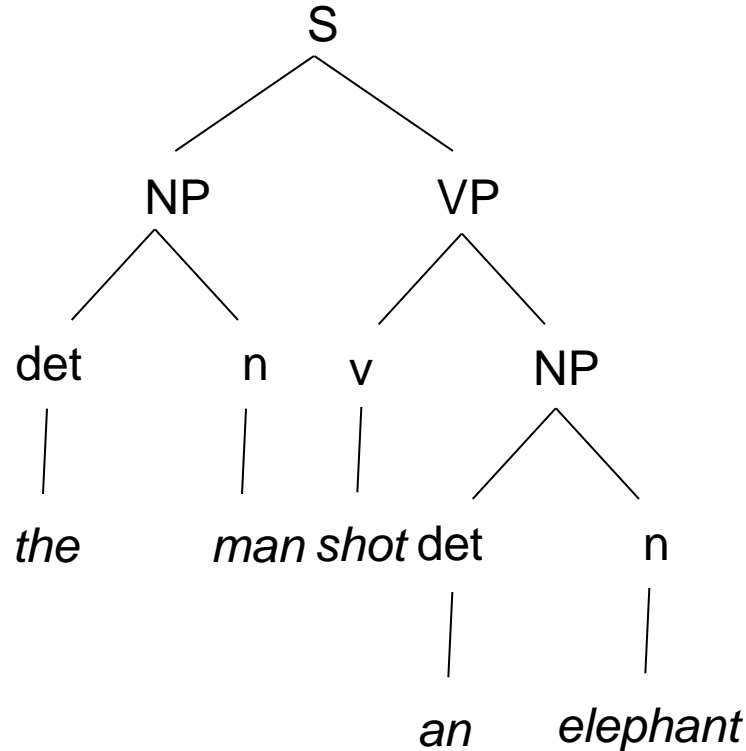
$v \rightarrow shot$

$NP \rightarrow det n$

$det \rightarrow \{an, the\}$

$n \rightarrow \{elephant, man\}$

Phrase structure tree



$S \rightarrow NP VP$

$NP \rightarrow det n$

$VP \rightarrow v$

$VP \rightarrow v NP$

Lexicon

$det \rightarrow \{an, the\}$

$n \rightarrow \{elephant, man\}$

$v \rightarrow shot$

No more rules, and input *is* completely accounted for

# Breadth-first vs. Depth-first

- When we came to the VP rule we were faced with a choice of two rules
  - “**Depth-first**” means following the first choice through to the end
    - In case a dead end occurs, we must **backtrack**
  - “**Breadth-first**” means keeping all your options open (e.g., by copying partial parse trees and by proceeding with different alternatives independently)
    - In case a dead end occurs, the current alternative “dies” (is invalidated)

## 2. Bottom-up with simple grammar

det  $\rightarrow$  {*an, the*}  
n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}  
v  $\rightarrow$  *shot*

S  $\rightarrow$  NP VP  
NP  $\rightarrow$  det n  
VP  $\rightarrow$  v  
VP  $\rightarrow$  v NP

### Lexicon

det  $\rightarrow$  {*an, the*}  
n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}  
v  $\rightarrow$  *shot*

*the man shot an elephant*



## 2. Bottom-up with simple grammar

det  $\rightarrow$  {*an, the*}  
n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}  
v  $\rightarrow$  *shot*

S  $\rightarrow$  NP VP  
NP  $\rightarrow$  det n  
VP  $\rightarrow$  v  
VP  $\rightarrow$  v NP

### Lexicon

det  $\rightarrow$  {*an, the*}  
n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}  
v  $\rightarrow$  *shot*

det	n	v	det	n
<i>the</i>	<i>man</i>	<i>shot</i>	<i>an</i>	<i>elephant</i>

## 2. Bottom-up with simple grammar

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}

v  $\rightarrow$  *shot*

NP  $\rightarrow$  det n

S  $\rightarrow$  NP VP

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v

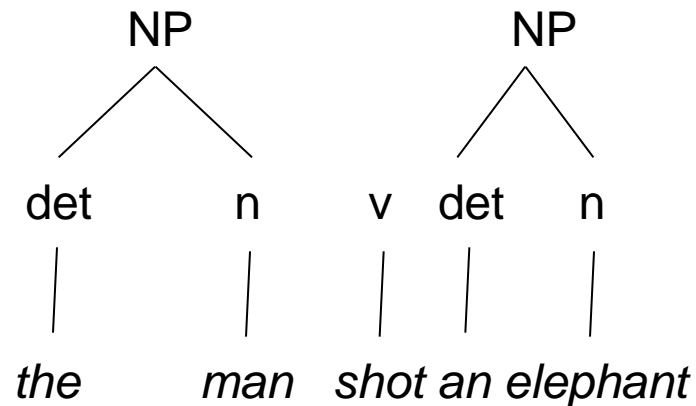
VP  $\rightarrow$  v NP

Lexicon

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}

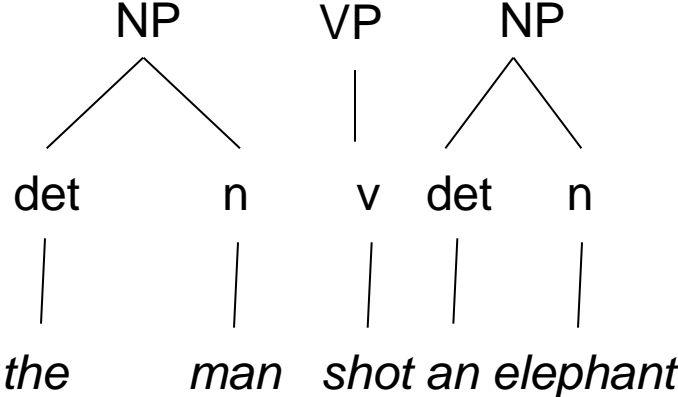
v  $\rightarrow$  *shot*



We've reached the top, but input *isn't* completely accounted for

# 2. Bottom-up with simple grammar

det  $\rightarrow$  {*an, the*}  
n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}  
v  $\rightarrow$  *shot*  
NP  $\rightarrow$  det n  
VP  $\rightarrow$  v



S  $\rightarrow$  NP VP  
NP  $\rightarrow$  det n  
VP  $\rightarrow$  v  
VP  $\rightarrow$  v NP

Lexicon  
det  $\rightarrow$  {*an, the*}  
n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}  
v  $\rightarrow$  *shot*

## 2. Bottom-up with simple grammar

$S \rightarrow NP VP$

$NP \rightarrow det n$

$VP \rightarrow v$

$VP \rightarrow v NP$

Lexicon

$det \rightarrow \{an, the\}$

$n \rightarrow \{elephant, man\}$

$v \rightarrow shot$

$det \rightarrow \{an, the\}$

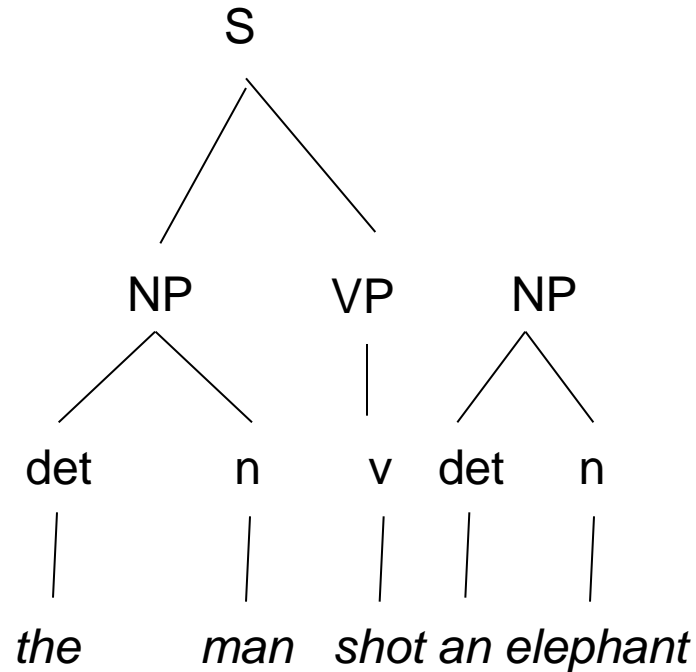
$n \rightarrow \{elephant, man\}$

$v \rightarrow shot$

$NP \rightarrow det n$

$VP \rightarrow v NP$

$S \rightarrow NP VP$



We've reached the top, but input *isn't* completely accounted for

## 2. Bottom-up with simple grammar

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}

v  $\rightarrow$  *shot*

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v NP

S  $\rightarrow$  NP VP

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v

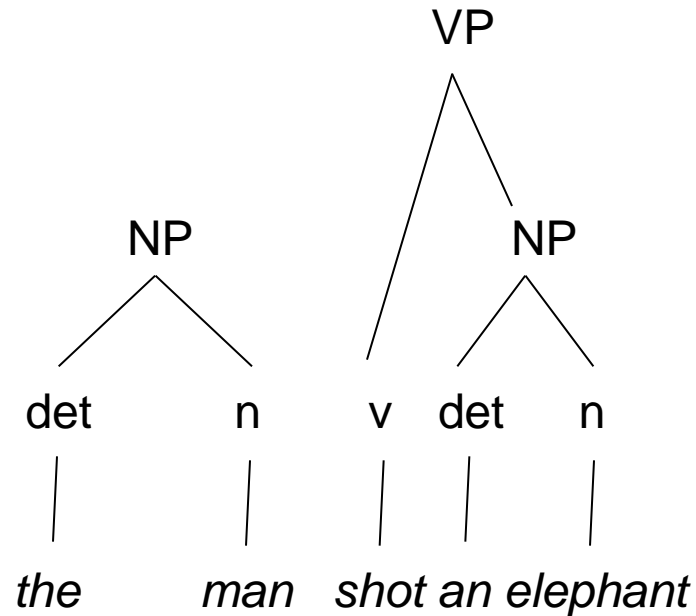
VP  $\rightarrow$  v NP

Lexicon

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

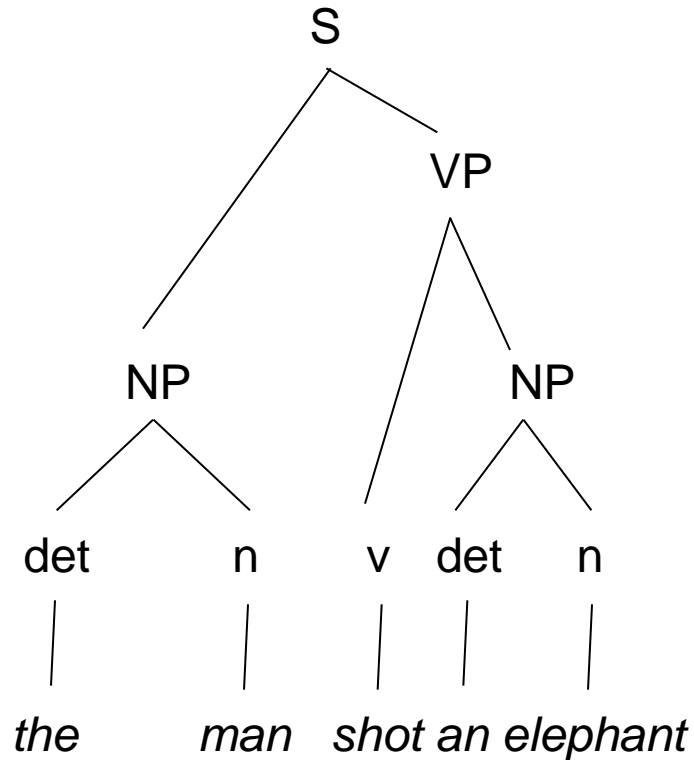
n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}

v  $\rightarrow$  *shot*



## 2. Bottom-up with simple grammar

det  $\rightarrow$  {*an, the*}  
n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}  
v  $\rightarrow$  *shot*  
NP  $\rightarrow$  det n  
VP  $\rightarrow$  v NP  
S  $\rightarrow$  NP VP



S  $\rightarrow$  NP VP  
NP  $\rightarrow$  det n  
VP  $\rightarrow$  v  
VP  $\rightarrow$  v NP

### Lexicon

det  $\rightarrow$  {*an, the*}  
n  $\rightarrow$  {*elephant, man*}  
v  $\rightarrow$  *shot*

