

# Compiler I: Grundlagen

## Compile-Fluß und Front-End

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen  
Informatik, TU Darmstadt

Wintersemester 2011/12

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## **Programming Language Processors in Java** von David Watt und Deryck Brown, Prentice-Hall 2000

- Ist Bestandteil der Buchaktion der Fachschaft
- Bestellmodalitäten auf [www.d120.de](http://www.d120.de)

# Kompilierung

## Terminologie: Phase

- Transformationsschritte
  - Von Quellcode
  - ... zum Maschinencode
- Entspricht häufig den Teilen der Sprachspezifikation
  - 1 Syntax → Syntaxanalyse
  - 2 Kontextuelle Einschränkungen → Kontextanalyse
  - 3 Semantik → Codegenerierung

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Terminologie: Phase

- Transformationsschritte
  - Von Quellcode
  - ... zum Maschinencode
- Entspricht häufig den Teilen der Sprachspezifikation
  - 1 Syntax → Syntaxanalyse
  - 2 Kontextuelle Einschränkungen → Kontextanalyse
  - 3 Semantik → Codegenerierung

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

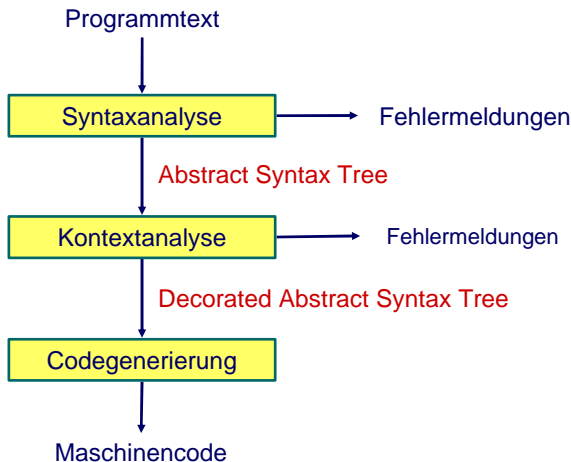
Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



## Terminologie: Durchgang (*pass*)

- Kompletter Durchgang des Programmes
- Läuft über Quelltext oder IR
- Pass *kann* Phase entsprechen
- ... muss aber nicht!
- Einzelner Pass kann mehrere Phasen durchführen
- Aufbau des Compilers wird von der Anzahl der Passes dominiert

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Terminologie: Durchgang (*pass*)

- Kompletter Durchgang des Programmes
- Läuft über Quelltext oder IR
- Pass *kann* Phase entsprechen
- ... muss aber nicht!
- Einzelner Pass kann mehrere Phasen durchführen
- Aufbau des Compilers wird von der Anzahl der Passes dominiert

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

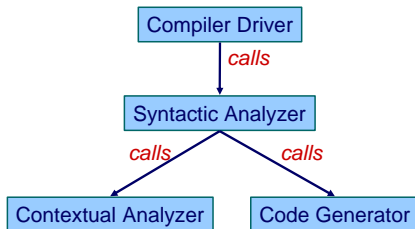
Konstruktion

ASTs

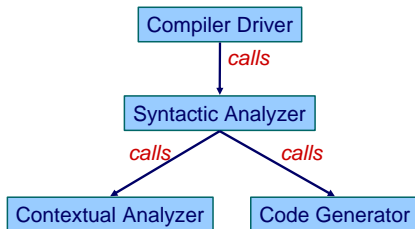
Scanning



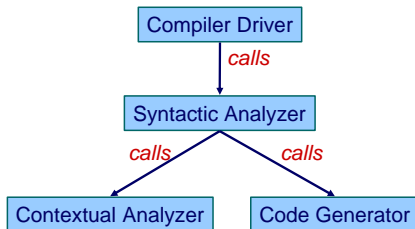
- Macht nur **einen** Pass über den Quelltext
  - Baut in der Regel **keine** echte IR auf
- Führt gleichzeitig aus
  - Syntaxanalyse (Parsing)
  - Kontextanalyse
  - Codegenerierung
- Pascal Compiler haben häufig Ein-Pass-Struktur



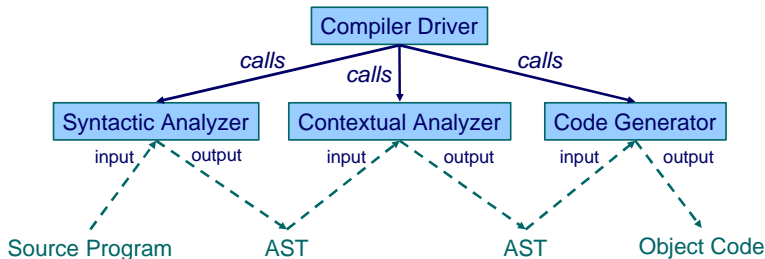
- Macht nur **einen** Pass über den Quelltext
  - Baut in der Regel **keine** echte IR auf
- Führt gleichzeitig aus
  - Syntaxanalyse (Parsing)
  - Kontextanalyse
  - Codegenerierung
- Pascal Compiler haben häufig Ein-Pass-Struktur



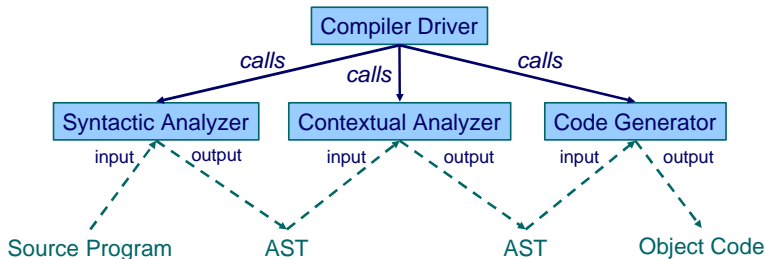
- Macht nur **einen** Pass über den Quelltext
  - Baut in der Regel **keine** echte IR auf
- Führt gleichzeitig aus
  - Syntaxanalyse (Parsing)
  - Kontextanalyse
  - Codegenerierung
- Pascal Compiler haben häufig Ein-Pass-Struktur



- Macht mehrere Passes über das Program
  - Quelltext und IR
- Datenweitergabe zwischen Passes über IR



- Macht mehrere Passes über das Program
  - Quelltext und IR
- Datenweitergabe zwischen Passes über IR



# Vergleich Ein-Pass ./ Multi-Pass-Compiler

	Ein-Pass	Multi-Pass
<b>Laufzeit</b>	+	-
<b>Speicher</b>	+ für große Prog.	+ für kleine Prog.
<b>Modularität</b>	-	+
<b>Flexibilität</b>	-	+
<b>Globale Optim.</b>	--	+
<b>Eingabesprachen</b>	Nicht für alle	

Müssen Bezeichner vor Verwendung  
deklariert werden?

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

Java-Kompilierung **erfordert** mehrere Passes

```
class Example {  
    void inc() { n = n + 1; }  
    int n;  
    void use() { n = 0; inc(); }  
}
```

Beachte Reihenfolge Verwendung/Bindung von **n**!

- Ein-Pass wäre für Triangle möglich
- Aus pädagogischen Gründen aber Multi-Pass

```
public class Compiler {
    public static void compileProgram(...) {

        Parser parser      = new Parser(...);
        Checker checker     = new Checker(...);
        Encoder generator = new Encoder(...);

        Program theAST = parser.parse();
        checker.check(theAST);
        generator.encode(theAST);
    }

    public void main(String[] args) {
        ...
        compileProgram(...)
    }
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

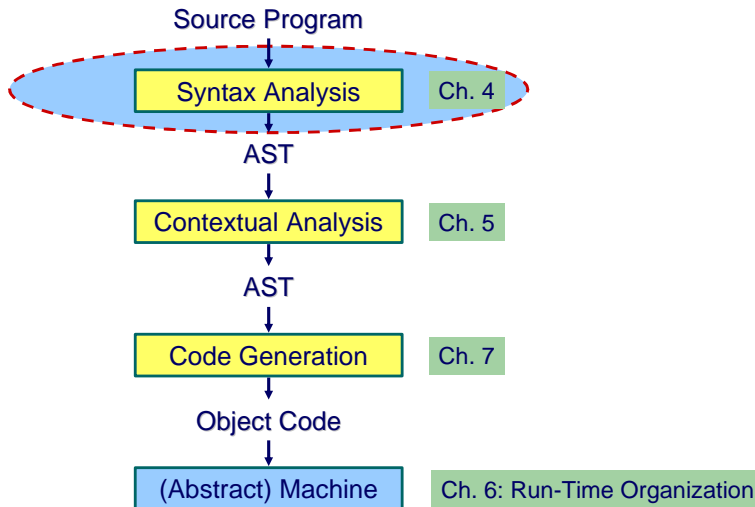
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning





OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

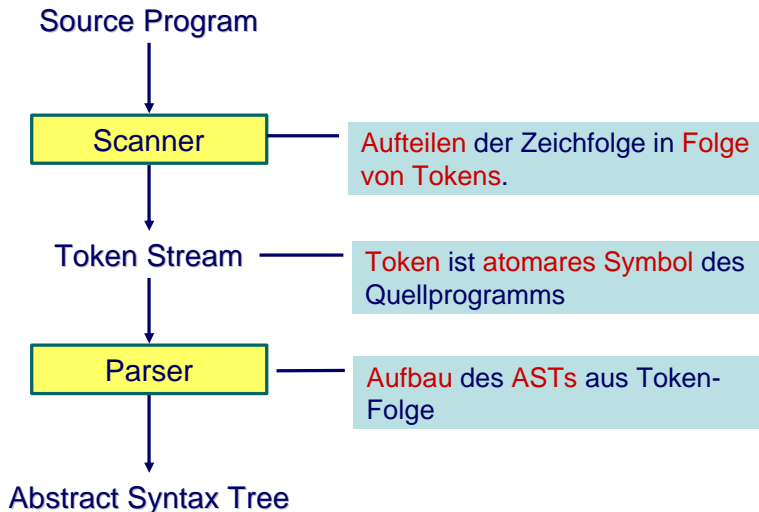
Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



## Beispielprogramm in Triangle

```
! Groesster Gemeinsamer Teiler
let func gcd(x: Integer, y: Integer) : Integer ~
  if x // y = 0          ! // -> Modulo
  then y
  else gcd(y, x // y);
in putint(gcd(321, 81))
```

Token-Folge: Ohne Leerzeichen, Zeilenvorschub und  
Kommentare

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Beispielprogramm in Triangle

```
! Groesster Gemeinsamer Teiler
let func gcd(x: Integer, y: Integer) : Integer ~
  if x // y = 0                ! // -> Modulo
  then y
  else gcd(y, x // y);
in  putint(gcd(321, 81))
```

Token-Folge: Ohne Leerzeichen, Zeilenvorschub und  
Kommentare

```
let func gcd ( x : Integer , y : Integer )
: Integer ~ Integer if x // y = 0 then y
else gcd ( y , x // y ) ; in putint ( gcd
( 321 , 81 ) )
```

- **Token** ist atomares Symbol des Programms
- Verwendet zwischen Scanner und Parser
- Kann auch aus mehreren Zeichen bestehen
- Zeichen selbst i.d.R. uninteressant, Ausnahmen:
  - Bezeichnernamen
  - Konstante Werte (Zahlen, Zeichen), sog. *Literale*
- ... Parser ist nur an der **Art** des Tokens interessiert

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- **Token** ist atomares Symbol des Programms
- Verwendet zwischen Scanner und Parser
- Kann auch aus mehreren Zeichen bestehen
- Zeichen selbst i.d.R. uninteressant, Ausnahmen:
  - Bezeichnernamen
  - Konstante Werte (Zahlen, Zeichen), sog. *Literale*
- ... Parser ist nur an der **Art** des Tokens interessiert

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- **Token** ist atomares Symbol des Programms
- Verwendet zwischen Scanner und Parser
- Kann auch aus mehreren Zeichen bestehen
- Zeichen selbst i.d.R. uninteressant, Ausnahmen:
  - Bezeichnernamen
  - Konstante Werte (Zahlen, Zeichen), sog. *Literale*
- ... Parser ist nur an der **Art** des Tokens interessiert

```
public class Token {  
    private byte kind;  
    private String spelling;  
  
    public Token(byte kind, String spelling) {  
        this.kind = kind;  
        this.spelling = spelling;  
    }  
}
```

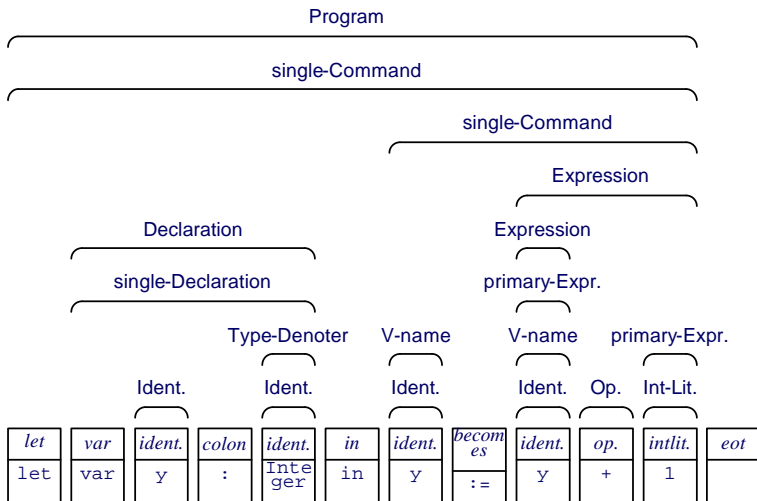
Unterschiedliche Token  
haben eindeutige Werte