We've reached the top, and input *is* completely accounted for

# Eine Beispielgrammatik (CFG)

(1-a)  $S \Rightarrow NP VP$

(1-b)  $NP \Rightarrow Det Nom$

(1-c)  $VP \Rightarrow Verb NP$

(1-d)  $Det \Rightarrow \{ der, den \}$

(1-e)  $Nom \Rightarrow \{ Pr\u00e4sident, Vertrag \}$

(1-f)  $Verb \Rightarrow \{ unterschreibt \}$

# Einfacher Bottom-Up- CFG-Parser (Algorithmenskizze)

## Eingabe:

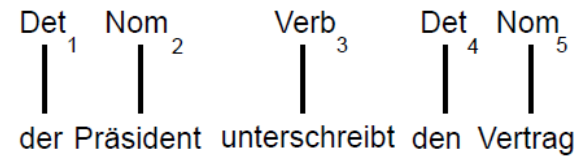
- a. ein Satz bestehend aus  $n$  lexikalischen Einheiten einer (natürlichen) Sprache
  - b. eine kontextfreie Phrasenstruktur-Grammatik (deren terminale Symbole lexikalische Einheiten sind)
1. Prüfe für alle  $n$  lexikalischen Einheiten des Satzes (von links nach rechts):
    - a. es existiert eine Regel, deren rechte Seite die jeweilige lexikalische Einheit als Element enthält ; falls nicht, gehe zu (5.b)
    - b. konstruiere für jede so identifizierte lexikalische Einheit einen Graphen, dessen Wurzel das lexikalische Kategoriensymbol der linken Seite dieser Regel als Etikett erhält und die lexikalische Einheit aus der rechten Seite der Regel als Etikett des direkten Nachfolgers der Wurzel hat.
    - c. jeder dieser „lexikalischen“ Graphen hat einen Abdeckungsindex  $[i..i]$ , der die Abdeckung des jeweiligen  $i$ -ten lexikalischen Element beschreibt ( $i=1..n$ ).
    - d. ordne die Graphen in aufsteigender Folge ihrer  $n$  Abdeckungsindices.
  2. Finde iterativ alle Regeln,
    - a. deren rechte Seite (bestehend aus  $k$  Kategoriensymbolen) vollständig mit den Etiketten der Wurzeln einer  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen (ebenfalls Kategoriensymbole) übereinstimmt, wobei
    - b. die Abdeckungsindices der  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen dicht (also ohne Wort- oder Phrasenlücken) und numerisch aufsteigend geordnet sind.
  3. Konstruiere für jede so gefundene  $k$ -elementige Teilfolge von Graphen einen die gefundenen Graphen enthaltenden neuen Graphen,
    - a. dessen Wurzel das komplexe syntaktische Kategoriensymbol der linken Seite der identifizierten Regel als Etikett erhält und die Wurzelknoten der identifizierten  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen aus der korrespondierenden rechten Seite dieser Regel als direkte Nachfolger des neuen Wurzelknotens hat, wobei die Präzedenzordnung zwischen diesen Teilgraphen sich aus der aufsteigenden Ordnung ihrer Abdeckungsindices ergibt.
    - b. der Abdeckungsindex des neu gebildeten Graphen berechnet sich wie folgt:
      - (1) die untere Grenze ergibt sich aus der unteren Grenze des ersten Graphen der total geordneten  $k$ -elementigen Folge von Graphen,
      - (2) die obere Grenze ergibt sich aus der oberen Grenze des  $k$ -ten Graphen der total geordneten  $k$ -elementigen Folge von Graphen.
  4. Iteriere Schritte (2.) und (3.) solange, bis ein Graph mit dem Startsymbol der Grammatik ( $S$ ) als Etikett einer Wurzel gebildet ist, die Vorgänger aller Knoten des Graphen ist und den Eingabesatz komplett abgedeckt (d.h.  $S$  alle lexikalische Kategorien dominiert und damit einen Abdeckungsindex  $[1..n]$  hat. Falls kein entsprechender Graph gebildet werden kann, gehe zu (5.b)
  5. Ausgabe:
    - a. der Syntaxbaum für den Eingabesatz, falls  $S$  alle  $n$  lexikalische Kategorien dominiert
    - b. „kein Satz der geg. Grammatik“, sonst



# Einfacher Bottom-Up- CFG-Parser (Algorithmenskizze)

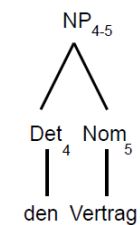
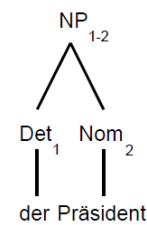
## Eingabe:

- a. ein Satz bestehend aus  $n$  lexikalischen Einheiten einer (natürlichen) Sprache
  - b. eine kontextfreie Phrasenstruktur-Grammatik (deren terminale Symbole lexikalische Einheiten sind)
1. Prüfe für alle  $n$  lexikalischen Einheiten des Satzes (von links nach rechts):
    - a. es existiert eine Regel, deren rechte Seite die jeweilige lexikalische Einheit als Element enthält ; falls nicht, gehe zu (5.b)
    - b. konstruiere für jede so identifizierte lexikalische Einheit einen Graphen, dessen Wurzel das lexikalische Kategoriensymbol der linken Seite dieser Regel als Etikett erhält und die lexikalische Einheit aus der rechten Seite der Regel als Etikett des direkten Nachfolgers der Wurzel hat.
    - c. jeder dieser „lexikalischen“ Graphen hat einen Abdeckungsindex  $[i..i]$ , der die Abdeckung des jeweiligen  $i$ -ten lexikalischen Element beschreibt ( $i=1..n$ ).
    - d. ordne die Graphen in aufsteigender Folge ihrer  $n$  Abdeckungsindizes.

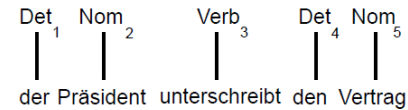


①

# Einfacher Bottom-Up- CFG-Parser (Algorithmenskizze)

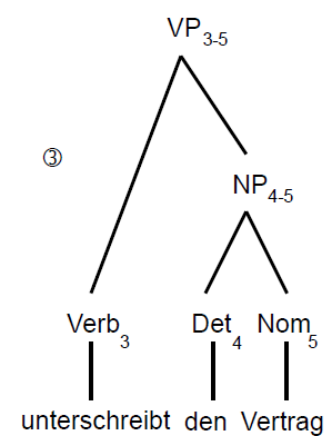
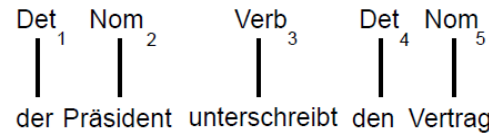
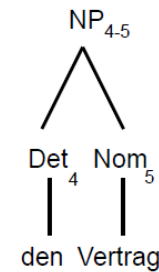
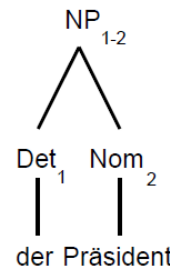


②



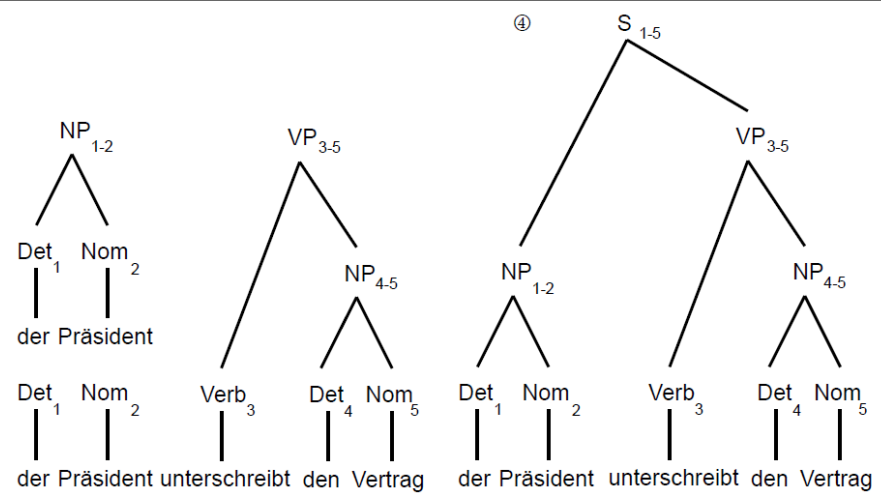
2. Finde iterativ alle Regeln,
  - a. deren rechte Seite (bestehend aus  $k$  Kategoriensymbolen) vollständig mit den Etiketten der Wurzeln einer  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen (ebenfalls Kategoriensymbole) übereinstimmt, wobei
  - b. die Abdeckungsindices der  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen dicht (also ohne Wort- oder Phrasenlücken) und numerisch aufsteigend geordnet sind.
3. Konstruiere für jede so gefundene  $k$ -elementige Teilfolge von Graphen einen die gefundenen Graphen enthaltenden neuen Graphen,
  - a. dessen Wurzel das komplexe syntaktische Kategoriensymbol der linken Seite der identifizierten Regel als Etikett erhält und die Wurzelknoten der identifizierten  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen aus der korrespondierenden rechten Seite dieser Regel als direkte Nachfolger des neuen Wurzelknotens hat, wobei die Präzedenzordnung zwischen diesen Teilgraphen sich aus der aufsteigenden Ordnung ihrer Abdeckungsindices ergibt.
  - b. der Abdeckungsindex des neu gebildeten Graphen berechnet sich wie folgt:
    - (1) die untere Grenze ergibt sich aus der unteren Grenze des ersten Graphen der total geordneten  $k$ -elementigen Folge von Graphen,
    - (2) die obere Grenze ergibt sich aus der oberen Grenze des  $k$ -ten Graphen der total geordneten  $k$ -elementigen Folge von Graphen.
4. Iteriere Schritte (2.) und (3.) solange, bis ein Graph mit dem Startsymbol der Grammatik ( $S$ ) als Etikett einer Wurzel gebildet ist, die Vorgänger aller Knoten des Graphen ist und den Eingabesatz komplett abgedeckt (d.h.  $S$  alle lexikalische Kategorien dominiert und damit einen Abdeckungsindex  $[1..n]$  hat. Falls kein entsprechender Graph gebildet werden kann, gehe zu (5.b)
5. Ausgabe:
  - a. der Syntaxbaum für den Eingabesatz, falls  $S$  alle  $n$  lexikalische Kategorien dominiert
  - b. „kein Satz der geg. Grammatik“, sonst

# Einfacher Bottom-Up- CFG-Parser (Algorithmenskizze)



2. Finde iterativ alle Regeln,
  - a. deren rechte Seite (bestehend aus  $k$  Kategoriensymbolen) vollständig mit den Etiketten der Wurzeln einer  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen (ebenfalls Kategoriensymbole) übereinstimmt, wobei
  - b. die Abdeckungsindices der  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen dicht (also ohne Wort- oder Phrasenlücken) und numerisch aufsteigend geordnet sind.
3. Konstruiere für jede so gefundene  $k$ -elementige Teilfolge von Graphen einen die gefundenen Graphen enthaltenden neuen Graphen,
  - a. dessen Wurzel das komplexe syntaktische Kategoriensymbol der linken Seite der identifizierten Regel als Etikett erhält und die Wurzelknoten der identifizierten  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen aus der korrespondierenden rechten Seite dieser Regel als direkte Nachfolger des neuen Wurzelknotens hat, wobei die Präzedenzordnung zwischen diesen Teilgraphen sich aus der aufsteigenden Ordnung ihrer Abdeckungsindices ergibt.
  - b. der Abdeckungsindex des neu gebildeten Graphen berechnet sich wie folgt:
    - (1) die untere Grenze ergibt sich aus der unteren Grenze des ersten Graphen der total geordneten  $k$ -elementigen Folge von Graphen,
    - (2) die obere Grenze ergibt sich aus der oberen Grenze des  $k$ -ten Graphen der total geordneten  $k$ -elementigen Folge von Graphen.
4. Iteriere Schritte (2.) und (3.) solange, bis ein Graph mit dem Startsymbol der Grammatik ( $S$ ) als Etikett einer Wurzel gebildet ist, die Vorgänger aller Knoten des Graphen ist und den Eingabesatz komplett abgedeckt (d.h.  $S$  alle lexikalische Kategorien dominiert und damit einen Abdeckungsindex  $[1..n]$  hat. Falls kein entsprechender Graph gebildet werden kann, gehe zu (5.b)
5. Ausgabe:
  - a. der Syntaxbaum für den Eingabesatz, falls  $S$  alle  $n$  lexikalische Kategorien dominiert
  - b. „kein Satz der geg. Grammatik“, sonst

# Einfacher Bottom-Up- CFG-Parser (Algorithmenskizze)



2. Finde iterativ alle Regeln,
  - a. deren rechte Seite (bestehend aus  $k$  Kategoriensymbolen) vollständig mit den Etiketten der Wurzeln einer  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen (ebenfalls Kategoriensymbole) übereinstimmt, wobei
  - b. die Abdeckungsindices der  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen dicht (also ohne Wort- oder Phrasenlücken) und numerisch aufsteigend geordnet sind.
3. Konstruiere für jede so gefundene  $k$ -elementige Teilfolge von Graphen einen die gefundenen Graphen enthaltenden neuen Graphen,
  - a. dessen Wurzel das komplexe syntaktische Kategoriensymbol der linken Seite der identifizierten Regel als Etikett erhält und die Wurzelknoten der identifizierten  $k$ -elementigen Teilfolge von Graphen aus der korrespondierenden rechten Seite dieser Regel als direkte Nachfolger des neuen Wurzelknotens hat, wobei die Präzedenzordnung zwischen diesen Teilgraphen sich aus der aufsteigenden Ordnung ihrer Abdeckungsindices ergibt.
  - b. der Abdeckungsindex des neu gebildeten Graphen berechnet sich wie folgt:
    - (1) die untere Grenze ergibt sich aus der unteren Grenze des ersten Graphen der total geordneten  $k$ -elementigen Folge von Graphen,
    - (2) die obere Grenze ergibt sich aus der oberen Grenze des  $k$ -ten Graphen der total geordneten  $k$ -elementigen Folge von Graphen.
4. Iteriere Schritte (2.) und (3.) solange, bis ein Graph mit dem Startsymbol der Grammatik ( $S$ ) als Etikett einer Wurzel gebildet ist, die Vorgänger aller Knoten des Graphen ist und den Eingabesatz komplett abgedeckt (d.h.  $S$  alle lexikalische Kategorien dominiert und damit einen Abdeckungsindex  $[1..n]$  hat. Falls kein entsprechender Graph gebildet werden kann, gehe zu (5.b)
5. Ausgabe:
  - a. der Syntaxbaum für den Eingabesatz, falls  $S$  alle  $n$  lexikalische Kategorien dominiert
  - b. „kein Satz der geg. Grammatik“, sonst

# Same again but with lexical ambiguity

$S \rightarrow NP VP$

$NP \rightarrow det n$

$VP \rightarrow v$

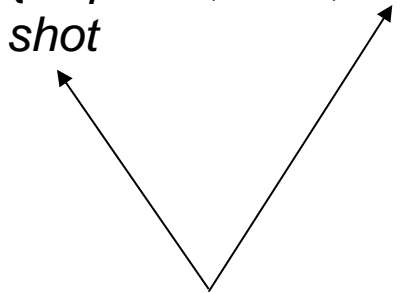
$VP \rightarrow v NP$

Lexicon

$det \rightarrow \{an, the\}$

$n \rightarrow \{elephant, man, shot\}$

$v \rightarrow shot$



*shot* can be v or n

### 3. Top-down with lexical ambiguity

~~the man~~ shot an elephant

S → NP VP

NP → det n

det → {an, the}

n → {elephant, man}

~~VP → v~~

VP → v NP

S → NP VP

NP → det n

VP → v

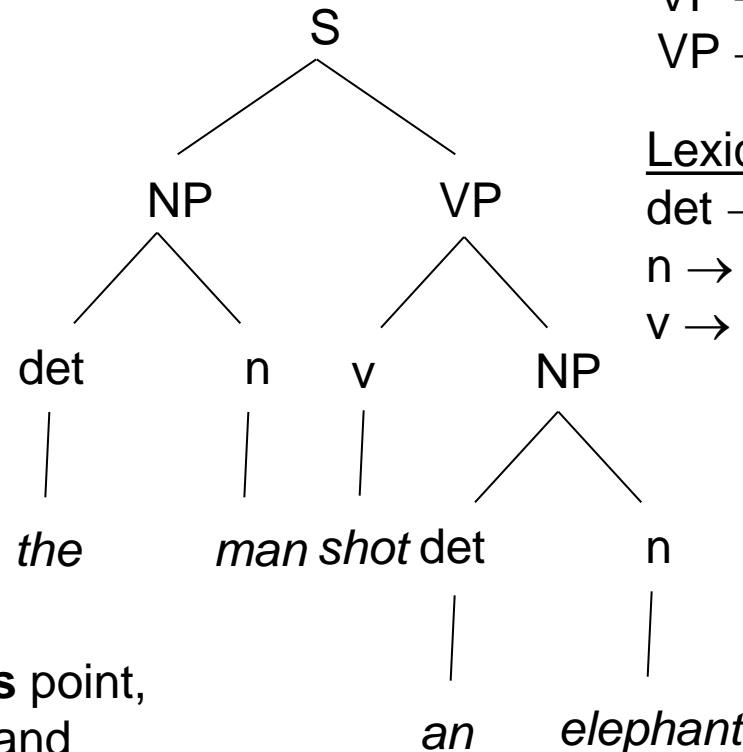
VP → v NP

Lexicon

det → {an, the}

n → {elephant, man, shot}

v → shot



Same as before: at **this** point, we are looking for a v, and *shot* fits the bill; the n reading never comes into play

## 4. Bottom-up with lexical ambiguity

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man, shot*}

v  $\rightarrow$  *shot*

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v

VP  $\rightarrow$  v NP

S  $\rightarrow$  NP VP

S  $\rightarrow$  NP VP

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v

VP  $\rightarrow$  v NP

Lexicon

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man, shot*}

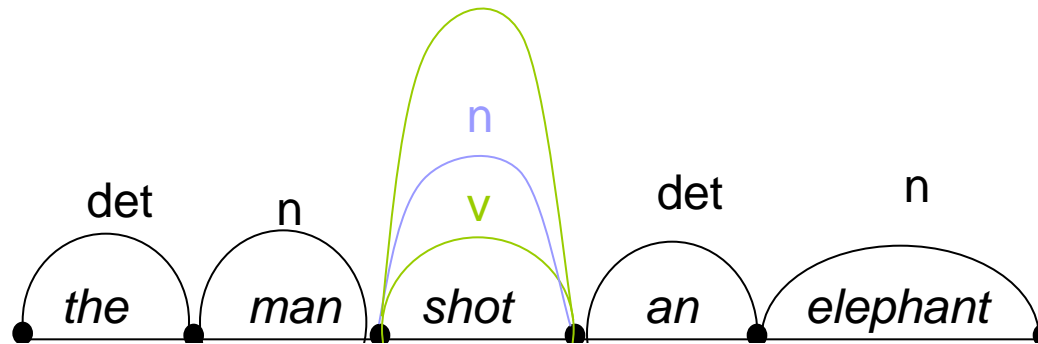
v  $\rightarrow$  *shot*

Terminology:

graph

nodes

arcs (edges)



## 4. Bottom-up with lexical ambiguity

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man, shot*}

v  $\rightarrow$  *shot*

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v

VP  $\rightarrow$  v NP

S  $\rightarrow$  NP VP

S  $\rightarrow$  NP VP

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v

VP  $\rightarrow$  v NP

Lexicon

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man, shot*}

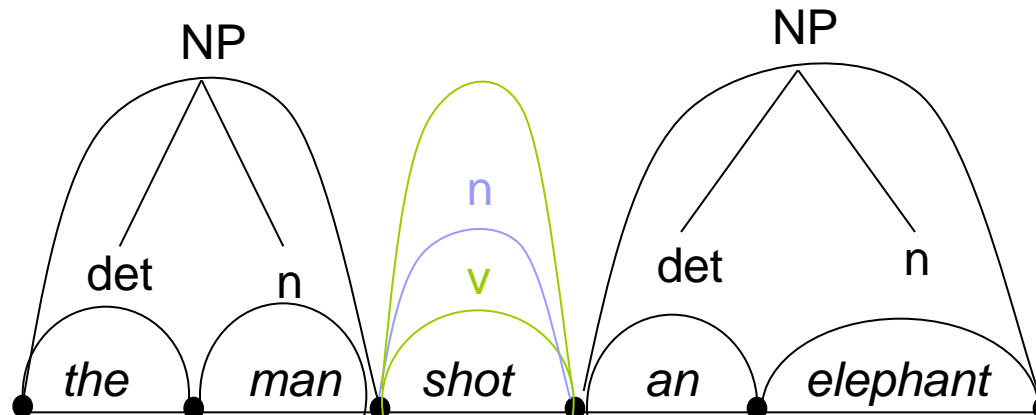
v  $\rightarrow$  *shot*

Terminology:

graph

nodes

arcs (edges)





# 4. Bottom-up with lexical ambiguity

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man, shot*}

v  $\rightarrow$  *shot*

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v

VP  $\rightarrow$  v NP

S  $\rightarrow$  NP VP

S  $\rightarrow$  NP VP

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v

VP  $\rightarrow$  v NP

### Lexicon

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man, shot*}

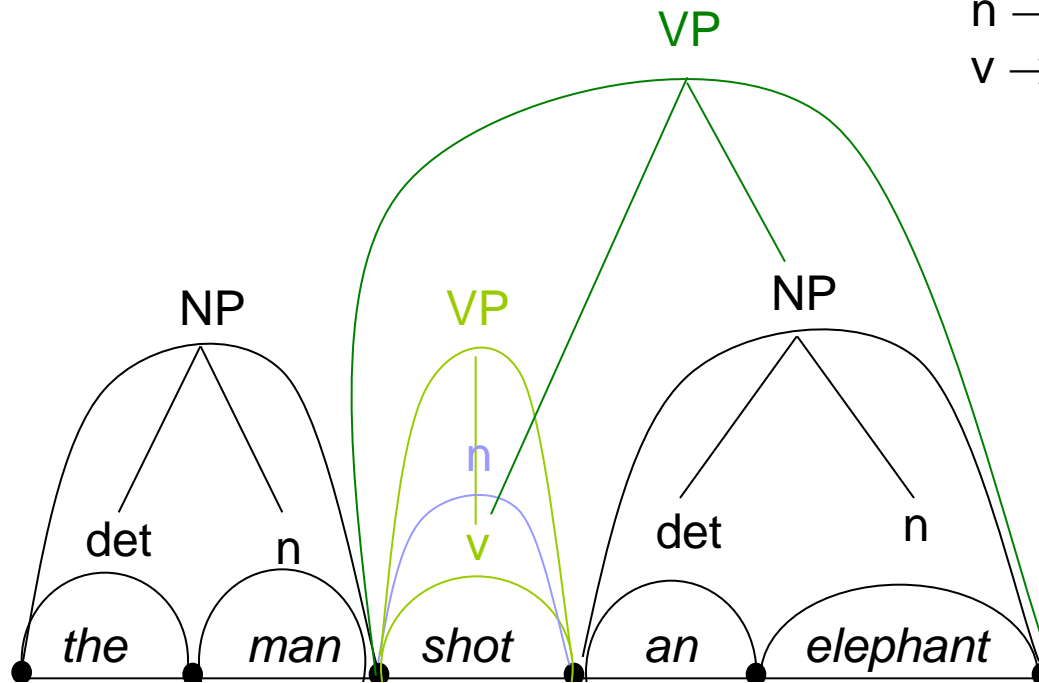
v  $\rightarrow$  *shot*

Terminology:

graph

nodes

arcs (edges)



# 4. Bottom-up with lexical ambiguity

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man, shot*}

v  $\rightarrow$  *shot*

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v

VP  $\rightarrow$  v NP

S  $\rightarrow$  NP VP

S  $\rightarrow$  NP VP

NP  $\rightarrow$  det n

VP  $\rightarrow$  v

VP  $\rightarrow$  v NP

### Lexicon

det  $\rightarrow$  {*an, the*}

n  $\rightarrow$  {*elephant, man, shot*}

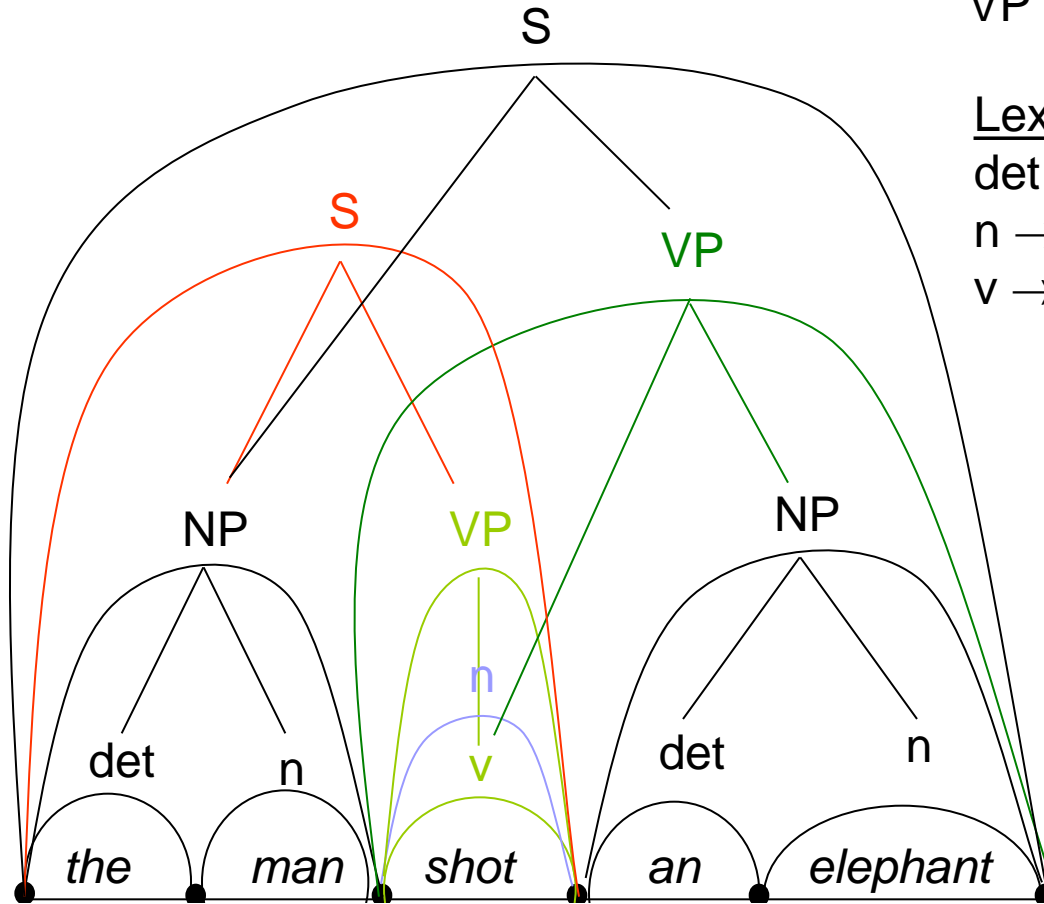
v  $\rightarrow$  *shot*

Terminology:

graph

nodes

arcs (edges)