```
public class Token {  
  
    ...  
  
    public static final byte  
        IDENTIFIER = 0,  
        INTLITERAL = 1,  
        OPERATOR = 2,  
        BEGIN = 3,  
        ...  
        EOT = 20; // end-of-text  
  
}
```

Beispiel: `t = new Token(Token.OPERATOR, "+");`



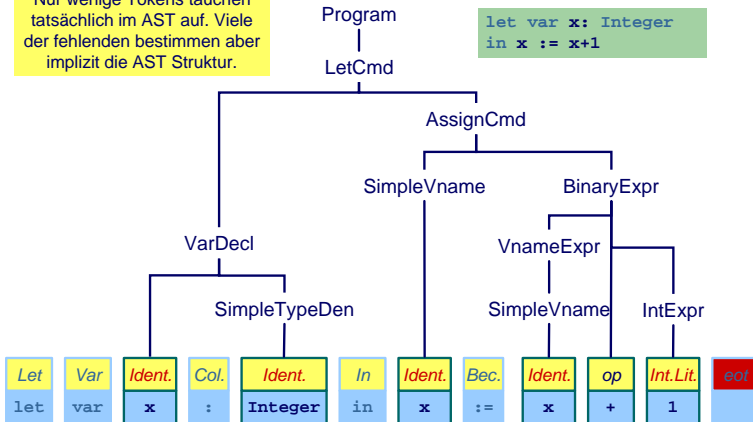
# Parsen der Token-Folge



# Aufbau des AST aus Token-Folge

Nur wenige Tokens tauchen tatsächlich im AST auf. Viele der fehlenden bestimmen aber implizit die AST Struktur.

```
let var x: Integer
in x := x+1
```



- Kontextfreie Grammatiken (CFG)
- Spezifiziert durch  $(N, T, P, S)$
- CFG definiert Menge von Zeichenketten
  - Elemente sind *Sätze* bestehend aus Terminalsymbolen
  - Gesamtmenge ist *Sprache* der CFG
- Hier: Sätze haben eindeutige Phrasenstruktur
- $P$  häufig in Backus-Naur-Form (BNF) angegeben
- Übersichtlicher: Extended BNF
  - BNF + Reguläre Ausdrücke auf rechter Seite der Produktionen

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Kontextfreie Grammatiken (CFG)
- Spezifiziert durch  $(N, T, P, S)$
- CFG definiert Menge von Zeichenketten
  - Elemente sind *Sätze* bestehend aus Terminalsymbolen
  - Gesamtmenge ist *Sprache* der CFG
- Hier: Sätze haben eindeutige Phrasenstruktur
- $P$  häufig in Backus-Naur-Form (BNF) angegeben
- Übersichtlicher: Extended BNF
  - BNF + Reguläre Ausdrücke auf rechter Seite der Produktionen

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

# Beispiel: Produktionen in EBNF

## BNF

```
Program ::= single-Command  
Command ::= single-Command  
          | Command ; single-Command  
....  
Expression ::= primary-Expression  
            | Expression operator primary-Expression
```



## EBNF

```
Command ::= single-Command ( ; single-Command ) *  
....  
Expression ::= primary-Expression  
              ( operator primary-Expression ) *
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Auch REs definieren eine Sprache
  - Reguläre Sprache
  - Weniger komplex als durch CFG beschreibbare Sprachen
- CFG erlaubt Beschreibung von Selbsteinbettung
  - Ausdruck  $a^*(b+c)/d$  bettet Ausdruck  $b+c$  ein
  - Vergleichbar dem Konzept der Rekursion
- REs erlauben **keine** Beschreibung von Selbsteinbettung

Ziel: Systematische Herleitung von Parseern aus CFG

- Auch REs definieren eine Sprache
  - **Reguläre Sprache**
  - Weniger komplex als durch CFG beschreibbare Sprachen
- CFG erlaubt Beschreibung von Selbsteinbettung
  - Ausdruck  $a^*(b+c)/d$  bettet Ausdruck  $b+c$  ein
  - Vergleichbar dem Konzept der Rekursion
- REs erlauben **keine** Beschreibung von Selbsteinbettung

Ziel: Systematische Herleitung von Parseern aus CFG

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Auch REs definieren eine Sprache
  - **Reguläre Sprache**
  - Weniger komplex als durch CFG beschreibbare Sprachen
- CFG erlaubt Beschreibung von Selbsteinbettung
  - Ausdruck  $a^*(b+c)/d$  bettet Ausdruck  $b+c$  ein
  - Vergleichbar dem Konzept der Rekursion
- REs erlauben **keine** Beschreibung von Selbsteinbettung

Ziel: Systematische Herleitung von Parsern aus CFG



## Hilfsmittel

- CFG kann transformiert (umgestellt) werden
- ... unter Beibehaltung der beschriebenen Sprache

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Zusammenfassen von Produktionen mit gleichem Nicht-Terminal auf linker Seite
  - *Left-Hand Side* (LHS), analog RHS

## Vor Transformation

$$S ::= X + S$$
$$S ::= X$$
$$S ::= \varepsilon$$

## Nach Gruppierung

$$S ::= X + S | X | \varepsilon$$

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Zusammenfassen von Produktionen mit gleichem Nicht-Terminal auf linker Seite
  - *Left-Hand Side* (LHS), analog RHS

## Vor Transformation

$$\mathbf{S} ::= \mathbf{X} + \mathbf{S}$$
$$\mathbf{S} ::= \mathbf{X}$$
$$\mathbf{S} ::= \varepsilon$$

## Nach Gruppierung

$$\mathbf{S} ::= \mathbf{X} + \mathbf{S} | \mathbf{X} | \varepsilon$$

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Zusammenfassen von Produktionen mit gleichem Nicht-Terminal auf linker Seite
  - *Left-Hand Side* (LHS), analog RHS

## Vor Transformation

$$\mathbf{S} ::= \mathbf{X} + \mathbf{S}$$
$$\mathbf{S} ::= \mathbf{X}$$
$$\mathbf{S} ::= \varepsilon$$

## Nach Gruppierung

$$\mathbf{S} ::= \mathbf{X} + \mathbf{S} | \mathbf{X} | \varepsilon$$

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Zusammenfassen von gleichen Anfängen in einer Produktion
- $\mathbf{X Y \mid X Z \rightarrow X(Y|Z)}$

Beispiel:

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Zusammenfassen von gleichen Anfängen in einer Produktion
- $X Y \mid X Z \rightarrow X(Y \mid Z)$

Beispiel:



```
cmd := if Expr then cmd  
      | if Expr then cmd else cmd
```

```
cmd := if Expr then cmd ( $\epsilon$  | else cmd)
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Linksrekursion in Produktion
  - $\mathbf{N ::= X \mid N Y}$
  - $L(\mathbf{N}) = \{\mathbf{X, XY, XYY, XYYY, XYYYY, \dots}\}$
- Ersetzung durch
  - $\mathbf{N ::= X(Y)^*}$

Beispiel:

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg


Konstruktion

ASTs

Scanning

- Linksrekursion in Produktion
  - $N ::= X \mid N Y$
  - $L(N) = \{X, XY, XYY, XYYY, XYYYY, \dots\}$
- Ersetzung durch
  - $N ::= X(Y)^*$

Beispiel:



```
Identifer ::= Letter
           | Identifier Letter
           | Identifier Digit
```

```
Identifer ::= Letter (Letter | Digit)*
```



## Vor Transformation

$$\mathbf{N} ::= \mathbf{X}_1 \mid \dots \mid \mathbf{X}_m \mid \mathbf{N} \mathbf{Y}_1 \mid \dots \mid \mathbf{N} \mathbf{Y}_n$$

## Nach Linksausklammern

$$\mathbf{N} ::= (\mathbf{X}_1 \mid \dots \mid \mathbf{X}_m) \mid (\mathbf{N}(\mathbf{Y}_1 \mid \dots \mid \mathbf{Y}_n))$$

## Nach Beseitigen der Linksrekursion

$$\mathbf{N} ::= (\mathbf{X}_1 \mid \dots \mid \mathbf{X}_m)(\mathbf{Y}_1 \mid \dots \mid \mathbf{Y}_n)^*$$

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Vor Transformation

$$\mathbf{N} ::= \mathbf{X}_1 \mid \dots \mid \mathbf{X}_m \mid \mathbf{N} \mathbf{Y}_1 \mid \dots \mid \mathbf{N} \mathbf{Y}_n$$

## Nach Linksausklammern

$$\mathbf{N} ::= (\mathbf{X}_1 \mid \dots \mid \mathbf{X}_m) \mid (\mathbf{N}(\mathbf{Y}_1 \mid \dots \mid \mathbf{Y}_n))$$

## Nach Beseitigen der Linksrekursion

$$\mathbf{N} ::= (\mathbf{X}_1 \mid \dots \mid \mathbf{X}_m)(\mathbf{Y}_1 \mid \dots \mid \mathbf{Y}_n)^*$$

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Vor Transformation

$$\mathbf{N} ::= \mathbf{X}_1 \mid \dots \mid \mathbf{X}_m \mid \mathbf{N} \mathbf{Y}_1 \mid \dots \mid \mathbf{N} \mathbf{Y}_n$$

## Nach Linksausklammern

$$\mathbf{N} ::= (\mathbf{X}_1 \mid \dots \mid \mathbf{X}_m) \mid (\mathbf{N}(\mathbf{Y}_1 \mid \dots \mid \mathbf{Y}_n))$$

## Nach Beseitigen der Linksrekursion

$$\mathbf{N} ::= (\mathbf{X}_1 \mid \dots \mid \mathbf{X}_m)(\mathbf{Y}_1 \mid \dots \mid \mathbf{Y}_n)^*$$

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

# Ersetzen von Nicht-Terminalsymbolen

- Wenn  $\mathbf{N} ::= \mathbf{X}$  einzige Produktion mit LHS  $\mathbf{N}$  ist
- ...  $\mathbf{N}$  durch  $\mathbf{X}$  in RHS aller Produktionen ersetzen

Beispiel:

Vor Transformation

single-Declaration ::= **var** Identifier : Type-denoter | ...  
Type-denoter ::= Identifier

Nach Ersetzung

single-Declaration ::= **var** Identifier : Identifier | ...

Aber ...

Solche "überflüssigen" Nicht-Terminals können nützlichen Dokumentationscharakter für den menschlichen Leser haben!

- Wenn  $\mathbf{N} ::= \mathbf{X}$  einzige Produktion mit LHS  $\mathbf{N}$  ist
- ...  $\mathbf{N}$  durch  $\mathbf{X}$  in RHS aller Produktionen ersetzen

Beispiel:

## Vor Transformation

single-Declaration ::= **var** Identifier : Type-denoter | ...  
Type-denoter ::= Identifier

## Nach Ersetzung

single-Declaration ::= **var** Identifier : Identifier | ...

## Aber ...

Solche "überflüssigen" Nicht-Terminals können nützlichen Dokumentationscharakter für den menschlichen Leser haben!

- Wenn  $\mathbf{N} ::= \mathbf{X}$  einzige Produktion mit LHS  $\mathbf{N}$  ist
- ...  $\mathbf{N}$  durch  $\mathbf{X}$  in RHS aller Produktionen ersetzen

Beispiel:

## Vor Transformation

single-Declaration ::= **var** Identifier : Type-denoter | ...  
Type-denoter ::= Identifier

## Nach Ersetzung

single-Declaration ::= **var** Identifier : Identifier | ...

Aber ...

Solche "überflüssigen" Nicht-Terminals können nützlichen Dokumentationscharakter für den menschlichen Leser haben!

- Wenn  $\mathbf{N} ::= \mathbf{X}$  einzige Produktion mit LHS  $\mathbf{N}$  ist
- ...  $\mathbf{N}$  durch  $\mathbf{X}$  in RHS aller Produktionen ersetzen

Beispiel:

## Vor Transformation

single-Declaration ::= **var** Identifier : Type-denoter | ...  
Type-denoter ::= Identifier

## Nach Ersetzung

single-Declaration ::= **var** Identifier : Identifier | ...

## Aber ...

Solche "überflüssigen" Nicht-Terminals können nützlichen Dokumentationscharakter für den menschlichen Leser haben!

- Hier auf den ersten Blick noch nicht erkennbar
- Erlauben kompaktere und lesbarere Beschreibung von CFGs
- **Sehr nützlich** bei der Konstruktion von Parsern für CFGs

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



**Erkennung:** Entscheidung, ob ein Eingabetext ein Satz der Grammatik  $G$  ist.

**Parsing:** Erkennung und zusätzlich Bestimmung der Phrasen-Struktur

- Beispiel: Durch *konkreten* Syntaxbaum

**Eindeutigkeit:** Eine Grammatik ist eindeutig falls jeder Eingabetext auf maximal eine Weise geparsed werden kann,

- Ein syntaktisch korrekter Eingabetext hat genau einen eindeutigen Syntaxbaum

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

**Parsing**

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

**Erkennung:** Entscheidung, ob ein Eingabetext ein Satz der Grammatik  $G$  ist.

**Parsing:** Erkennung und zusätzlich Bestimmung der Phrasen-Struktur

- Beispiel: Durch *konkreten* Syntaxbaum

**Eindeutigkeit:** Eine Grammatik ist eindeutig falls jeder Eingabetext auf maximal eine Weise geparsed werden kann,

- Ein syntaktisch korrekter Eingabetext hat genau einen eindeutigen Syntaxbaum

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

**Parsing**

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

**Erkennung:** Entscheidung, ob ein Eingabetext ein Satz der Grammatik  $G$  ist.

**Parsing:** Erkennung und zusätzlich Bestimmung der Phrasen-Struktur

- Beispiel: Durch *konkreten* Syntaxbaum

**Eindeutigkeit:** Eine Grammatik ist eindeutig falls jeder Eingabetext auf maximal eine Weise geparsed werden kann,

- Ein syntaktisch korrekter Eingabetext hat genau einen eindeutigen Syntaxbaum

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

**Parsing**

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

**Erkennung:** Entscheidung, ob ein Eingabetext ein Satz der Grammatik  $G$  ist.

**Parsing:** Erkennung und zusätzlich Bestimmung der Phrasen-Struktur

- Beispiel: Durch *konkreten* Syntaxbaum

**Eindeutigkeit:** Eine Grammatik ist eindeutig falls jeder Eingabetext auf maximal eine Weise geparsed werden kann,

- Ein syntaktisch korrekter Eingabetext hat genau einen eindeutigen Syntaxbaum

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

**Parsing**

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

**Erkennung:** Entscheidung, ob ein Eingabetext ein Satz der Grammatik  $G$  ist.

**Parsing:** Erkennung und zusätzlich Bestimmung der Phrasen-Struktur

- Beispiel: Durch *konkreten* Syntaxbaum

**Eindeutigkeit:** Eine Grammatik ist eindeutig falls jeder Eingabetext auf maximal eine Weise geparsed werden kann,

- Ein syntaktisch korrekter Eingabetext hat genau einen eindeutigen Syntaxbaum

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

**Parsing**

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Zwei wesentliche Verfahren
- Unterscheiden sich in der Art ihres Vorgehens
  - Top-Down Beispiel: Rekursiver Abstieg
  - Bottom-Up Beispiel: Shift/Reduce

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

**Parsing**

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Zwei wesentliche Verfahren
- Unterscheiden sich in der Art ihres Vorgehens
  - Top-Down Beispiel: Rekursiver Abstieg
  - Bottom-Up Beispiel: Shift/Reduce

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

**Parsing**

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Zwei wesentliche Verfahren
- Unterscheiden sich in der Art ihres Vorgehens
  - Top-Down Beispiel: Rekursiver Abstieg
  - Bottom-Up Beispiel: Shift/Reduce

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



- Zwei wesentliche Verfahren
- Unterscheiden sich in der Art ihres Vorgehens
  - Top-Down Beispiel: Rekursiver Abstieg
  - Bottom-Up Beispiel: Shift/Reduce

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Produktionen

**Sentence** ::= **Subject Verb Object .**  
**Subject** ::= **I | a Noun | the Noun**  
**Object** ::= **me | a Noun | the Noun**  
**Noun** ::= **cat | mat | rat**  
**Verb** ::= **like | is | see | sees**

## Beispiele der erzeugten Sprache