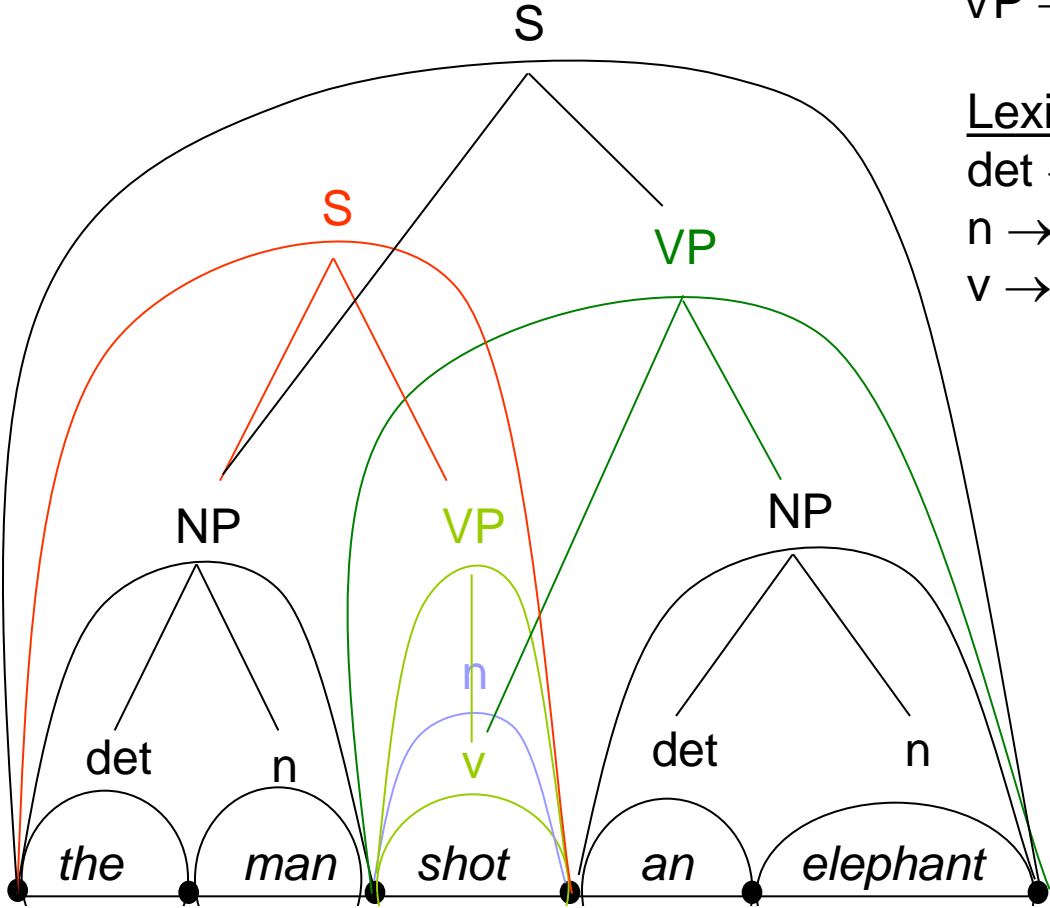


# 4. Bottom-up with lexical ambiguity

Let's get rid of all the unused arcs

- $S \rightarrow NP VP$
- $NP \rightarrow det n$
- $VP \rightarrow v$
- $VP \rightarrow v NP$

- Lexicon
- $det \rightarrow \{an, the\}$
  - $n \rightarrow \{elephant, man, shot\}$
  - $v \rightarrow shot$



# 4. Bottom-up with lexical ambiguity

Let's get rid of all the unused arcs

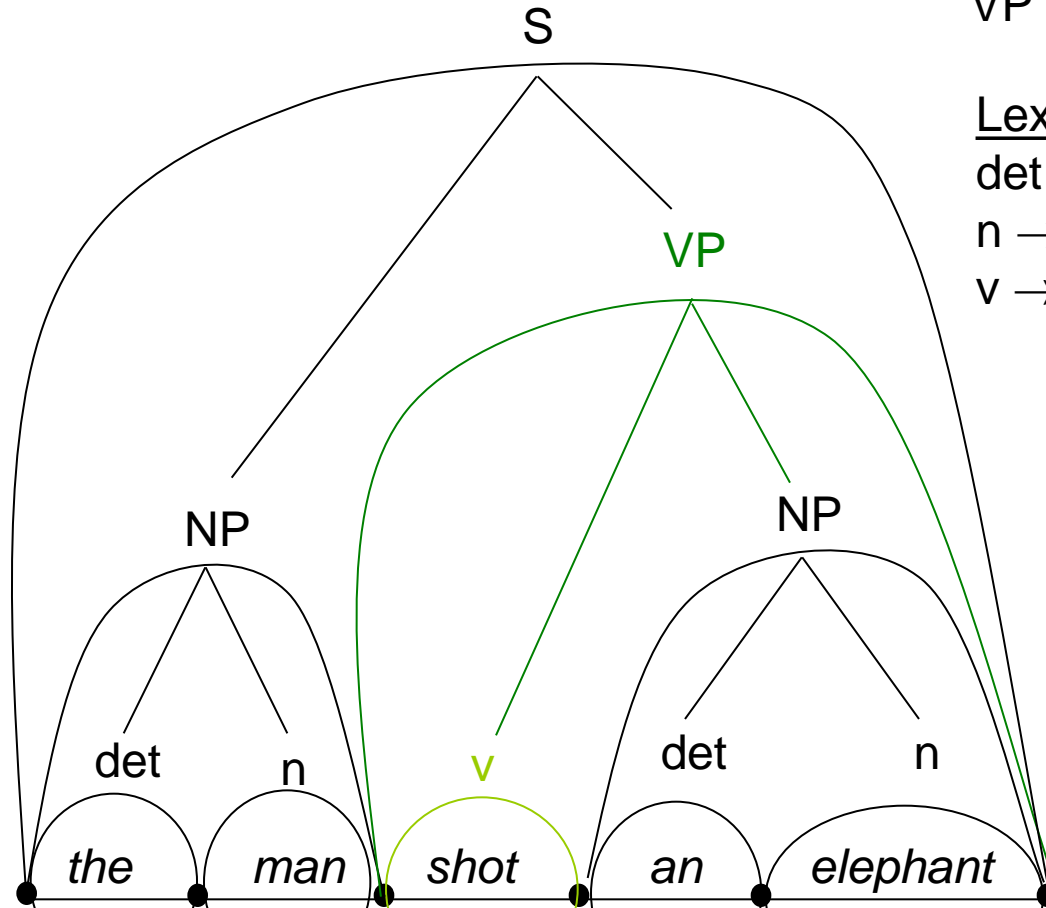
- $S \rightarrow NP VP$
- $NP \rightarrow det n$
- $VP \rightarrow v$
- $VP \rightarrow v NP$

### Lexicon

$det \rightarrow \{an, the\}$

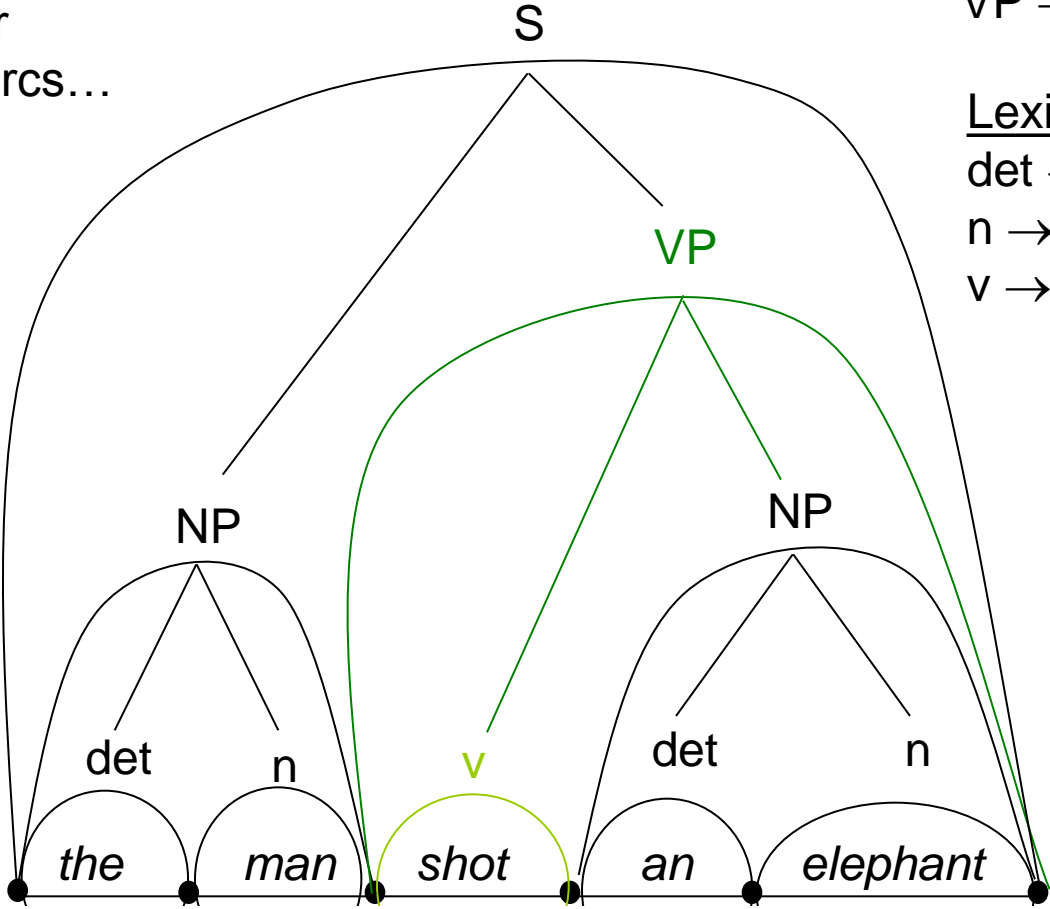
$n \rightarrow \{elephant, man, shot\}$

$v \rightarrow shot$



# 4. Bottom-up with lexical ambiguity

And let's clear away all the arcs...

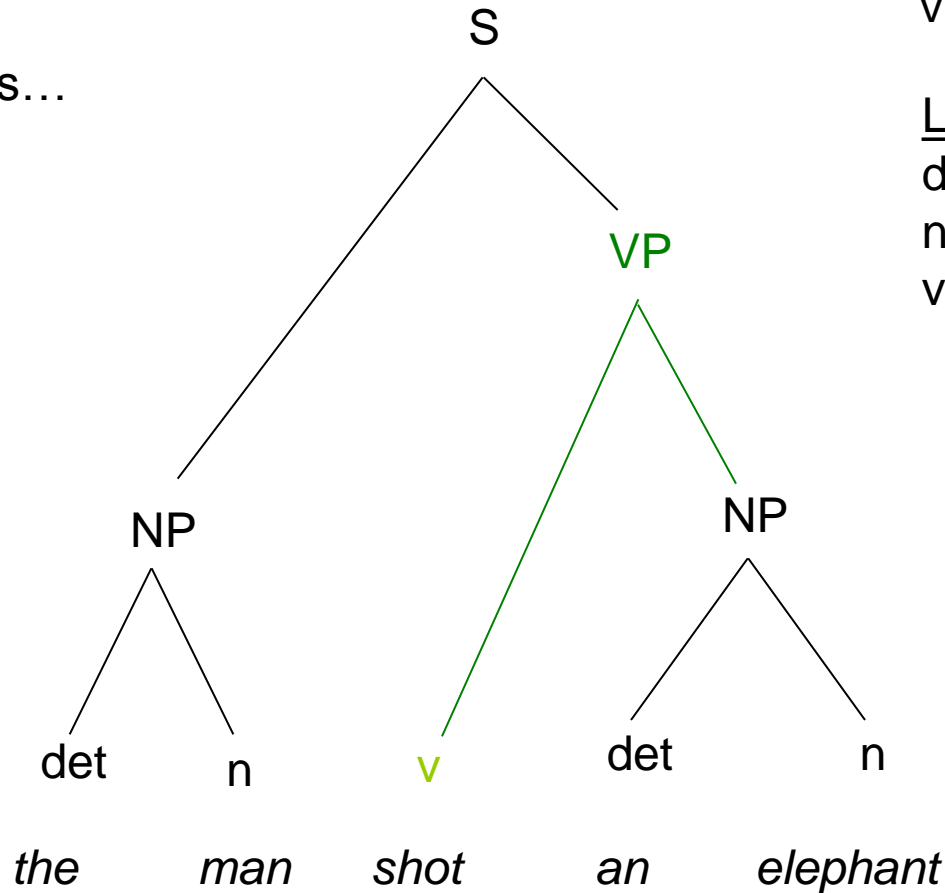


S → NP VP  
NP → det n  
VP → v  
VP → v NP

Lexicon  
det → {an, the}  
n → {elephant, man, shot}  
v → shot

## 4. Bottom-up with lexical ambiguity

And let's clear  
away all the arcs...



$S \rightarrow NP VP$

$NP \rightarrow det n$

$VP \rightarrow v$

$VP \rightarrow v NP$

Lexicon

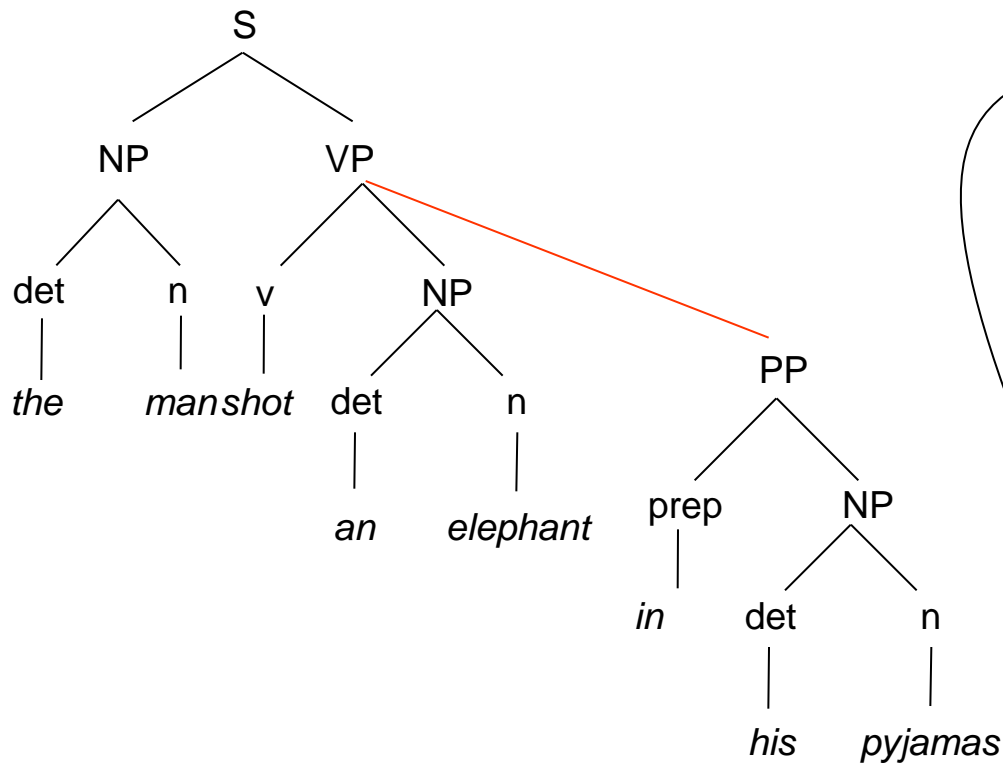
$det \rightarrow \{an, the\}$

$n \rightarrow \{elephant, man, shot\}$

$v \rightarrow shot$

# Same again but with structural ambiguity

*the man shot an elephant in his pyjamas* [remember: Catalan numbers!]



- S → NP VP
- NP → det n
- NP → det n PP
- VP → v
- VP → v NP
- VP → v NP PP
- PP → prep NP

## Lexicon

det → {*an, the, his*}

n → {*elephant, man, shot, pyjamas*}

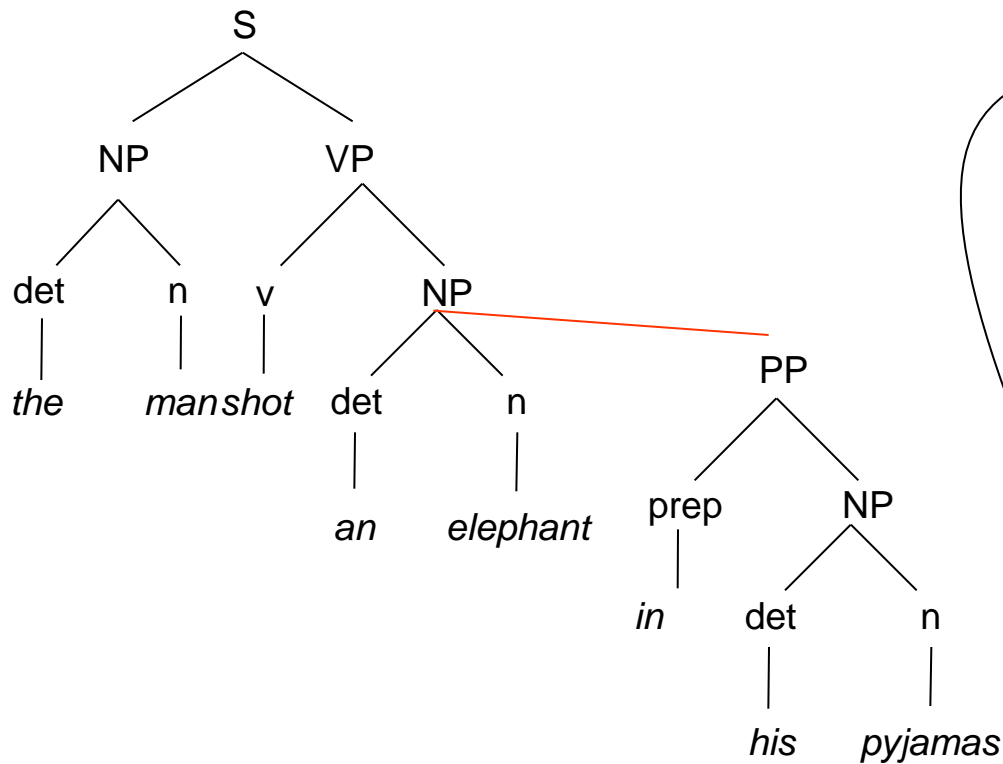
v → *shot*

prep → *in*

We introduce a PP rule in two places

# Same again but with structural ambiguity

*the man shot an elephant in his pyjamas*



- S → NP VP
- NP → det n
- NP → det n PP
- VP → v
- VP → v NP
- VP → v NP PP
- PP → prep NP

## Lexicon

- det → {*an, the, his*}
- n → {*elephant, man, shot, pyjamas*}
- v → *shot*
- prep → *in*

We introduce a PP rule in two places



# 5. Top-down with structural ambiguity

~~the man~~ shot an elephant in his pyjamas

S → NP VP

NP → det n

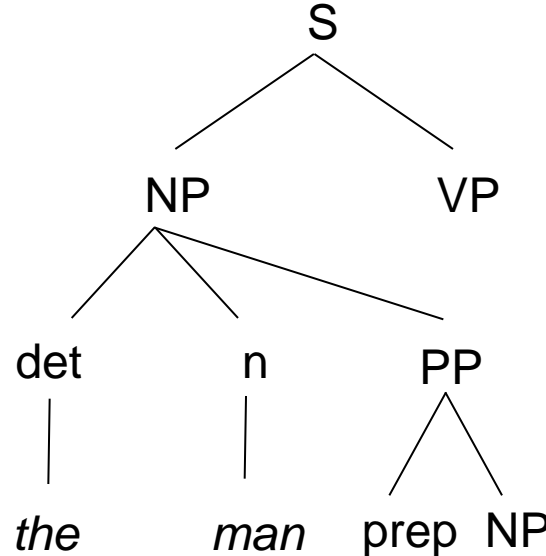
~~NP → det n PP~~

det → {an, the, his}

n → {elephant, man, shot, pyjamas}

PP → prep NP

prep → in



S → NP VP

NP → det n

NP → det n PP

VP → v

VP → v NP

VP → v NP PP

PP → prep NP

The next word, *shot*, isn't a prep,  
So this rule simply fails

At this point, depending on our strategy (breadth-first vs. depth-first) we may consider the NP complete and look for the VP, or we may try the second NP rule.

Let's see what happens in the latter case.

# 5. Top-down with structural ambiguity

~~the man shot an elephant in his pyjamas~~

S → NP VP

NP → det n

~~NP → det n PP~~

det → {an, the, his}

n → {elephant, man, shot, pyjamas}

~~VP → v~~

~~VP → v NP~~

VP → v NP PP

v → shot

~~NP → det n~~

NP → det n PP

det → {an, the, his}

n → {elephant, man, shot, pyjamas}

S → NP VP

NP → det n

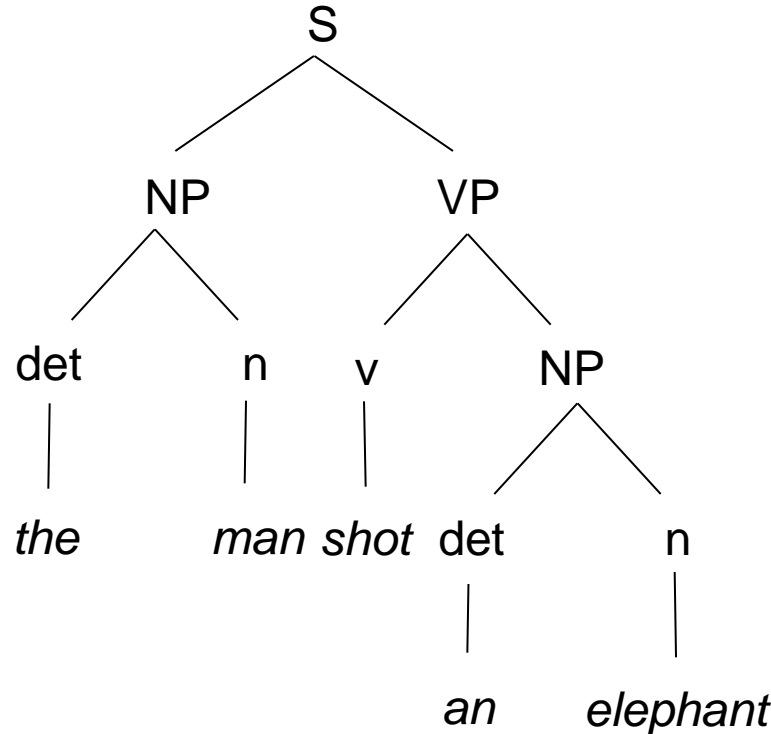
NP → det n PP

VP → v

VP → v NP

VP → v NP PP

PP → prep NP



As before, the first VP rule works,  
 But does not account for all the input.  
 Similarly, if we try the second VP rule, and the  
 first NP rule ...

# 5. Top-down with structural ambiguity

~~the man shot an elephant in his pyjamas~~

S → NP VP

NP → det n

~~NP → det n PP~~

det → {*an, the, his*}

n → {*elephant, man, shot, pyjamas*}

~~VP → v~~

~~VP → v NP~~

VP → v NP PP

v → *shot*

~~NP → det n~~

NP → det n PP

S → NP VP

NP → det n

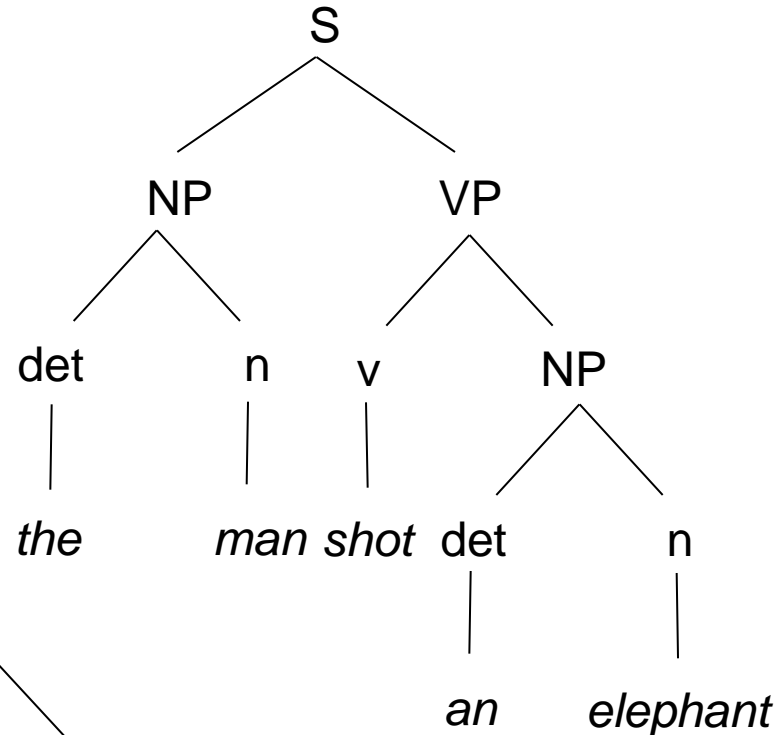
NP → det n PP

VP → v

VP → v NP

VP → v NP PP

PP → prep NP



So what do we try next?