```
the cat sees a rat .  
I like the cat .  
the cat see me .  
I like me .  
a rat like me .
```

## Produktionen

**Sentence** ::= **Subject Verb Object .**  
**Subject** ::= **I | a Noun | the Noun**  
**Object** ::= **me | a Noun | the Noun**  
**Noun** ::= **cat | mat | rat**  
**Verb** ::= **like | is | see | sees**

## Beispiele der erzeugten Sprache

```
the cat sees a rat .  
I like the cat .  
the cat see me .  
I like me .  
a rat like me .
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Vorgehensweise

- Untersuche Eingabetext zeichenweise, von links nach rechts
- Baue Syntaxbaum von **unten nach oben** auf
  - Von den Terminalzeichen in den Blättern
  - ... zum  $S$  Nicht-Terminal in der Wurzel

## Vorgehensweise

- Untersuche Eingabetext zeichenweise, von links nach rechts
- Baue Syntaxbaum von **unten nach oben** auf
  - Von den Terminalzeichen in den Blättern
  - ... zum  $S$  Nicht-Terminal in der Wurzel

## Zwei Arten von Aktionen

**Shift** Lese Zeichen ein

- Zusätzlich: Und lege es auf dem Stack ab

**Reduce** Erkenne ein Nicht-Terminal LHS der  
Produktion  $p$

- Zusätzlich: Oberste Elemente des Stapels müssen RHS von  $p$  entsprechen, ersetze durch LHS von  $p$  (Zusammenfassen)
- Ende wenn Startsymbol  $S$  erreicht und Eingabetext komplett gelesen

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

**Parsing**

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Zwei Arten von Aktionen

**Shift** Lese Zeichen ein

- Zusätzlich: Und lege es auf dem Stack ab

**Reduce** Erkenne ein Nicht-Terminal LHS der  
Produktion  $p$

- Zusätzlich: Oberste Elemente des Stapels müssen RHS von  $p$  entsprechen, ersetze durch LHS von  $p$  (Zusammenfassen)
- Ende wenn Startsymbol  $S$  erreicht und Eingabetext komplett gelesen

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

# Beispiel Bottom-Up Parsing

the cat sees a rat .

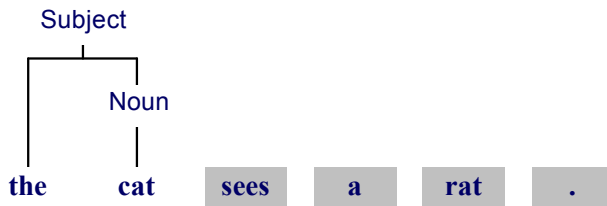


```
Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject  ::= I | a Noun | the Noun  
Object   ::= me | a Noun | the Noun  
Noun     ::= cat | mat | rat  
Verb     ::= like | is | see | sees
```



# Beispiel Bottom-Up Parsing

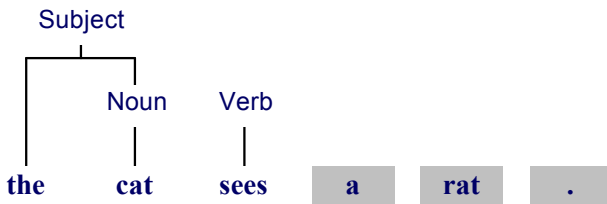
the cat sees a rat .



```
Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject  ::= I | a Noun | the Noun  
Object   ::= me | a Noun | the Noun  
Noun     ::= cat | mat | rat  
Verb     ::= like | is | see | sees
```

# Beispiel Bottom-Up Parsing

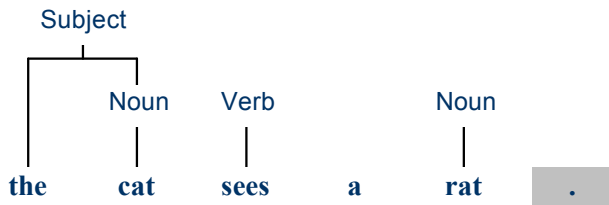
the cat sees a rat .



```
Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject  ::= I | a Noun | the Noun  
Object   ::= me | a Noun | the Noun  
Noun     ::= cat | mat | rat  
Verb     ::= like | is | see | sees
```

# Beispiel Bottom-Up Parsing

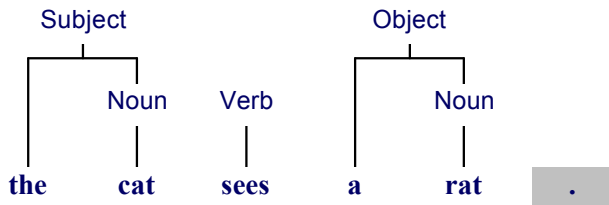
the cat sees a rat .



```
Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject  ::= I | a Noun | the Noun  
Object   ::= me | a Noun | the Noun  
Noun     ::= cat | mat | rat  
Verb     ::= like | is | see | sees
```

# Beispiel Bottom-Up Parsing

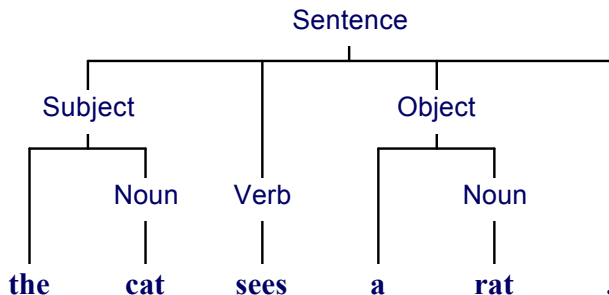
the cat sees a rat .



```
Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject  ::= I | a Noun | the Noun  
Object   ::= me | a Noun | the Noun  
Noun     ::= cat | mat | rat  
Verb     ::= like | is | see | sees
```

# Beispiel Bottom-Up Parsing

the cat sees a rat .



Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject ::= I | a Noun | the Noun  
Object ::= me | a Noun | the Noun  
Noun ::= cat | mat | rat  
Verb ::= like | is | see | sees

**Welche** Produktion beim Zusammenfassen anwenden?

Lösung: Nicht nur bekannte Zeichen betrachten, sondern auch noch Zustand (“schon Subject gesehen”) einbeziehen.  
... aber hier nicht weiter vertieft!

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

**Parsing**

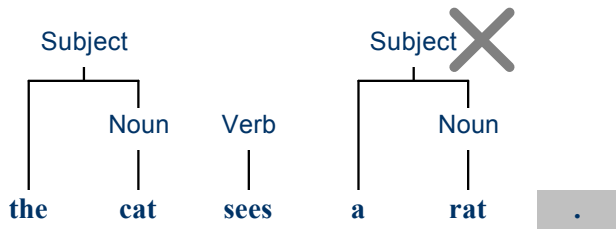
Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

Welche Produktion beim Zusammenfassen anwenden?



Lösung: Nicht nur bekannte Zeichen betrachten, sondern auch noch Zustand ("schon Subject gesehen") einbeziehen.  
... aber hier nicht weiter vertieft!

## Vorgehensweise

- Untersuche Eingabetext zeichenweise, von links nach rechts
- Baue Syntaxbaum von **oben nach unten** auf
  - Vom Start-Nicht-Terminal  $S$  in der Wurzel
  - ... zu den Terminalzeichen in den Blättern



## Vorgehensweise

- Untersuche Eingabetext zeichenweise, von links nach rechts
- Baue Syntaxbaum von **oben nach unten** auf
  - Vom Start-Nicht-Terminal  $S$  in der Wurzel
  - ... zu den Terminalzeichen in den Blättern

## Aktion

- Expandiere jeweils das am weitestens links gelegene Nicht-Terminal **N**
- ... durch Anwendung einer Produktion  $N ::= X$
- Wähle Produktion aus durch Betrachten der nächsten  $n$  Zeichen des Eingabetextes (Annahme hier:  $n = 1$ )
- Falls keine Produktion auf Zeichen passt → Fehler!
- Ende wenn Eingabetext komplett gelesen und kein unexpandiertes Nicht-Terminal mehr existiert

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Aktion

- Expandiere jeweils das am weitestens links gelegene Nicht-Terminal **N**
- ... durch Anwendung einer Produktion **N ::= X**
- Wähle Produktion aus durch Betrachten der nächsten  $n$  Zeichen des Eingabetextes (Annahme hier:  $n = 1$ )
- Falls keine Produktion auf Zeichen passt → Fehler!
- Ende wenn Eingabetext komplett gelesen und kein unexpandiertes Nicht-Terminal mehr existiert

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Aktion

- Expandiere jeweils das am weitestens links gelegene Nicht-Terminal **N**
- ... durch Anwendung einer Produktion **N ::= X**
- Wähle Produktion aus durch Betrachten der nächsten  $n$  Zeichen des Eingabetextes (Annahme hier:  $n = 1$ )
- Falls keine Produktion auf Zeichen passt → Fehler!
- Ende wenn Eingabetext komplett gelesen und kein unexpandiertes Nicht-Terminal mehr existiert

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Aktion

- Expandiere jeweils das am weitestens links gelegene Nicht-Terminal **N**
- ... durch Anwendung einer Produktion **N ::= X**
- Wähle Produktion aus durch Betrachten der nächsten  $n$  Zeichen des Eingabetextes (Annahme hier:  $n = 1$ )
- Falls keine Produktion auf Zeichen passt → **Fehler!**
- Ende wenn Eingabetext komplett gelesen und kein unexpandiertes Nicht-Terminal mehr existiert

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Aktion

- Expandiere jeweils das am weitestens links gelegene Nicht-Terminal **N**
- ... durch Anwendung einer Produktion **N ::= X**
- Wähle Produktion aus durch Betrachten der nächsten  $n$  Zeichen des Eingabetextes (Annahme hier:  $n = 1$ )
- Falls keine Produktion auf Zeichen passt → **Fehler!**
- Ende wenn Eingabetext komplett gelesen und kein unexpandiertes Nicht-Terminal mehr existiert

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

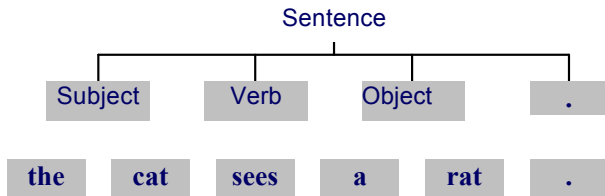
ASTs

Scanning

# Beispiel Top-Down Parsing

the cat sees a rat .

Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject ::= I | a Noun | the Noun  
Object ::= me | a Noun | the Noun  
Noun ::= cat | mat | rat  
Verb ::= like | is | see | sees



OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

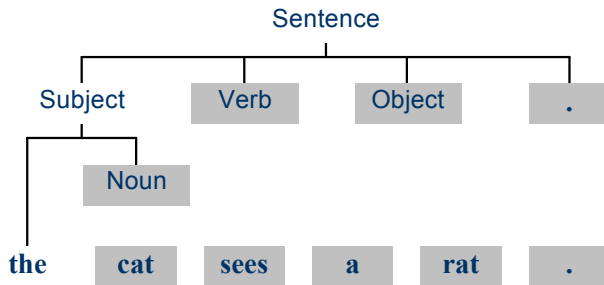
ASTs

Scanning

# Beispiel Top-Down Parsing

the cat sees a rat .

Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject ::= I | a Noun | the Noun  
Object ::= me | a Noun | the Noun  
Noun ::= cat | mat | rat  
Verb ::= like | is | see | sees



OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

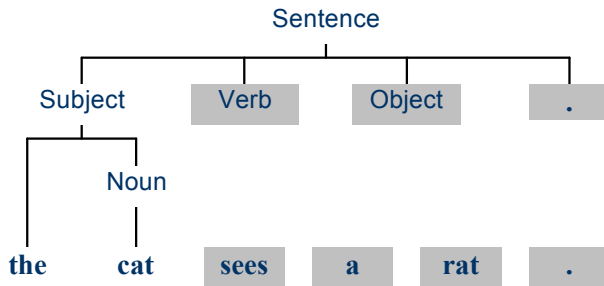
Scanning



# Beispiel Top-Down Parsing

the cat sees a rat .

Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject ::= **I** | **a** Noun | **the** Noun  
Object ::= **me** | **a** Noun | **the** Noun  
Noun ::= **cat** | **mat** | **rat**  
Verb ::= **like** | **is** | **see** | **sees**



OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

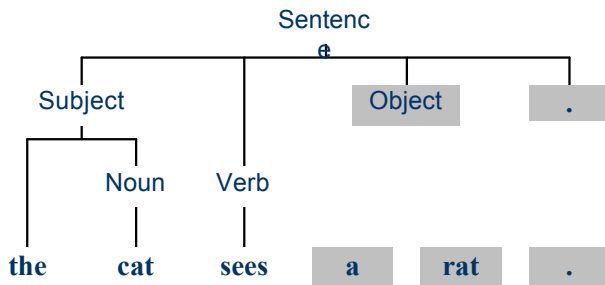
ASTs

Scanning

# Beispiel Top-Down Parsing

the cat sees a rat .

Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject ::= **I** | **a** Noun | **the** Noun  
Object ::= **me** | **a** Noun | **the** Noun  
Noun ::= **cat** | **mat** | **rat**  
Verb ::= **like** | **is** | **see** | **sees**



OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

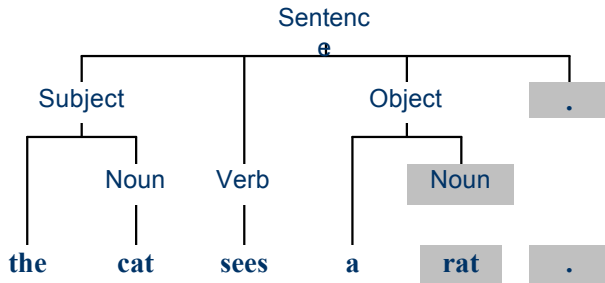
ASTs

Scanning

# Beispiel Top-Down Parsing

the cat sees a rat .

Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject ::= I | a Noun | the Noun  
Object ::= me | a Noun | the Noun  
Noun ::= cat | mat | rat  
Verb ::= like | is | see | sees



OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

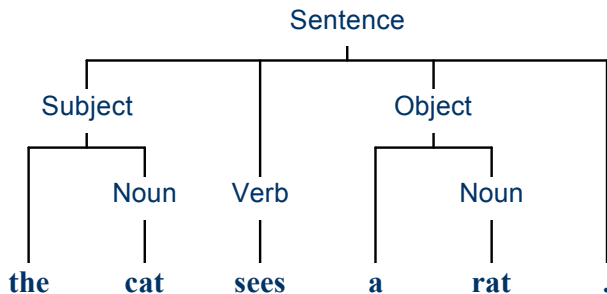
ASTs

Scanning

# Beispiel Top-Down Parsing

the cat sees a rat .

Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject ::= **I** | **a** Noun | **the** Noun  
Object ::= **me** | **a** Noun | **the** Noun  
Noun ::= **cat** | **mat** | **rat**  
Verb ::= **like** | **is** | **see** | **sees**



OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

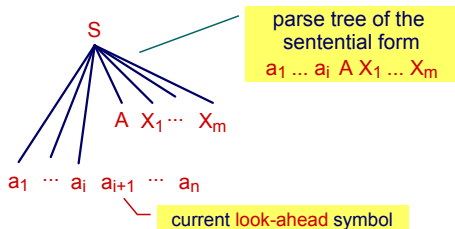
Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

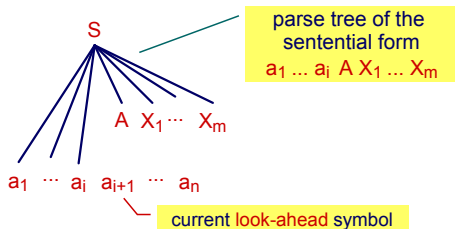


Falls es möglich ist,

- ... bei Betrachten der nächsten  $k$  Zeichen des Textes
- ... immer die richtige Produktion zu finden

dann ist die Grammatik  $LL(k)$

- $L$ : Lese Eingabetext von links nach rechts
- $L$ : Leite immer vom am weitesten links stehenden Nicht-Terminal ab.



Falls es möglich ist,

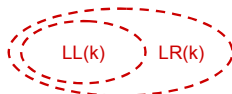
- ... bei Betrachten der nächsten  $k$  Zeichen des Textes
- ... immer die richtige Produktion zu finden

dann ist die Grammatik  $LL(k)$

- **L**: Lese Eingabetext von links nach rechts
- **L**: Leite immer vom am weitesten links stehenden Nicht-Terminal ab.

- Probleme mit Top-Down-Parsing
  - Konstruktion einer  $LL(k)$  Grammatik für die gewünschte Sprache gelegentlich mühsam
  - Linksausklammern und Beseitigen von Linksrekursion können Lesbarkeit der Grammatik erschweren
- Lösung: Bottom-Up-Parsing mit  $LR(k)$ -Techniken
  - L: Lese Eingabetext von links nach rechts
  - R: Fasse die am weitesten rechts stehenden Terminal-Symbole zusammen und baue den Baum rückwärts auf
  - Mächtigeres Beschreibungsinstrument als  $LL(k)$
  - Nachteil: Parsing-Vorgang komplexer und schlechter verständlich

- Probleme mit Top-Down-Parsing
  - Konstruktion einer  $LL(k)$  Grammatik für die gewünschte Sprache gelegentlich mühsam
  - Linksausklammern und Beseitigen von Linksrekursion können Lesbarkeit der Grammatik erschweren
- Lösung: Bottom-Up-Parsing mit  $LR(k)$ -Techniken
  - **L**: Lese Eingabetext von **links nach rechts**
  - **R**: Fasse die am weitesten **rechts** stehenden Terminal-Symbole zusammen und baue den Baum **rückwärts** auf
  - Mächtigeres Beschreibungsinstrument als  $LL(k)$
  - Nachteil: Parsing-Vorgang komplexer und schlechter verständlich





**Einfache** Implementierung der Top-Down Strategie, Idee:

- Struktur des konkreten Syntaxbaumes (Parse-Baum) entspricht
- ... Aufrufmuster von sich wechselseitig aufrufenden Prozeduren
- Für jedes Nicht-Terminal **XYZ** existiert
- ... Parse-Prozedur `parseXYZ`, die genau dieses Nicht-Terminal parst

Beispiel:

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

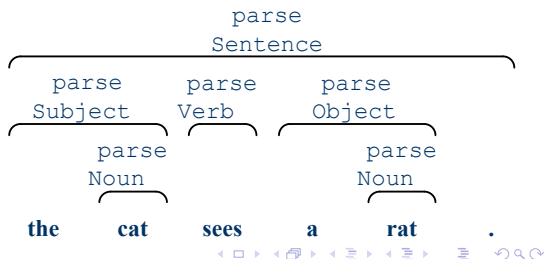
ASTs

Scanning

**Einfache** Implementierung der Top-Down Strategie, Idee:

- Struktur des konkreten Syntaxbaumes (Parse-Baum) entspricht
- ... Aufrufmuster von sich wechselseitig aufrufenden Prozeduren
- Für jedes Nicht-Terminal **XYZ** existiert
- ... Parse-Prozedur **parseXYZ**, die genau dieses Nicht-Terminal parst

Beispiel:



Sentence ::= Subject Verb Object .

```
protected void parseSentence () {  
    parseSubject ();  
    parseVerb ();  
    parseObject ();  
    accept (".");  
}
```

**accept (t)** prüft, ob **aktuelles Token** das erwartete Token **t** ist.

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

Subject ::= I | a Noun | the Noun

```
protected void parseSubject() {  
    if (currentToken matches "I") {  
        accept("I");  
    } else if (currentToken matches "a") {  
        accept("a");  
        parseNoun();  
    } else if (currentToken matches "the") {  
        accept("the");  
        parseNoun();  
    } else  
        report a syntax error  
}
```

Die Methode **muß** immer anhand von currentToken die **passende** Alternative auswählen können.

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
public class MicroEnglishParser {
    protected Token currentToken;

    public void parse() {
        currentToken = first token;
        parseSentence();
        check that no token follows the sentence
    }

    protected void accept(Token expected) { ... }
    protected void parseSentence() { ... }
    protected void parseSubject() { ... }
    protected void parseObject() { ... }
    protected void parseNoun() { ... }
    protected void parseVerb() { ... }

    ...
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
public class MicroEnglishParser {  
    protected Token currentToken;
```

```
    public void parse() {  
        currentToken = first token;  
        parseSentence();
```

*check that no token follows the sentence*