This?

Or this?

# 5. Top-down with structural ambiguity (depth-first)

~~the man shot an elephant in his pyjamas~~

- S → NP VP
- NP → det n
- NP → det n PP
- VP → v
- VP → v NP
- VP → v NP PP
- PP → prep NP

S → NP VP

NP → det n

~~NP → det n PP~~

det → {*an, the, his*}

n → {*elephant, man, shot, pyjamas*}

~~VP → v~~

VP → v NP

VP → v NP PP

v → *shot*

~~NP → det n~~

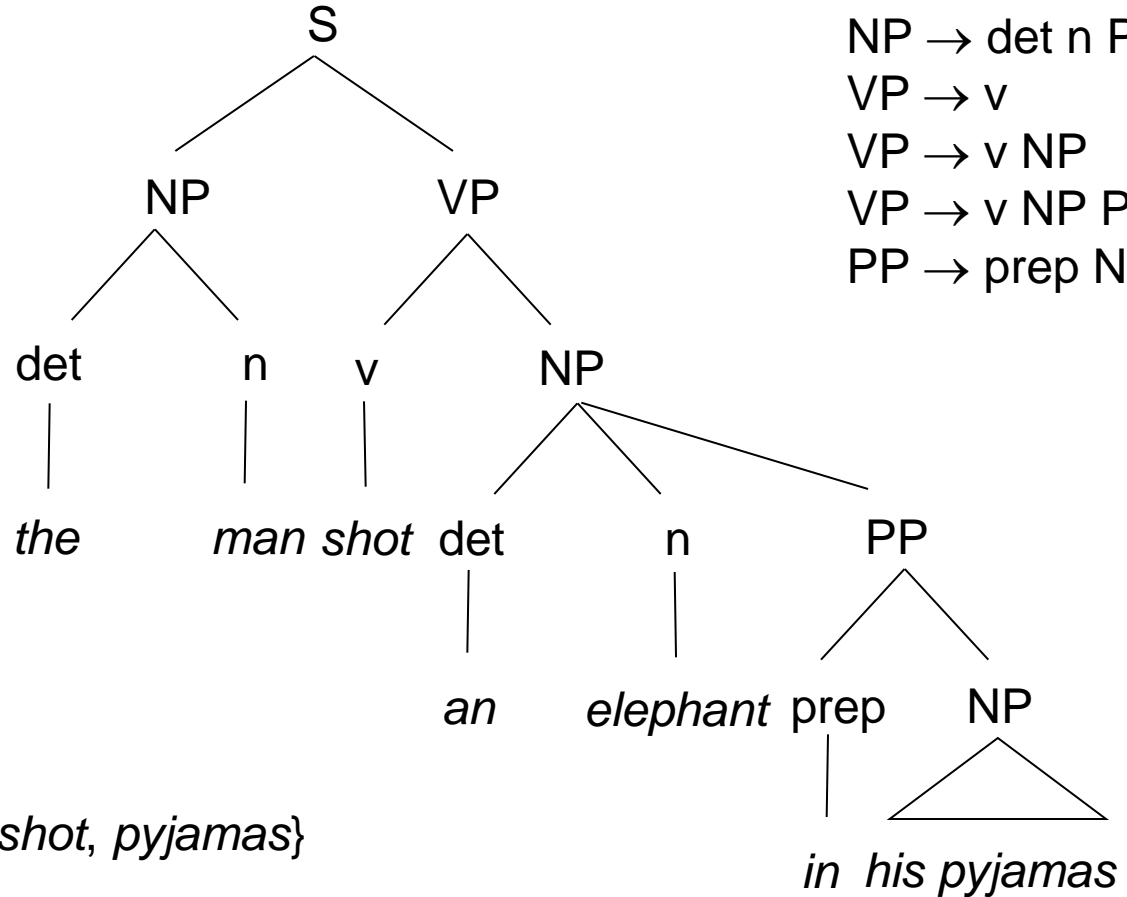
NP → det n PP

det → {*an, the, his*}

n → {*elephant, man, shot, pyjamas*}

PP → prep NP

prep → *in*



# 5. Top-down with structural ambiguity (breadth-first)

~~the man shot an elephant in his pyjamas~~

- S → NP VP
- NP → det n
- NP → det n PP
- VP → v
- VP → v NP
- VP → v NP PP
- PP → prep NP