```
    }  
    protected void accept(Token expected) { ... }  
    protected void parseSentence() { ... }  
    protected void parseSubject() { ... }  
    protected void parseObject() { ... }  
    protected void parseNoun() { ... }  
    protected ...
```

In Watt & Brown sind die Parse-Methoden als **private** deklariert. **Ungeschickt**, da es die **Anpassung** des Verhaltens durch **Vererbung** verhindert.

Schnittstelle zum Scanner,  
der die Tokens liefert

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- **currentToken** enthält nacheinander die Tokens des Eingabetextes
- Ablauf einer Methode `parseN`
  - Bei Eintritt enthält **currentToken** eines der Tokens, **mit denen N beginnen kann**
  - ...sonst wäre eine andere Parse-Methode aufgerufen werden (oder Syntaxfehler)
  - Bei Austritt enthält **currentToken** das auf die **N-Phrase** folgende Token
- Ablauf der Methode `accept(t)`
  - Bei Eintritt muß **currentToken = t** sein
  - ...sonst Syntaxfehler
  - Bei Austritt enthält **currentToken** das auf **t** folgende Token

- **currentToken** enthält nacheinander die Tokens des Eingabetextes
- Ablauf einer Methode **parseN**
  - Bei Eintritt enthält **currentToken** eines der Tokens, **mit denen N beginnen kann**
  - ...sonst wäre eine andere Parse-Methode aufgerufen werden (oder Syntaxfehler)
  - Bei Austritt enthält **currentToken** das auf die **N-Phrase** folgende Token
- Ablauf der Methode **accept (t)**
  - Bei Eintritt muß **currentToken = t** sein
  - ...sonst Syntaxfehler
  - Bei Austritt enthält **currentToken** das auf **t** folgende Token



- **currentToken** enthält nacheinander die Tokens des Eingabetextes
- Ablauf einer Methode **parseN**
  - Bei Eintritt enthält **currentToken** eines der Tokens, **mit denen N beginnen kann**
  - ...sonst wäre eine andere Parse-Methode aufgerufen werden (oder Syntaxfehler)
  - Bei Austritt enthält **currentToken** das auf die **N-Phrase** folgende Token
- Ablauf der Methode **accept (t)**
  - Bei Eintritt muß **currentToken = t** sein
  - ...sonst Syntaxfehler
  - Bei Austritt enthält **currentToken** das auf **t** folgende Token

## Entwicklung von Parseern mit rekursivem Abstieg

- 1 **Formuliere Grammatik (CFG) in EBNF**
  - Eine Produktion pro Nicht-Terminal
  - Beseitige **immer** Linksrekursion
  - Klammere gemeinsame Teilausdrücke nach links aus wo **möglich**
- 2 **Erstelle Klasse für den Parser mit**
  - `protected` Variable `currentToken`
  - Schnittstellenmethoden zum Scanner
    - `accept(t)` und `acceptIt()`
  - `public` Methode `parse`, welche ...
    - erstes Token via Scanner aus dem Eingabetext liest
    - die Parse-Methode des Start Nicht-Terminals `S` der CFG aufruft
- 3 **Implementiere `protected` Parsing-Methoden**
  - Methode `parseN` für jedes Nicht-Terminalsymbol `N`

## Entwicklung von Parseern mit rekursivem Abstieg

- 1 Formuliere Grammatik (CFG) in EBNF
  - Eine Produktion pro Nicht-Terminal
  - Beseitige **immer** Linksrekursion
  - Klammere gemeinsame Teilausdrücke nach links aus wo **möglich**
- 2 Erstelle Klasse für den Parser mit
  - **protected** Variable **currentToken**
  - Schnittstellenmethoden zum Scanner
    - **accept** (*t*) und **acceptIt** ()
  - **public** Methode **parse**, welche ...
    - erstes Token via Scanner aus dem Eingabetext liest
    - die Parse-Methode des Start Nicht-Terminals *S* der CFG aufruft
- 3 Implementiere **protected** Parsing-Methoden
  - Methode **parseN** für jedes Nicht-Terminalsymbol *N*

## Entwicklung von Parsern mit rekursivem Abstieg

- 1 Formuliere Grammatik (CFG) in EBNF
  - Eine Produktion pro Nicht-Terminal
  - Beseitige **immer** Linksrekursion
  - Klammere gemeinsame Teilausdrücke nach links aus wo **möglich**
- 2 Erstelle Klasse für den Parser mit
  - **protected** Variable **currentToken**
  - Schnittstellenmethoden zum Scanner
    - **accept** (*t*) und **acceptIt** ()
  - **public** Methode **parse**, welche ...
    - erstes Token via Scanner aus dem Eingabetext liest
    - die Parse-Methode des Start Nicht-Terminals *S* der CFG aufruft
- 3 Implementiere **protected** Parsing-Methoden
  - Methode **parseN** für jedes Nicht-Terminalsymbol **N**

## starters[[**X**]] mit RE **X**

Menge aller Terminal-Symbole, die am Anfang einer aus **X** herleitbaren Zeichenkette stehen können.

### Beispiele

$$\begin{aligned}\text{starters}[[\mathbf{ab}]] &= \{\mathbf{a}\} \\ \text{starters}[[\mathbf{a|b}]] &= \{\mathbf{a, b}\} \\ \text{starters}[[\mathbf{(re) * set}]] &= \{\mathbf{r, s}\}\end{aligned}$$

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## starters[[**X**]] mit RE **X**

Menge aller Terminal-Symbole, die am Anfang einer aus **X** herleitbaren Zeichenkette stehen können.

## Beispiele

$$\text{starters}[[\mathbf{ab}]] = \{\mathbf{a}\}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{a|b}]] = \{\mathbf{a, b}\}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{(re) * set}]] = \{\mathbf{r, s}\}$$

$$\text{starters}[[\varepsilon]] = \{\}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{t}]] = \{\mathbf{t}\}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{XY}]] = \begin{cases} \text{starters}[[\mathbf{X}]]: \text{ falls aus } \mathbf{X} \text{ kein } \varepsilon \text{ herleitbar} \\ \text{starters}[[\mathbf{X}]] \cup \text{starters}[[\mathbf{Y}]]: \text{ sonst} \end{cases}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{X|Y}]] = \text{starters}[[\mathbf{X}]] \cup \text{starters}[[\mathbf{Y}]] \text{ noch nicht ganz richtig!}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{X*}]] = \text{starters}[[\mathbf{X}]] \text{ dito!}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{N*}]] = \text{starters}[[\mathbf{X}]], \text{ wenn } \mathbf{N} ::= \mathbf{X} \text{ dito!}$$

Ausbügeln der Ungenauigkeiten später (siehe Folie 56)

$$\text{starters}[[\varepsilon]] = \{\}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{t}]] = \{\mathbf{t}\}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{XY}]] = \begin{cases} \text{starters}[[\mathbf{X}]]: \text{ falls aus } \mathbf{X} \text{ kein } \varepsilon \text{ herleitbar} \\ \text{starters}[[\mathbf{X}]] \cup \text{starters}[[\mathbf{Y}]]: \text{ sonst} \end{cases}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{X|Y}]] = \text{starters}[[\mathbf{X}]] \cup \text{starters}[[\mathbf{Y}]] \text{ noch nicht ganz richtig!}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{X*}]] = \text{starters}[[\mathbf{X}]] \text{ dito!}$$

$$\text{starters}[[\mathbf{N*}]] = \text{starters}[[\mathbf{X}]], \text{ wenn } \mathbf{N} ::= \mathbf{X} \text{ dito!}$$

Ausbügeln der Ungenauigkeiten später (siehe Folie 56)



Annahme:  $\mathbf{N} ::= \mathbf{X}$ , nun **schrittweise** Zerlegung von  $\mathbf{X}$

$\varepsilon$  ; (=leere Anweisung)

$t$  `accept (t) ;`

$\mathbf{P}$  `parseP () ;`

$\mathbf{P Q}$  `parseP () ;`

`parseQ () ;`

$\mathbf{P|Q}$  `if (currentToken  $\in$  starters[[ $\mathbf{P}$ ]])` was bei  $\mathbf{P} = \varepsilon$ ?  
`parseP () ;`

`else if (currentToken  $\in$  starters[[ $\mathbf{Q}$ ]])`  
`parseQ () ;`

`else`

*melde Syntaxfehler*

$\mathbf{P^*}$  `while (currentToken  $\in$  starters[[ $\mathbf{P}$ ]])`  
`parseP () ;`

Annahme:  $\mathbf{N} ::= \mathbf{X}$ , nun **schrittweise** Zerlegung von  $\mathbf{X}$

$\varepsilon$  ; (=leere Anweisung)

$t$  **accept** ( $t$ ) ;

$P$  `parseP () ;`

$PQ$  `parseP () ;`

`parseQ () ;`

$P|Q$  **if** (`currentToken`  $\in$  `starters[[P]]`) was bei  $P = \varepsilon$ ?  
`parseP () ;`

**else if** (`currentToken`  $\in$  `starters[[Q]]`)  
`parseQ () ;`

**else**

*melde Syntaxfehler*

$P^*$  **while** (`currentToken`  $\in$  `starters[[P]]`)  
`parseP () ;`

Annahme:  $\mathbf{N} ::= \mathbf{X}$ , nun **schrittweise** Zerlegung von  $\mathbf{X}$

$\varepsilon$  ; (=leere Anweisung)

$t$  **accept** ( $t$ ) ;

**P** **parseP** () ;

**P Q** **parseP** () ;

**parseQ** () ;

**P|Q** **if** (**currentToken**  $\in$  **starters**[[**P**]]) *was bei P =  $\varepsilon$ ?*  
**parseP** () ;

**else if** (**currentToken**  $\in$  **starters**[[**Q**]])  
**parseQ** () ;

**else**

*melde Syntaxfehler*

**P\*** **while** (**currentToken**  $\in$  **starters**[[**P**]])  
**parseP** () ;

Annahme:  $\mathbf{N} ::= \mathbf{X}$ , nun **schrittweise** Zerlegung von  $\mathbf{X}$

$\varepsilon$  ; (=leere Anweisung)

$t$  `accept (t) ;`

**P** `parseP () ;`

**P Q** `parseP () ;`

`parseQ () ;`

**P|Q** `if (currentToken  $\in$  starters[[P]])` was bei  $P = \varepsilon$ ?  
`parseP () ;`

`else if (currentToken  $\in$  starters[[Q]])`  
`parseQ () ;`

`else`

`melde Syntaxfehler`

**P\*** `while (currentToken  $\in$  starters[[P]])`  
`parseP () ;`

Annahme:  $\mathbf{N} ::= \mathbf{X}$ , nun **schrittweise** Zerlegung von  $\mathbf{X}$

$\varepsilon$  ; (=leere Anweisung)

$t$  `accept (t) ;`

**P** `parseP () ;`

**P Q** `parseP () ;`

`parseQ () ;`

**P|Q** `if (currentToken  $\in$  starters[[P]])` was bei  $\mathbf{P} = \varepsilon$ ?  
`parseP () ;`

`else if (currentToken  $\in$  starters[[Q]])`  
`parseQ () ;`

`else`

*`melde Syntaxfehler`*

**P\*** `while (currentToken  $\in$  starters[[P]])`  
`parseP () ;`

Annahme:  $\mathbf{N} ::= \mathbf{X}$ , nun **schrittweise** Zerlegung von  $\mathbf{X}$

$\varepsilon$  ; (=leere Anweisung)

$t$  `accept (t);`

**P** `parseP ();`

**P Q** `parseP ();`

`parseQ ();`

**P|Q** `if (currentToken  $\in$  starters[[P]])` was bei  $\mathbf{P} = \varepsilon$ ?  
`parseP ();`

`else if (currentToken  $\in$  starters[[Q]])`  
`parseQ ();`

`else`

*melde Syntaxfehler*

**P\*** `while (currentToken  $\in$  starters[[P]])`  
`parseP ();`

Analog:  $\text{follow}[[\mathbf{X}]]$  ist Menge der Tokens, die in der CFG nach  $\mathbf{X}$  folgen können.

Beispiel

$\mathbf{N} ::= \mathbf{XY}$

$\mathbf{X} ::= \mathbf{a} \mid \mathbf{b}$

$\mathbf{Y} ::= \mathbf{c} \mid \mathbf{d}$

$\text{follow}[[\mathbf{N}]] ::= \{\}$

$\text{follow}[[\mathbf{X}]] ::= \{\mathbf{c}, \mathbf{d}\}$

$\text{follow}[[\mathbf{Y}]] ::= \{\}$

Analog:  $\text{follow}[[\mathbf{X}]]$  ist Menge der Tokens, die in der CFG nach  $\mathbf{X}$  folgen können.

Beispiel

$$\mathbf{N} ::= \mathbf{XY}$$
$$\mathbf{X} ::= \mathbf{a} \mid \mathbf{b}$$
$$\mathbf{Y} ::= \mathbf{c} \mid \mathbf{d}$$
$$\text{follow}[[\mathbf{N}]] ::= \{\}$$
$$\text{follow}[[\mathbf{X}]] ::= \{\mathbf{c}, \mathbf{d}\}$$
$$\text{follow}[[\mathbf{Y}]] ::= \{\}$$



Funktionieren nur dann, wenn in Grammatik  $G$  gilt:

- Falls  $G$   $X|Y$  enthält und sich weder  $X$  noch  $Y$  zu  $\epsilon$  ableiten lassen:  $\text{starters}[[X]] \cap \text{starters}[[Y]] = \emptyset$
- Falls  $G$   $X|Y$  enthält und sich beispielsweise  $Y$  zu  $\epsilon$  ableiten lässt:  
 $\text{starters}[[X]] \cap (\text{starters}[[Y]] \cup \text{follow}[[X|Y]]) = \emptyset$
- Falls  $G$   $X^*$  enthält:  $\text{starters}[[X]] \cap \text{follow}[[X^*]] = \emptyset$

➔ Wenn alles gilt:  $G$  ist  $LL(k)$  mit  $k = 1$

Hinweis: Definition in PLPJ, p. 104 ist **nicht** ausreichend!

Funktionieren nur dann, wenn in Grammatik  $G$  gilt:

- Falls  $G$   $X|Y$  enthält und sich **weder  $X$  noch  $Y$**  zu  $\epsilon$  ableiten lassen:  $\text{starters}[[X]] \cap \text{starters}[[Y]] = \emptyset$
- Falls  $G$   $X|Y$  enthält und sich beispielsweise  $Y$  zu  $\epsilon$  ableiten lässt:  
 $\text{starters}[[X]] \cap (\text{starters}[[Y]] \cup \text{follow}[[X|Y]]) = \emptyset$
- Falls  $G$   $X^*$  enthält:  $\text{starters}[[X]] \cap \text{follow}[[X^*]] = \emptyset$

➔ Wenn alles gilt:  $G$  ist  $LL(k)$  mit  $k = 1$

Hinweis: Definition in PLPJ, p. 104 ist **nicht** ausreichend!

Funktionieren nur dann, wenn in Grammatik  $G$  gilt:

- Falls  $G$   $X|Y$  enthält und sich weder  $X$  noch  $Y$  zu  $\epsilon$  ableiten lassen:  $\text{starters}[[X]] \cap \text{starters}[[Y]] = \emptyset$
- Falls  $G$   $X|Y$  enthält und sich beispielsweise  $Y$  zu  $\epsilon$  ableiten lässt:  
 $\text{starters}[[X]] \cap (\text{starters}[[Y]] \cup \text{follow}[[X|Y]]) = \emptyset$
- Falls  $G$   $X^*$  enthält:  $\text{starters}[[X]] \cap \text{follow}[[X^*]] = \emptyset$

➔ Wenn alles gilt:  $G$  ist  $LL(k)$  mit  $k = 1$

Hinweis: Definition in PLPJ, p. 104 ist nicht ausreichend!

Funktionieren nur dann, wenn in Grammatik  $G$  gilt:

- Falls  $G$   $\mathbf{X|Y}$  enthält und sich **weder  $X$  noch  $Y$**  zu  $\epsilon$  ableiten lassen:  $\text{starters}[[\mathbf{X}]] \cap \text{starters}[[\mathbf{Y}]] = \emptyset$
- Falls  $G$   $\mathbf{X|Y}$  enthält und sich beispielsweise  $\mathbf{Y}$  zu  $\epsilon$  ableiten lässt:  
 $\text{starters}[[\mathbf{X}]] \cap (\text{starters}[[\mathbf{Y}]] \cup \text{follow}[[\mathbf{X|Y}]]) = \emptyset$
- Falls  $G$   $\mathbf{X^*}$  enthält:  $\text{starters}[[\mathbf{X}]] \cap \text{follow}[[\mathbf{X^*}]] = \emptyset$

➡ Wenn alles gilt:  $G$  ist  $\text{LL}(k)$  mit  $k = 1$

Hinweis: Definition in PLPJ, p. 104 ist **nicht** ausreichend!

Funktionieren nur dann, wenn in Grammatik  $G$  gilt:

- Falls  $G$   $\mathbf{X|Y}$  enthält und sich **weder  $X$  noch  $Y$**  zu  $\epsilon$  ableiten lassen:  $\text{starters}[[\mathbf{X}]] \cap \text{starters}[[\mathbf{Y}]] = \emptyset$
- Falls  $G$   $\mathbf{X|Y}$  enthält und sich beispielsweise  $\mathbf{Y}$  zu  $\epsilon$  ableiten lässt:  
 $\text{starters}[[\mathbf{X}]] \cap (\text{starters}[[\mathbf{Y}]] \cup \text{follow}[[\mathbf{X|Y}]]) = \emptyset$
- Falls  $G$   $\mathbf{X^*}$  enthält:  $\text{starters}[[\mathbf{X}]] \cap \text{follow}[[\mathbf{X^*}]] = \emptyset$

➡ Wenn alles gilt:  $G$  ist  $\text{LL}(k)$  mit  $k = 1$

Hinweis: Definition in PLPJ, p. 104 ist **nicht** ausreichend!

Funktionieren nur dann, wenn in Grammatik  $G$  gilt:

- Falls  $G$   $\mathbf{X|Y}$  enthält und sich **weder  $X$  noch  $Y$**  zu  $\epsilon$  ableiten lassen:  $\text{starters}[[\mathbf{X}]] \cap \text{starters}[[\mathbf{Y}]] = \emptyset$
- Falls  $G$   $\mathbf{X|Y}$  enthält und sich beispielsweise  $\mathbf{Y}$  zu  $\epsilon$  ableiten lässt:  
 $\text{starters}[[\mathbf{X}]] \cap (\text{starters}[[\mathbf{Y}]] \cup \text{follow}[[\mathbf{X|Y}]]) = \emptyset$
- Falls  $G$   $\mathbf{X^*}$  enthält:  $\text{starters}[[\mathbf{X}]] \cap \text{follow}[[\mathbf{X^*}]] = \emptyset$

➔ Wenn alles gilt:  $G$  ist **LL( $k$ )** mit  $k = 1$

Hinweis: Definition in PLPJ, p. 104 ist **nicht** ausreichend!

Bisher gezeigt für  $P|Q$