S → NP VP

NP → det n

~~NP → det n PP~~

det → {an, the, his}

n → {elephant, man, shot, pyjamas}

~~VP → v~~

~~VP → v NP~~

VP → v NP PP

v → shot

NP → det n

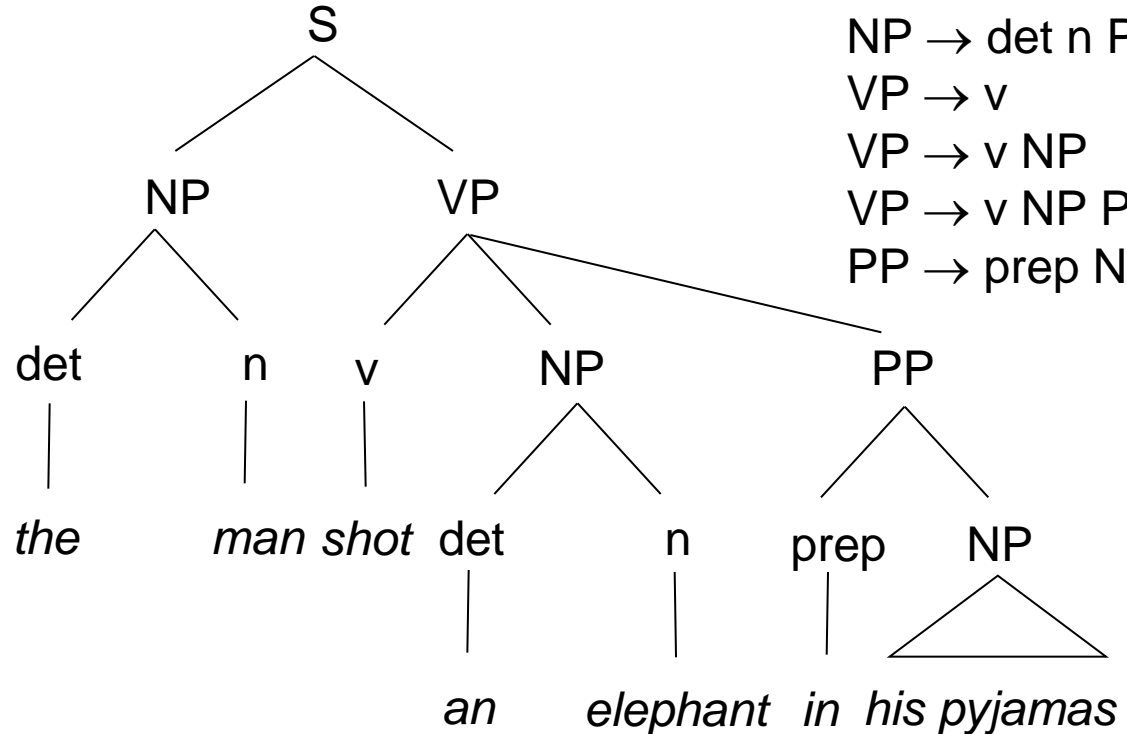
NP → det n PP

det → {an, the, his}

n → {elephant, man, shot, pyjamas}

PP → prep NP

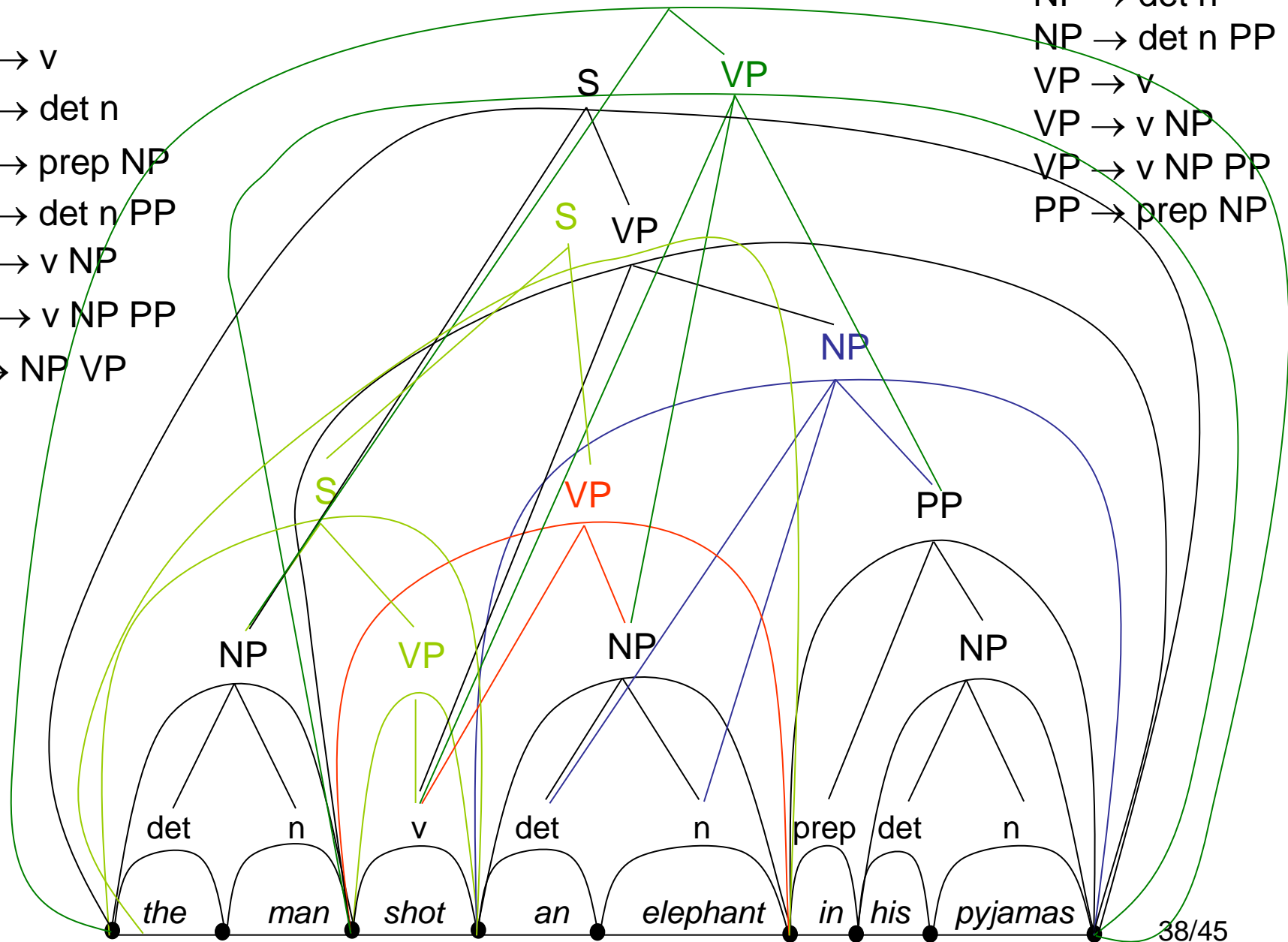
prep → in



# 6. Bottom-up with structural ambiguity

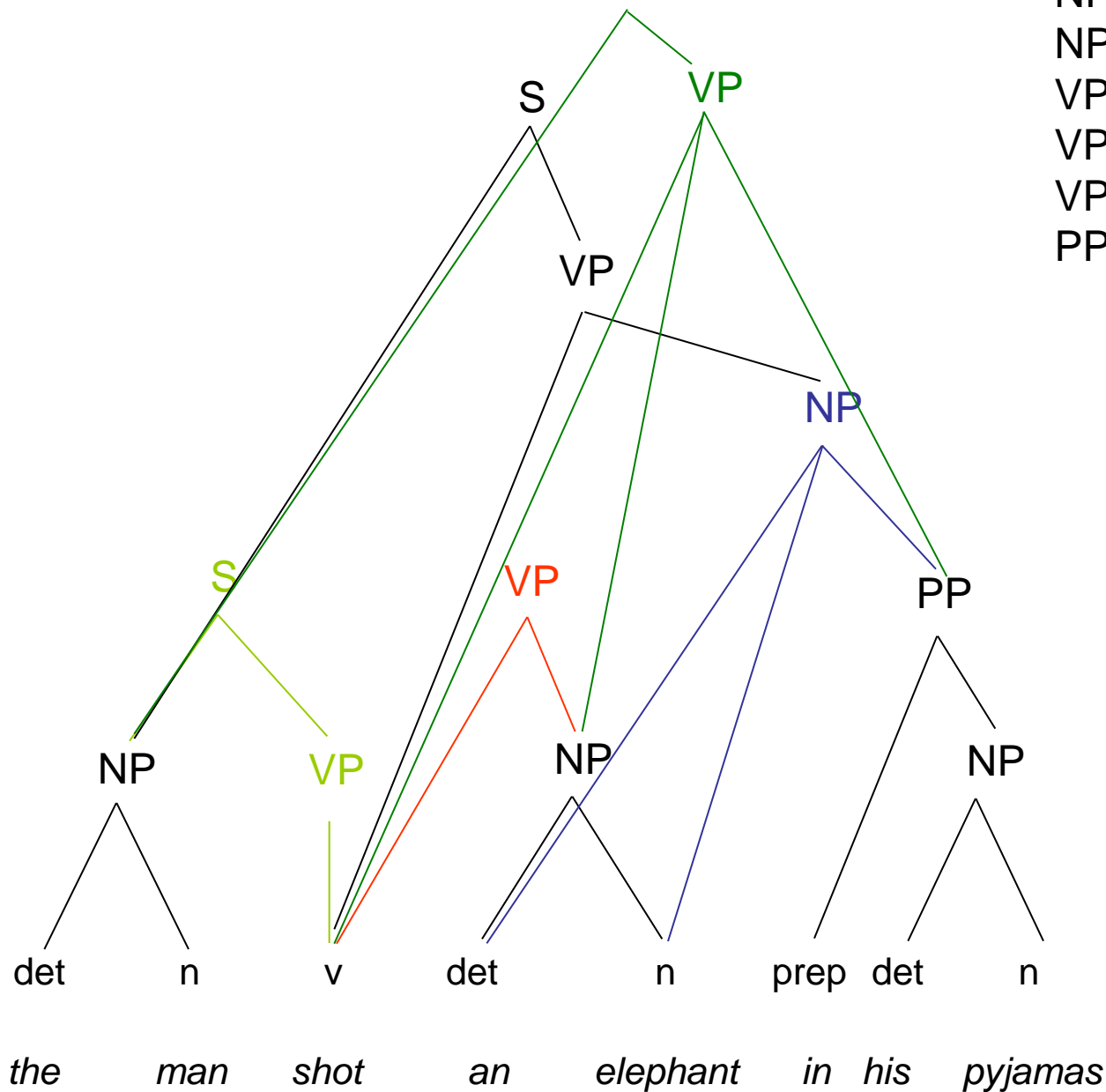
- VP → v
- NP → det n
- PP → prep NP
- NP → det n PP
- VP → v NP
- VP → v NP PP
- S → NP VP

- S → NP VP
- NP → det n
- NP → det n PP
- VP → v
- VP → v NP
- VP → v NP PP
- PP → prep NP



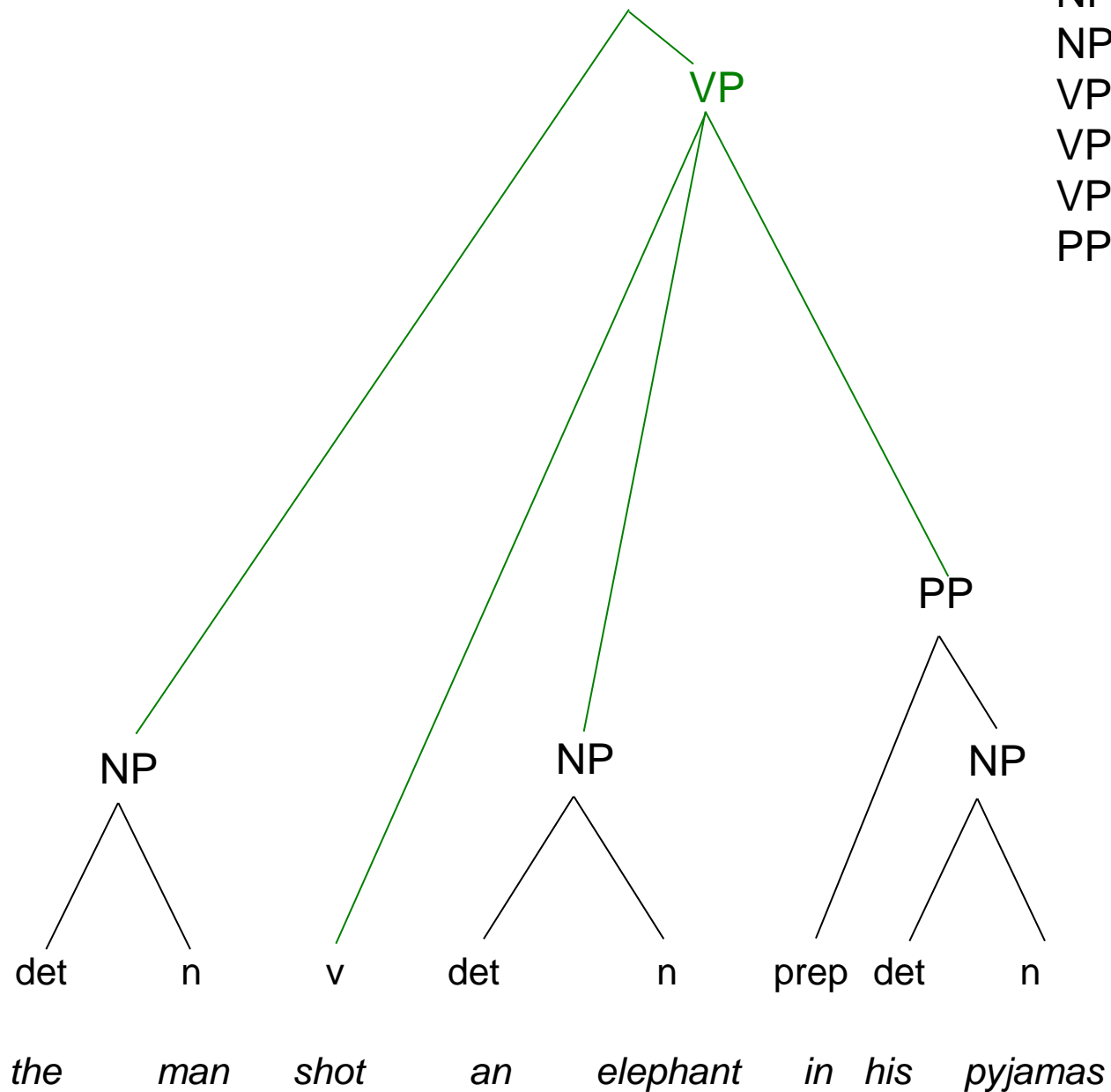
# 6. Bottom-up with structural ambiguity

- S → NP VP
- NP → det n
- NP → det n PP
- VP → v
- VP → v NP
- VP → v NP PP
- PP → prep NP



## 6. Bottom-up with structural ambiguity

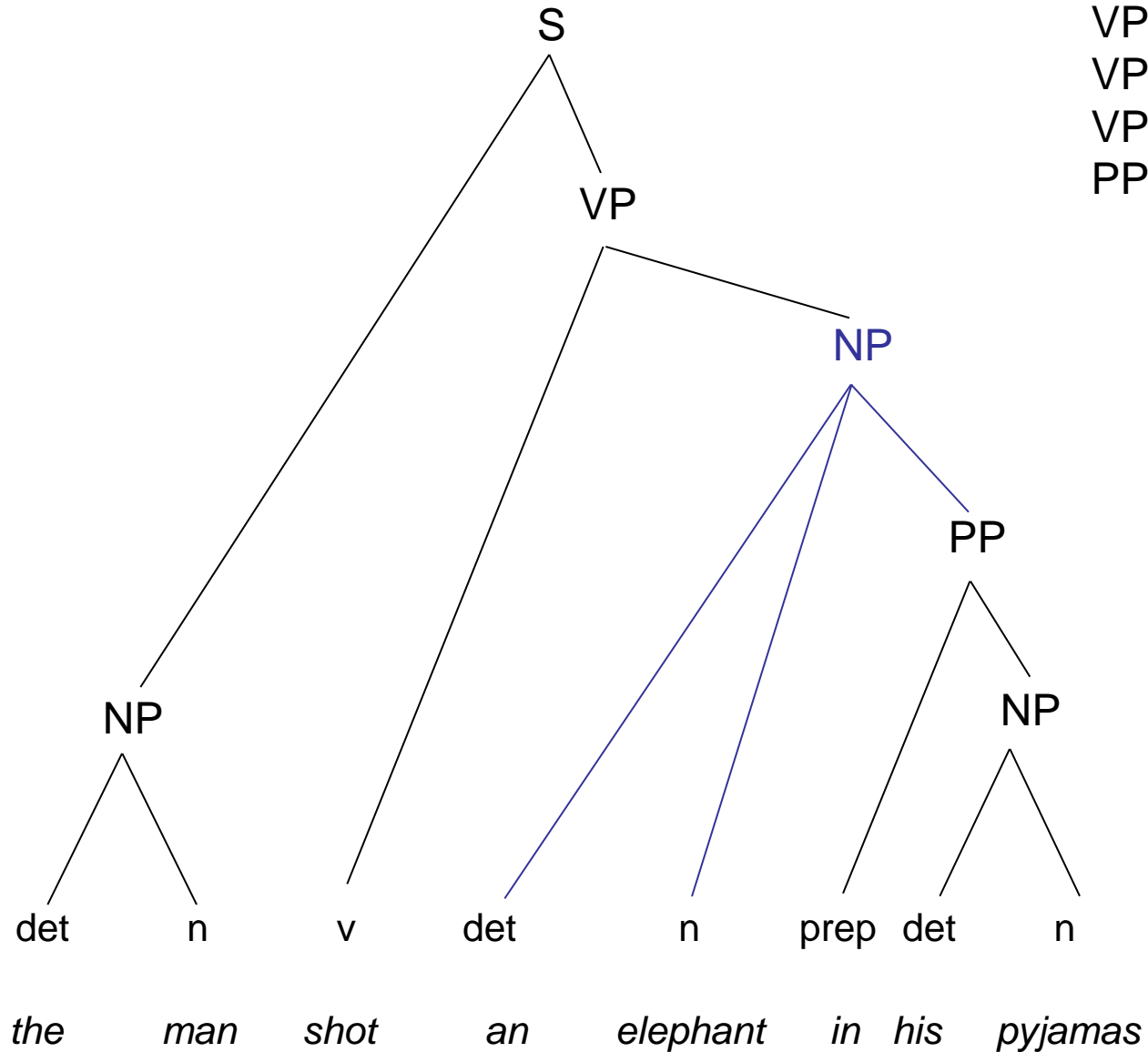
- $S \rightarrow NP VP$
- $NP \rightarrow det n$
- $NP \rightarrow det n PP$
- $VP \rightarrow v$
- $VP \rightarrow v NP$
- $VP \rightarrow v NP PP$
- $PP \rightarrow prep NP$





## 6. Bottom-up with structural ambiguity

S → NP VP  
NP → det n  
NP → det n PP  
VP → v  
VP → v NP  
VP → v NP PP  
PP → prep NP



# Recursive rules

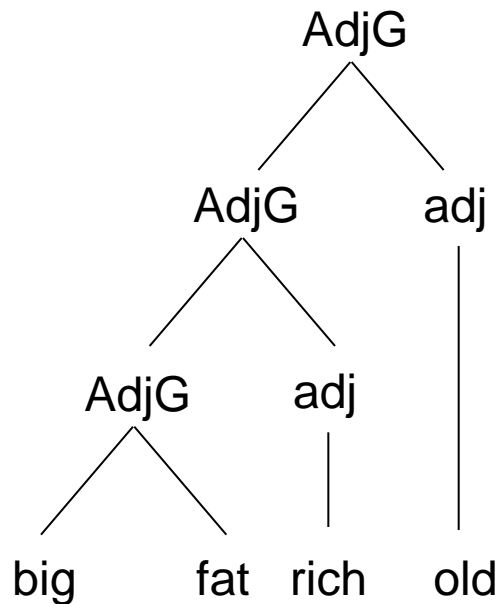
- “Recursive” rules call themselves
- We already have some recursive rule pairs:
  - NP → det n PP
  - PP → prep NP
- Rules can be immediately recursive
  - AdjG → adj AdjG
    - *(the) big fat ugly (man)*