```
if (currentToken ∈ starters[[P]])
    parseP();
else if (currentToken ∈ starters[[Q]])
    parseQ();
else
    melde Syntaxfehler
```

Problematisch, wenn  $\epsilon$  aus  $P$  oder  $Q$  ableitbar.

Korrekt: Verwende statt starters[[X]]

$$\text{dirset}[[X]] = \begin{cases} \text{starters}[[X]]: & \text{falls aus } X \text{ kein } \epsilon \text{ herleitbar} \\ \text{starters}[[X]] \cup \text{follow}[[X]]: & \text{sonst} \end{cases}$$

Analog für  $P^*$ . Korrigiere so Folie 52.

Bisher gezeigt für  $P|Q$

```
if (currentToken ∈ starters[[P]])
    parseP();
else if (currentToken ∈ starters[[Q]])
    parseQ();
else
    melde Syntaxfehler
```

Problematisch, wenn  $\epsilon$  aus  $P$  oder  $Q$  ableitbar.

Korrekt: Verwende statt starters[[X]]

$$\text{dirset}[[X]] = \begin{cases} \text{starters}[[X]]: & \text{falls aus } X \text{ kein } \epsilon \text{ herleitbar} \\ \text{starters}[[X]] \cup \text{follow}[[X]]: & \text{sonst} \end{cases}$$

Analog für  $P^*$ . Korrigiere so Folie 52.



Bisher gezeigt für  $P|Q$

```
if (currentToken ∈ starters[[P]])
    parseP();
else if (currentToken ∈ starters[[Q]])
    parseQ();
else
    melde Syntaxfehler
```

Problematisch, wenn  $\varepsilon$  aus  $P$  oder  $Q$  ableitbar.

Korrekt: Verwende statt starters[[X]]

$$\text{dirset}[[X]] = \begin{cases} \text{starters}[[X]]: & \text{falls aus } X \text{ kein } \varepsilon \text{ herleitbar} \\ \text{starters}[[X]] \cup \text{follow}[[X]]: & \text{sonst} \end{cases}$$

Analog für  $P^*$ . Korrigiere so Folie 52.

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Aus Algol Grammatik

**Block ::= begin Declaration (; Declaration)\* ; Command end**

- Prüfe Regel für  $X^*$

- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] = \{;\}$
- $\text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] = \{;\}$
- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] \cap \text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] \neq \emptyset$

- Produktion ist aber transformierbar

**Block ::= begin Declaration ; (Declaration ;)\* Command end**

- Annahme:

$\text{starters}[[\text{Declaration};]] \cap \text{starters}[[\text{Command}]] = \emptyset$

- Aus Algol Grammatik

**Block ::= begin Declaration (; Declaration)\* ; Command end**

- Prüfe Regel für  $X^*$

- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] = \{;\}$
- $\text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] = \{;\}$
- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] \cap \text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] \neq \emptyset$

- Produktion ist aber transformierbar

**Block ::= begin Declaration ; (Declaration ;)\* Command end**

- Annahme:

$\text{starters}[[\text{Declaration};]] \cap \text{starters}[[\text{Command}]] = \emptyset$

- Aus Algol Grammatik

**Block ::= begin Declaration (; Declaration)\* ; Command end**

- Prüfe Regel für  $X^*$

- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] = \{;\}$
- $\text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] = \{;\}$
- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] \cap \text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] \neq \emptyset$

- Produktion ist aber transformierbar

**Block ::= begin Declaration ; (Declaration ;)\* Command end**

- Annahme:

$\text{starters}[[\text{Declaration};]] \cap \text{starters}[[\text{Command}]] = \emptyset$

- Aus Algol Grammatik

**Block ::= begin Declaration (; Declaration)\* ; Command end**

- Prüfe Regel für  $X^*$

- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] = \{;\}$
- $\text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] = \{;\}$
- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] \cap \text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] \neq \emptyset$

- Produktion ist aber transformierbar

**Block ::= begin Declaration ; (Declaration ;)\* Command end**

- Annahme:

$\text{starters}[[\text{Declaration};]] \cap \text{starters}[[\text{Command}]] = \emptyset$

- Aus Algol Grammatik

**Block ::= begin Declaration (; Declaration)\* ; Command end**

- Prüfe Regel für  $X^*$

- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] = \{;\}$
- $\text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] = \{;\}$
- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] \cap \text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] \neq \emptyset$

- Produktion ist aber transformierbar

**Block ::= begin Declaration ; (Declaration ;)\* Command end**

- Annahme:

$\text{starters}[[\text{Declaration};]] \cap \text{starters}[[\text{Command}]] = \emptyset$

- Aus Algol Grammatik

**Block ::= begin Declaration (; Declaration)\* ; Command end**

- Prüfe Regel für  $X^*$

- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] = \{;\}$
- $\text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] = \{;\}$
- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] \cap \text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] \neq \emptyset$

- Produktion ist aber transformierbar

**Block ::= begin Declaration ; (Declaration ;)\* Command end**

- Annahme:

$\text{starters}[[\text{Declaration};]] \cap \text{starters}[[\text{Command}]] = \emptyset$

- Aus Algol Grammatik

**Block ::= begin Declaration (; Declaration)\* ; Command end**

- Prüfe Regel für  $X^*$

- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] = \{;\}$
- $\text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] = \{;\}$
- $\text{starters}[[; \text{Declaration}]] \cap \text{follow}[[(; \text{Declaration})^*]] \neq \emptyset$

- Produktion ist aber transformierbar

**Block ::= begin Declaration ; (Declaration ;)\* Command end**

- Annahme:

$\text{starters}[[\text{Declaration};]] \cap \text{starters}[[\text{Command}]] = \emptyset$



## Annahme bis 1992

Rekursiver Abstieg funktioniert sinnvoll nur für  $k = 1$ ,  
exponentieller Worst-Case-Aufwand bei  $k > 1$ .

## Gegenbeispiel 1992: PCCTS (jetzt ANTLR)

Worst-case kann für Grammatiken typischer  
Programmiersprachen in der Regel vermieden werden,  
sogar bei  $k = \infty$ .

- Konstruktion von Top-Down-Parsern gut automatisierbar
- Für Java beispielsweise
  - ANTLR: LL( $k$ ) bis LL( $*$ )
  - JavaCC: LL( $k$ )

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Annahme bis 1992

Rekursiver Abstieg funktioniert sinnvoll nur für  $k = 1$ ,  
exponentieller Worst-Case-Aufwand bei  $k > 1$ .

## Gegenbeispiel 1992: PCCTS (jetzt ANTLR)

Worst-case kann für Grammatiken typischer  
Programmiersprachen in der Regel vermieden werden,  
sogar bei  $k = \infty$ .

- Konstruktion von Top-Down-Parsern gut automatisierbar
- Für Java beispielsweise
  - ANTLR: LL( $k$ ) bis LL( $*$ )
  - JavaCC: LL( $k$ )

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Annahme bis 1992

Rekursiver Abstieg funktioniert sinnvoll nur für  $k = 1$ ,  
exponentieller Worst-Case-Aufwand bei  $k > 1$ .

## Gegenbeispiel 1992: PCCTS (jetzt ANTLR)

Worst-case kann für Grammatiken typischer  
Programmiersprachen in der Regel vermieden werden,  
sogar bei  $k = \infty$ .

- Konstruktion von Top-Down-Parsern gut automatisierbar
- Für Java beispielsweise
  - ANTLR: LL( $k$ ) bis LL( $*$ )
  - JavaCC: LL( $k$ )

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

`Command ::= single-Command (; single-Command)*`

```
protected Command parseCommand() {  
    parseSingleCommand();  
    while (currentToken.kind == Token.SEMICOLON) {  
        acceptIt();  
        parseSingleCommand();  
    }  
}
```

`acceptIt ()`

- Könnte auch `accept (Token.SEMICOLON)` sein
- Würde aber überflüssige Fehlerüberprüfung vornehmen
  - Token wurde schon vorher in `while (...)` geprüft
- Also ohne weitere Bearbeitung akzeptieren

`Command ::= single-Command (; single-Command)*`

```
protected Command parseCommand() {  
    parseSingleCommand();  
    while (currentToken.kind == Token.SEMICOLON) {  
        acceptIt();  
        parseSingleCommand();  
    }  
}
```

## `acceptIt()`

- Könnte auch `accept(Token.SEMICOLON)` sein
- Würde aber überflüssige Fehlerüberprüfung vornehmen
  - Token wurde schon vorher in `while(...)` geprüft
- Also ohne weitere Bearbeitung akzeptieren

```
single-Command ::= Identifier ( := Expression  
                             | ( Expression )  
                             | ...
```

```
protected void parseSingleCommand() {  
    switch (currentToken.kind) {  
        case Token.IDENTIFIER: {  
            parseIdentifier();  
            switch (currentToken.kind) {  
                case Token.BECOMES: {  
                    acceptIt();  
                    parseExpression();  
                    break;  
                }  
                case Token.LPAREN: {  
                    acceptIt();  
                    parseExpression();  
                    accept(Token.RPAREN);  
                    break;  
                }  
                default: report a syntactic error  
            }  
        }  
        break;  
    }  
    ...  
}
```

Weitere Beispiele in PLPJ.

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
single-Command ::= Identifier ( := Expression  
                             | ( Expression )  
                             | ...
```

```
protected void parseSingleCommand() {  
    switch (currentToken.kind) {  
        case Token.IDENTIFIER: {  
            parseIdentifier();  
            switch (currentToken.kind) {  
                case Token.BECOMES: {  
                    acceptIt();  
                    parseExpression();  
                    break;  
                }  
                case Token.LPAREN: {  
                    acceptIt();  
                    parseExpression();  
                    accept(Token.RPAREN);  
                    break;  
                }  
                default: report a syntactic error  
            }  
        }  
        break;  
    }  
    ...  
}
```

Weitere Beispiele in PLPJ.