# Recursive rules

## Left recursive

AdjG  $\rightarrow$  AdjG adj

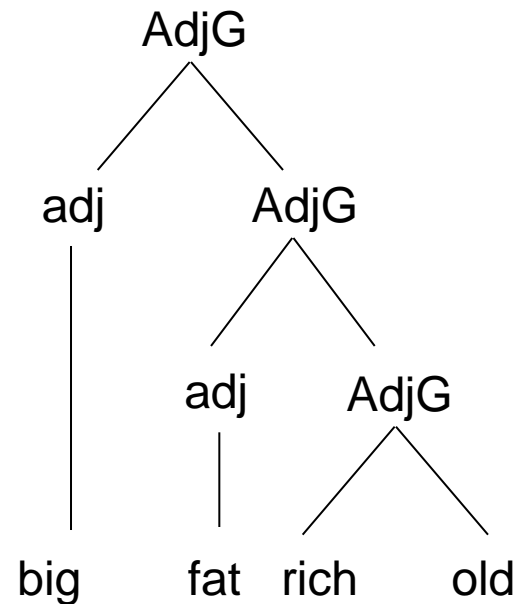
AdjG  $\rightarrow$  adj adj



## Right recursive

AdjG  $\rightarrow$  adj AdjG

AdjG  $\rightarrow$  adj adj

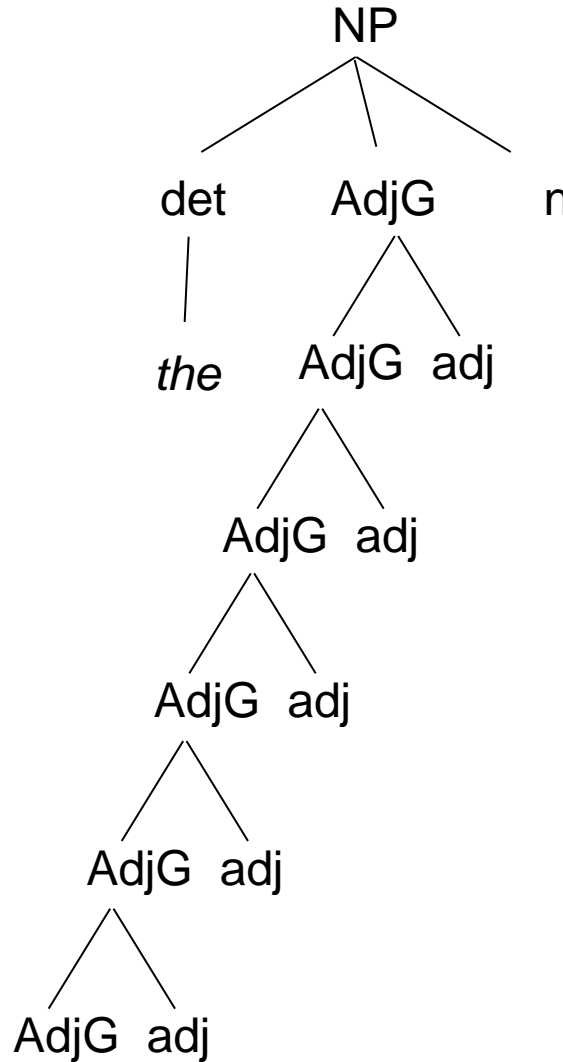


# 7. Top-down with left recursion

~~the~~ big fat rich old man

NP → det n  
NP → det AdjG n  
AdjG → AdjG adj  
AdjG → adj

~~NP → det n~~  
NP → det AdjG n  
AdjG → AdjG adj  
AdjG → adj



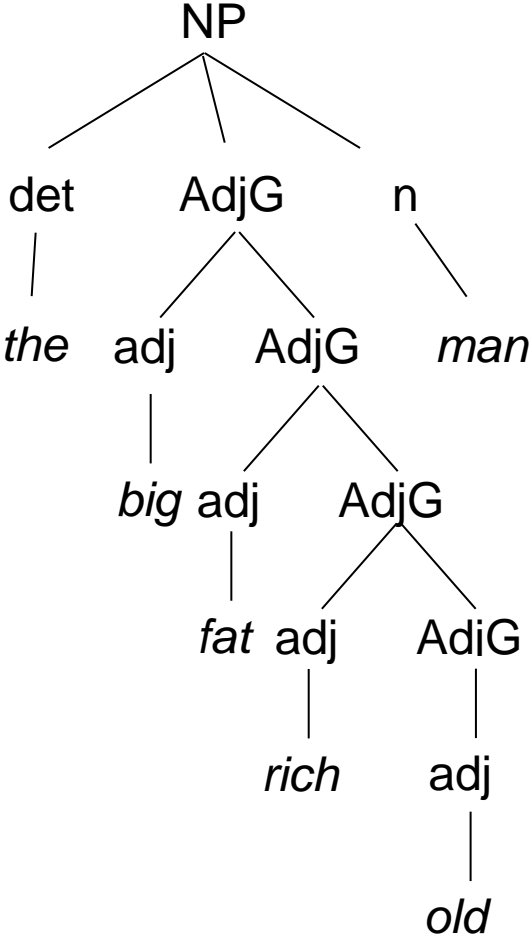
You can't have left-recursive rules with a top-down parser, even if the non-recursive rule is first

# 7. Top-down with right recursion

~~the big fat rich old man~~

~~NP → det n~~  
 NP → det AdjG n  
 AdjG → adj AdjG  
 AdjG → adj

NP → det n  
 NP → det AdjG n  
 AdjG → adj AdjG  
 AdjG → adj



# 8. Bottom-up with left and right recursion

AdjG → adj

AdvG → adv

AdjG → AdvG adj AdjG

AdvG → AdvG adv

AdjG → AdvG adj AdjG

NP → det AdjG n

NP → det n

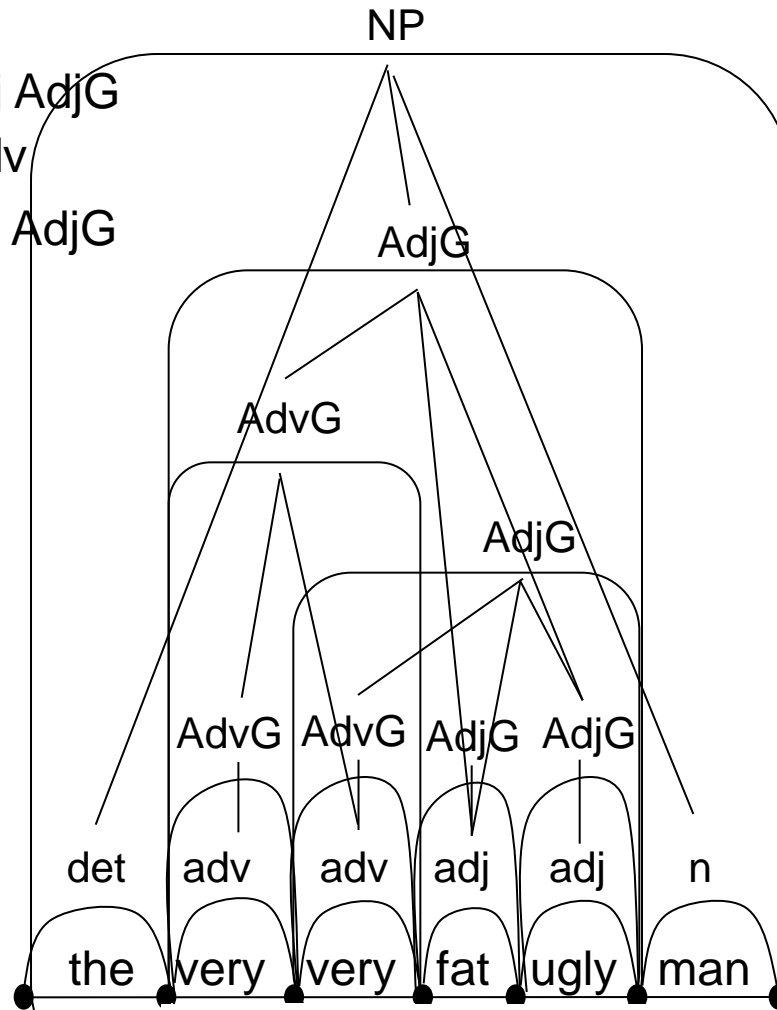
NP → det AdjG n

AdjG → AdvG adj AdjG

AdjG → adj

AdvG → AdvG adv

AdvG → adv



AdjG rule is right recursive,  
AdvG rule is left recursive

Quite a few useless paths, but overall no difficulty

## 8. Bottom-up with left and right recursion

AdjG  $\rightarrow$  adj

AdvG  $\rightarrow$  adv

AdjG  $\rightarrow$  AdvG adj AdjG

AdvG  $\rightarrow$  AdvG adv

AdjG  $\rightarrow$  AdvG adj AdjG

NP  $\rightarrow$  det AdjG n

NP  $\rightarrow$  det n

NP  $\rightarrow$  det AdjG n

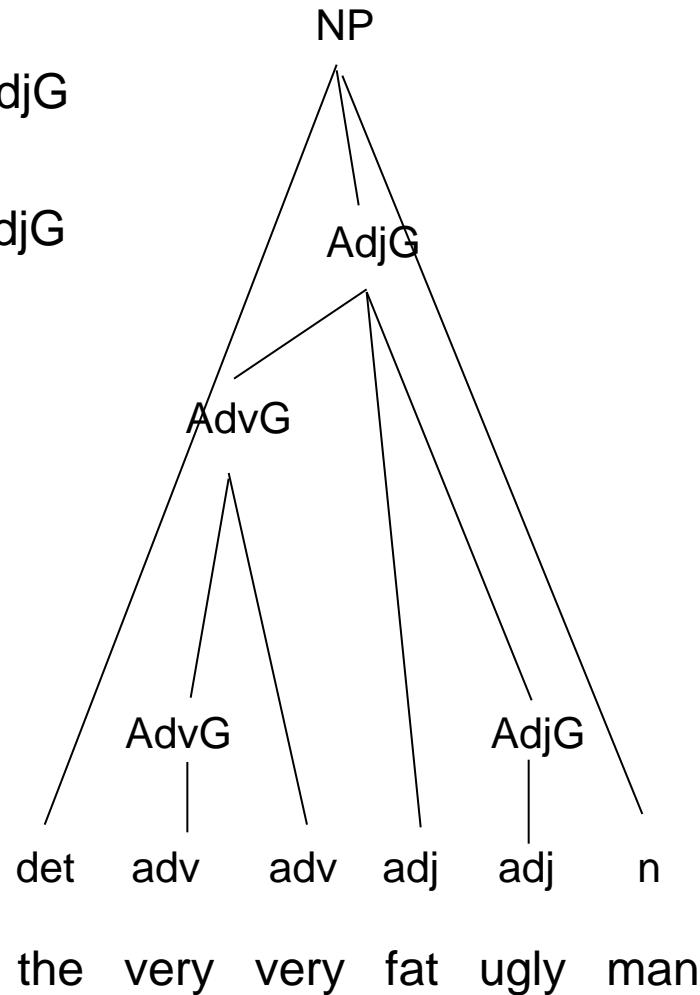
AdjG  $\rightarrow$  AdvG adj AdjG

AdjG  $\rightarrow$  adj

AdvG  $\rightarrow$  AdvG adv

AdvG  $\rightarrow$  adv

AdjG rule is right recursive,  
AdvG rule is left recursive



# Top down vs. bottom-up

- Bottom-up builds many useless trees
- Top-down can propose false trails, sometimes quite long, which are only abandoned when they reach the word level
  - Especially a problem if breadth-first
- Top-down CANNOT handle left-recursion
- Top-down cannot do partial parsing
  - Especially useful for speech
- Wouldn't it be nice to combine them to get the advantages of both?



# Left-Corner-Parsing – Basic Idea

- Left-corner combines bottom-up and top-down strategies in the following sense.
- Given a rule:  $k_0 \rightarrow k_1 k_2 \dots k_n$
- Normal bottom-up: all  $k_1$  to  $k_n$  must be recognized before applying the rule
- Left-corner: it suffices that  $k_1$  is recognized
- $k_2$  to  $k_n$  and the dominating nodes of  $k_1$  are **predicted** top-down

# Left-Corner Relation– Formally

- We define the relation  $\angle$  between nonterminals such that  $B\angle A$  if and only if there is a rule  $A \rightarrow B\alpha$ , where  $\alpha$  denotes some sequence of grammar symbols.
- The transitive and reflexive closure of  $\angle$  is denoted by  $\angle^*$ , which is called the **left-corner** relation.
- Informally, we have that  $B\angle^*A$  if and only if it is possible to have a spine in some parse tree in which B occurs below A (or  $B = A$ ).
- Possible left corners of all non-terminal categories can be determined in advance and placed in a table.

# Left-Corner Relation– Table

S → NP VP

NP → det n

VP → v

VP → v NP

## Lexicon

det → {*an, the, his*}

n → {*elephant, man,*  
*shot, pyjamas*}

v → *shot*

Cat	Left Corners
S	NP, det, <i>an, the, his</i>
NP	det, <i>an, the, his</i>
VP	v, <i>shot</i>

# Left-Corner-Parsing – Algorithm

To parse a constituent of type  $C$ :

- ① Accept a word  $W$  from input and determine  $K$ , its category.
- ② Complete  $C$ :
  - If  $K=C$ , exit with success; otherwise
  - Find a constituent whose expansion begins with  $K$ . Call that  $CC$ . For instance, if  $K = \mathbf{det}$ ,  $CC$  could be  $\mathbf{NP}$  since we have rule  $\mathbf{NP} \rightarrow \mathbf{det} n$
  - Recursively left-corner parse all the remaining elements of the expansion of  $CC$  (in this case,  $n$ ).
  - Put  $CC$  in place of  $K$ , and return to step 2