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Aufpassen bei
  - `parseIdentifizier`
  - `parseIntegerLiteral`
  - `parseOperator`
- ... hier nicht nur **Art** des Tokens relevant
- sondern **tatsächlicher** Text
  - `Token.IDENTIFIFIER`: foo, bar, pi, k9, ...
  - `Token.INTLITERAL`: 23, 42, 2006, ...
  - `Token.OPERATOR`: +, -, /, ...

↳ Eingabetext nicht nur auf Token-**Art** reduzieren, Text selbst muß **erhalten** bleiben

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



- Aufpassen bei
  - `parseIdentifizier`
  - `parseIntegerLiteral`
  - `parseOperator`
- ... hier nicht nur **Art** des Tokens relevant
- sondern **tatsächlicher** Text
  - `Token.IDENTIFIER`: foo, bar, pi, k9, ...
  - `Token.INTLITERAL`: 23, 42, 2006, ...
  - `Token.OPERATOR`: +, -, /, ...

↳ Eingabetext nicht nur auf Token-**Art** reduzieren, Text selbst muß **erhalten** bleiben

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Aufpassen bei
  - `parseIdentifizier`
  - `parseIntegerLiteral`
  - `parseOperator`
- ... hier nicht nur **Art** des Tokens relevant
- sondern **tatsächlicher** Text
  - `Token.IDENTIFIER`: foo, bar, pi, k9, ...
  - `Token.INTLITERAL`: 23, 42, 2006, ...
  - `Token.OPERATOR`: +, -, /, ...

↳ Eingabetext nicht nur auf Token-**Art** reduzieren, Text selbst muß **erhalten** bleiben

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Auszug aus Grammatik

```
single-Command ::= V-name := Expression  
                | Identifier ( Expression )  
                | if Expression then single-Command  
                  else single-Command  
                | ...
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Auszug aus Grammatik

```
single-Command ::= V-name := Expression
                | Identifier ( Expression )
                | if Expression then single-Command
                  else single-Command
                | ...
```

## Anfangsmengen

```
starters[[ V-name := Expression ]] = starters[[ V-name ]]
                                     = { Identifier }
starters[[ Identifier ( Expression ) ]] = { Identifier }
starters[[ if Expression then ... ]] = { if }
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Durch Zerlegung gewonnener Java-Code

```
private void parseSingleCommand () {
    switch (currentToken.kind) {

        case Token.IDENTIFIER: {
            parseVname ();
            accept (Token.BECOMES);
            parseExpression (); }
            break;

        case Token.IDENTIFIER: {
            parseIdentifer ();
            accept (Token.LPAREN);
            parseExpression ();
            accept (Token.RPAREN)

        }

        break;
        case Token.IF:
        ...
    default:
        ...
    }
```

Auszug aus Grammatik nach Ersetzen von **V-name** durch **Identifizier**

```
single-Command ::= Identifizier := Expression  
                | Identifizier ( Expression )  
                | if Expression then single-Command  
                  else single-Command
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

Auszug aus Grammatik nach Ersetzen von **V-name** durch **Identifier**

```
single-Command ::= Identifier := Expression
                 | Identifier ( Expression )
                 | if Expression then single-Command
                   else single-Command
```

Anfangsmengen

```
starters[[ Identifier := Expression ]] = { Identifier }
```

```
starters[[ Identifier ( Expression ) ]] = { Identifier }
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

Jetzt mit Linksausklammern

```
single-Command ::= Identifier ( := Expression | ( Expression ) )  
                | if Expression then single-Command  
                  else single-Command
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



Jetzt mit Linksausklammern

```
single-Command ::= Identifier ( := Expression | ( Expression ) )  
                | if Expression then single-Command  
                  else single-Command
```

Neue Anfangsmengen

```
starters[[ := Expression ]] = { := }
```

```
starters[[ ( Expression ) ]] = { ( }
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Auszug aus Grammatik vor Korrektur

```
Command ::= single-Command  
         | Command ; single-Command
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Auszug aus Grammatik vor Korrektur

```
Command ::= single-Command  
         | Command ; single-Command
```

## Anfangsmengen

```
starters[[ single-Command ]]  
        = { Identifier, if, while, let, begin }
```

```
starters[[ Command ; single-Command ]]  
        = { Identifier, if, while, let, begin }
```

## Java-Code

```
private void parseCommand () {  
    switch (currentToken.kind) {  
  
        case Token.IDENTIFIER:  
        case Token.IF:  
        case Token.WHILE:  
        case Token.LET:  
        case Token.BEGIN:  
            parseSingleCommand();  
            break;  
  
        case Token.IDENTIFIER:  
        case Token.IF:  
        case Token.WHILE:  
        case Token.LET:  
        case Token.BEGIN:  {  
            parseCommand();  
            accept (Token.SEMICOLON)  
            parseSingleCommand();  
        }  
            break;  
    }  
}
```

```
Program      ::= single-Command
Command      ::= single-Command
              | Command ; single-Command
single-Command ::= V-name := Expression
              | Identifier ( Expression )
              | ...
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
Program      ::= single-Command
Command     ::= single-Command
              | Command ; single-Command
single-Command ::= V-name := Expression
              | Identifier ( Expression )
              | ...
```

Linksrekursion

Linksausklammern

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
Program      ::= single-Command
Command      ::= single-Command
               ( ; single-Command)*
single-Command ::= Identifier ( := Expression
                               | ( Expression ) )
               | ...
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Parser mit rekursivem Abstieg baut impliziten Syntaxbaum auf
  - Durch den Aufrufgraph der Parse-Methoden
- In einem Ein-Pass-Compiler unproblematisch
- Reicht nicht für Multi-Pass Compiler
  - **Weitergabe** der Daten zwischen Passes erforderlich

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



- Parser mit rekursivem Abstieg baut impliziten Syntaxbaum auf
  - Durch den Aufrufgraph der Parse-Methoden
- In einem Ein-Pass-Compiler unproblematisch
- Reicht nicht für Multi-Pass Compiler
  - Weitergabe der Daten zwischen Passes erforderlich

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Parser mit rekursivem Abstieg baut impliziten Syntaxbaum auf
  - Durch den Aufrufgraph der Parse-Methoden
- In einem Ein-Pass-Compiler unproblematisch
- Reicht nicht für Multi-Pass Compiler
  - **Weitergabe** der Daten zwischen Passes erforderlich

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Beobachtung: Jedes Nicht-Terminalsymbol **XYZ** wird durch eine Parse-Methode `parseXYZ` bearbeitet  
`protected void parseXYZ ( )`
  - Bisher nicht benutzt: Funktionsergebnis und Parameter
- Idee: Ausnutzung der Möglichkeiten zum Aufbau eines AST

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Beobachtung: Jedes Nicht-Terminalsymbol **XYZ** wird durch eine Parse-Methode `parseXYZ` bearbeitet  
`protected void parseXYZ ( )`
  - Bisher nicht benutzt: Funktionsergebnis und Parameter
- Idee: Ausnutzung der Möglichkeiten zum Aufbau eines AST

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

# AST Knoten von Mini-Triangle

Program	::= Command	Program
Command	::= Command ; Command   V-name := Expression   Identifier ( Expression )   <b>if</b> Expression <b>then</b> single-Command   <b>else</b> single-Command   <b>while</b> Expression <b>do</b> single-Command   <b>let</b> Declaration <b>in</b> single-Command	SequentialCmd AssignCmd CallCmd IfCmd WhileCmd LetCmd
Expression	::= Integer-Literal   V-name   Operator Expression   Expression Operator Expression	IntegerExpr VnameExpr UnaryExpr BinaryExpr
V-name	::= Identifier	SimpleVname
Declaration	::= Declaration ; Declaration   <b>const</b> Identifier ~ Expression   <b>var</b> Identifier : Type-denoter	SeqDecl ConstDecl VarDecl
Type-denoter	::= Identifier	SimpleTypeDen

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

# AST Knoten von Mini-Triangle

Program	::= Command	Program
Command	::= Command ; Command   V-name := Expression   Identifier ( Expression )   <b>if</b> Expression <b>then</b> single-Command <b>else</b> single-Command   <b>while</b> Expression <b>do</b> single-Command   <b>let</b> Declaration <b>in</b> single-Command	SequentialCmd AssignCmd CallCmd IfCmd WhileCmd LetCmd
Expression	::= Integer-Literal   V-name   Operator Expression   Expression Operator Expression	IntegerExpr VnameExpr UnaryExpr BinaryExpr
V-name	::= Identifier	SimpleVname
Declaration	::= Declaration ; Declaration   <b>const</b> Identifier ~ Expression   <b>var</b> Identifier : Type-denoter	SeqDecl ConstDecl VarDecl
Type-denoter	::= Identifier	SimpleTypeDen

AST Knoten von Mini-Triangle

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

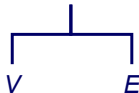
# Sub-ASTs von Mini-Triangle

Command	::= Command ; Command	SequentialCmd
	V-name := Expression	AssignCmd
	Identifier ( Expression )	CallCmd
	if Expression then single-Command	IfCmd
	else single-Command	
	while Expression do single-Command	WhileCmd
	let Declaration in single-Command	LetCmd

SequentialCmd



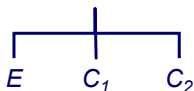
AssignCmd



CallCmd



IfCmd



WhileCmd



LetCmd



- Abstrakte Basisklasse

```
public abstract class AST { ... }
```

- Eigene Subklassen für alle Arten von AST-Knoten

Jede Subklasse hat Instanzvariablen für ihre Unterknoten

```
public class Program extends AST {  
    public Command C;  
    ...  
}
```

Abstrakte Basisklasse aller **Command** AST-Knoten

```
public abstract class Command extends AST {
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



- Abstrakte Basisklasse

```
public abstract class AST { ... }
```

- Eigene Subklassen für alle Arten von AST-Knoten

Jede Subklasse hat Instanzvariablen für ihre Unterknoten

```
public class Program extends AST {  
    public Command C;  
    ...  
}
```

Abstrakte Basisklasse aller **Command** AST-Knoten

```
public abstract class Command extends AST {
```

- Abstrakte Basisklasse

```
public abstract class AST { ... }
```

- Eigene Subklassen für alle Arten von AST-Knoten

Jede Subklasse hat Instanzvariablen für ihre Unterknoten

```
public class Program extends AST {  
    public Command C;  
    ...  
}
```

Abstrakte Basisklasse aller **Command** AST-Knoten

```
public abstract class Command extends AST {
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
abstract class Command  
  extends AST { ... }
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

**ASTs**

Scanning

```
abstract class Command  
  extends AST { ... }
```

```
Command  
 ::= Command ; Command           SequentialCmd  
  | V-name := Expression         AssignCmd  
  | Identifier ( Expression )    CallCmd  
  | if Expression then single-Command IfCmd  
    else single-Command  
  | while Expression do single-Command WhileCmd  
  | let Declaration in single-Command LetCmd
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

# Unterklassen der `Command`-Klasse

```
abstract class Command  
  extends AST { ... }
```

```
Command  
 ::= Command ; Command  
 | V-name := Expression  
 | Identifier ( Expression )  
 | if Expression then single-Command  
   else single-Command  
 | while Expression do single-Command  
 | let Declaration in single-Command  
 SequentialCmd  
 AssignCmd  
 CallCmd  
 IfCmd  
 WhileCmd  
 LetCmd
```

```
public class SequentialCmd extends Command {  
  public Command c1, c2;  
  ...  
}  
public class AssignCmd extends Command {  
  public Vname v;  
  public Expression e;  
  ...  
}  
public class CallCmd extends Command {  
  public Identifier i;  
  public Expression e;  
  ...  
}  
public class IfCmd extends Command {  
  public Expression e;  
  public Command c1, c2;  
  ...  
}
```



Die **AST Subklassen** haben auch entsprechende Konstruktoren zur korrekten Initialisierung der Objekte.

etc.

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



- Blätter des ASTs, hier ist **Text** des Tokens relevant
- Bezeichner, Zahlen, Operatoren

## Abstrakte Superklasse aller Terminal-Knoten

```
public abstract class Terminal extends AST {  
    public String spelling;  
    ...  
}
```

## Konkrete Unterklasse für Bezeichner

```
public class Identifier extends Terminal {  
    public Identifier (String spelling) {  
        this.spelling = spelling;  
    }  
}
```

- Blätter des ASTs, hier ist **Text** des Tokens relevant
- Bezeichner, Zahlen, Operatoren

## Abstrakte Superklasse aller Terminal-Knoten

```
public abstract class Terminal extends AST {  
    public String spelling;  
    ...  
}
```

## Konkrete Unterklasse für Bezeichner

```
public class Identifier extends Terminal {  
    public Identifier (String spelling) {  
        this.spelling = spelling;  
    }  
}
```

- Blätter des ASTs, hier ist **Text** des Tokens relevant
- Bezeichner, Zahlen, Operatoren

## Abstrakte Superklasse aller Terminal-Knoten

```
public abstract class Terminal extends AST {  
    public String spelling;  
    ...  
}
```

## Konkrete Unterklasse für Bezeichner

```
public class Identifier extends Terminal {  
    public Identifier (String spelling) {  
        this.spelling = spelling;  
    }  
}
```



- Während des rekursiven Abstiegs
- Idee: `parseN`-Methode liefert AST für **N**-Phrase
- AST für **N**-Phrase wird durch Zusammensetzen der ASTs der Subphrasen erstellt

Beispiel für Produktion  $N ::= X$

```
protected ASTN parseN () {  
    ASTN itsAST;  
    Parse X, sammele Subphrasen-ASTs in itsAST  
    return itsAST  
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Während des rekursiven Abstiegs
- Idee: `parseN`-Methode liefert AST für **N**-Phrase
- AST für **N**-Phrase wird durch Zusammensetzen der ASTs der Subphrasen erstellt

## Beispiel für Produktion $N ::= X$

```
protected ASTN parseN () {  
    ASTN itsAST;  
    Parse X, sammle Subphrasen-ASTs in itsAST  
    return itsAST  
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

EBNF

**Command ::= single-Command ( ; single-Command)\***

AST

**Command ::= Command ; Command**      SequentialCmd

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

EBNF

**Command ::= single-Command ( ; single-Command)\***

AST

**Command ::= Command ; Command**      **SequentialCmd**

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## EBNF

**Command ::= single-Command ( ; single-Command)\***

## AST

**Command ::= Command ; Command**      **SequentialCmd**

```
protected Command parseCommand() {
    Command c1AST = parseSingleCommand();
    while (currentToken.kind == Token.SEMICOLON) {
        acceptIt();
        Command c2AST = parseSingleCommand();
        c1AST = new SequentialCmd(c1AST, c2AST);
    }
    return c1AST;
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

EBNF

**Command ::= single-Command ( ; single-Command)\***

AST

**Command ::= Command ; Command**      **SequentialCmd**

```
protected Command parseCommand() {
    Command c1AST = parseSingleCommand();
    while (currentToken.kind == Token.SEMICOLON) {
        acceptIt();
        Command c2AST = parseSingleCommand();
        c1AST = new SequentialCmd(c1AST, c2AST);
    }
    return c1AST;
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

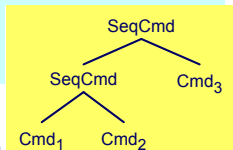
## EBNF

**Command ::= single-Command ( ; single-Command)\***

## AST

**Command ::= Command ; Command**      **SequentialCmd**

```
protected Command parseCommand() {  
    Command c1AST = parseSingleCommand();  
    while (currentToken.kind == Token.SEMICOLON) {  
        acceptIt();  
        Command c2AST = parseSingleCommand();  
        c1AST = new SequentialCmd(c1AST, c2AST);  
    }  
    return c1AST;  
}
```



OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
public Declaration parseSingleDeclaration() {
    Declaration declAST;
    switch (currentToken.kind) {
        case Token.CONST: {          single-Declaration ::= const Identifier ~ Expression
            acceptIt();
            Identifier iAST = parseIdentifier();
            accept(Token.IS);
            Expression eAST = parseExpression();
            declAST = new ConstDeclaration(iAST, eAST);
        } break;
        case Token.VAR: {           single-Declaration ::= var Identifier : Type-denoter
            acceptIt();
            Identifier iAST = parseIdentifier();
            accept(Token.COLON);
            TypeDenoter tAST = parseTypeDenoter();
            declAST = new VarDeclaration(iAST, tAST);
        } break;
        default:
            melde Syntaxfehler
    }
    return declAST;
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning





## Zwei relevante Methoden im Parser

```
public class Parser {  
    Token currentToken;  
  
    protected void accept(byte expectedKind) {  
        if (currentToken.kind == expectedKind)  
            currentToken = scanner.scan() ;  
        else  
            report syntax error  
    }  
  
    protected void acceptIt() {  
        currentToken = scanner.scan() ;  
    }  
  
    ...  
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Auch genannt **lexikalische Analyse** oder **Lexer**
- Ähnlich Parsing, aber auf einer Ebene feinerer Details
  - Parser: Arbeitet mit Tokens, die zu Phrasen gruppiert werden
  - Scanner: Arbeitet mit Zeichen, die zu Tokens gruppiert werden
- Aufgaben des Scanners
  - Bilde Tokens aus Zeichen
  - Entferne unerwünschte Leerzeichen, Zeilenvorschübe, etc. (white space)
  - Führe Buch über Zeilennummern und Eingabedateinamen

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Auch genannt lexikalische Analyse oder Lexer
- Ähnlich Parsing, aber auf einer Ebene feinerer Details
  - Parser: Arbeitet mit Tokens, die zu Phrasen gruppiert werden
  - Scanner: Arbeitet mit Zeichen, die zu Tokens gruppiert werden
- Aufgaben des Scanners
  - Bilde Tokens aus Zeichen
  - Entferne unerwünschte Leerzeichen, Zeilenvorschübe, etc. (white space)
  - Führe Buch über Zeilennummern und Eingabedateinamen

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- Auch genannt lexikalische Analyse oder Lexer
- Ähnlich Parsing, aber auf einer Ebene feinerer Details
  - Parser: Arbeitet mit Tokens, die zu Phrasen gruppiert werden
  - Scanner: Arbeitet mit Zeichen, die zu Tokens gruppiert werden
- Aufgaben des Scanners
  - Bilde Tokens aus Zeichen
  - Entferne unerwünschte Leerzeichen, Zeilenvorschübe, etc. (white space)
  - Führe Buch über Zeilennummern und Eingabedateinamen

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

Tokens werden durch REs definiert, bestehend aus:

- Einzelzeichen
- Operatoren
  - Konkatenation: **A B**
  - Alternative: **A | B**
  - Optionalität: **A?**
  - Wiederholung: **A\***
  - Vordefinierte REs (sog. Macros)
- **aber:** keine rekursiven Definitionen

- Reguläre Ausdrücke können durch **Übergangsdigramme** dargestellt werden
  - Endliche Automaten
  - Kanten/Transitionen beschriftet mit **Eingabesymbolen**
  - Zustände/Knoten
    - Genau ein Startzustand
    - Beliebig viele Endzustände (akzeptierende Zustände)

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

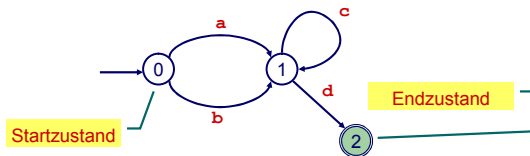
Konstruktion

ASTs

Scanning

- Reguläre Ausdrücke können durch **Übergangsdigramme** dargestellt werden
  - Endliche Automaten
  - Kanten/Transitionen beschriftet mit **Eingabesymbolen**
  - Zustände/Knoten
    - Genau ein Startzustand
    - Beliebig viele Endzustände (akzeptierende Zustände)

Beispiel: **(a | b) c\* d**



## Systematische Konstruktion von Scannern

- 1 Formuliere lexikalische Grammatik in EBNF
  - Falls nötig: Transformiere für rekursiven Abstieg
- 2 Implementiere Scan-Methoden `scanN` für jede Produktion `N ::= X`, mit Rumpf passend zu `X`
- 3 Implementiere Scanner-Klasse, bestehend aus
  - `protected` Instanzvariable `currentChar`
  - `protected` Methoden `take` und `takeIt`
    - Analog zu `accept/acceptIt` im Parser
    - Lesen diesmal aber zeichenweise in `currentChar`
  - `protected` Scan-Methoden aus 2., erweitert um Erstellen von Token-Objekten
  - Eine `public` Methode `scan`, die den nächsten Token liefert
    - Überspringt dabei white space und Kommentare



## Systematische Konstruktion von Scannern

- 1 Formuliere lexikalische Grammatik in EBNF
  - Falls nötig: Transformiere für rekursiven Abstieg
- 2 Implementiere Scan-Methoden `scanN` für jede Produktion `N ::= X`, mit Rumpf passend zu `X`
- 3 Implementiere Scanner-Klasse, bestehend aus
  - `protected` Instanzvariable `currentChar`
  - `protected` Methoden `take` und `takeIt`
    - Analog zu `accept/acceptIt` im Parser
    - Lesen diesmal aber zeichenweise in `currentChar`
  - `protected` Scan-Methoden aus 2., erweitert um Erstellen von Token-Objekten
  - Eine `public` Methode `scan`, die den nächsten Token liefert
    - Überspringt dabei white space und Kommentare

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## Systematische Konstruktion von Scannern

- 1 Formuliere lexikalische Grammatik in EBNF
  - Falls nötig: Transformiere für rekursiven Abstieg
- 2 Implementiere Scan-Methoden `scanN` für jede Produktion `N ::= X`, mit Rumpf passend zu `X`
- 3 Implementiere Scanner-Klasse, bestehend aus
  - `protected` Instanzvariable `currentChar`
  - `protected` Methoden `take` und `takeIt`
    - Analog zu `accept/acceptIt` im Parser
    - Lesen diesmal aber zeichenweise in `currentChar`
  - `protected` Scan-Methoden aus 2., erweitert um Erstellen von Token-Objekten
  - Eine `public` Methode `scan`, die den nächsten Token liefert
    - Überspringt dabei white space und Kommentare

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
public class Scanner {
    protected char currentChar;
    protected byte currentKind;
    protected StringBuffer currentSpelling;

    public Token scan() {
        discard separators and whitespace;
        currentSpelling = new StringBuffer("");
        currentKind      = scanToken();
        return new Token(currentKind,
                        currentSpelling.toString());
    }

    protected byte scanToken() {
        switch (currentChar) {
            ...
        }
    }

    protected void take(char expectedChar) { ... }
    protected void takeIt() { ... }
    ...
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
public class Scanner {  
    protected char currentChar;  
    protected byte currentKind;  
    protected StringBuffer currentSpelling;  
  
    public Token scan() {  
        discard separators and whitespace;  
        currentSpelling = new StringBuffer("");  
        currentKind      = scanToken();  
        return new Token(currentKind,  
                          currentSpelling.toString());  
    }  
  
    protected byte scanToken() {  
        switch (currentChar) {  
            ...  
        }  
    }  
  
    protected void take(char expectedChar) { ... }  
    protected void takeIt() { ... }  
    ...  
}
```

Wäre besser lokale  
Variable in `scan`.

Hänge `currentChar` an `currentSpelling`  
an und lese nächstes Zeichen in `currentChar`.

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## 1. Lexikalische Grammatik in EBNF verfassen

```
Token ::= Identifier | Integer-Literal | Operator |  
        ; | : | := | ~ | ( | ) | eol  
Identifier ::= Letter (Letter | Digit)*  
Integer-Literal ::= Digit Digit*  
Operator ::= + | - | * | / | < | > | =  
Separator ::= Comment | space | eol  
Comment ::= ! Graphic* eol
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

## 1. Lexikalische Grammatik in EBNF verfassen

```
Token ::= Identifier | Integer-Literal | Operator |  
        ; | : | := | ~ | ( | ) | eot  
Identifier ::= Letter (Letter | Digit)*  
Integer-Literal ::= Digit Digit*  
Operator ::= + | - | * | / | < | > | =  
Separator ::= Comment | space | eol  
Comment ::= ! Graphic* eol
```

## 2. Umstellen für rekursiven Abstieg: Ersetzung und Linksausklammern

```
Token ::= Letter (Letter | Digit)*  
        | Digit Digit*  
        | + | - | * | / | < | > | =  
        | ; | : | (=| $\mathcal{E}$ ) | ~ | ( | ) | eot  
Separator ::= ! Graphic* eol | space | eol
```

Hier eigentlich nicht nötig. Aber: Schneller!

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- EBNF kann **nicht** trennen zwischen
  - Schlüsselworten
  - Bezeichnern
- Wird beides als **Identifizier** beschrieben

↳ während des Scannens reparieren.

- EBNF kann **nicht** trennen zwischen
    - Schlüsselworten
    - Bezeichnern
  - Wird beides als **Identifizier** beschrieben
- ↳ während des Scannens reparieren.

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

- EBNF kann **nicht** trennen zwischen
  - Schlüsselworten
  - Bezeichnern
- Wird beides als **Identifizier** beschrieben

↳ während des Scannens reparieren.

- EBNF kann **nicht** trennen zwischen
    - Schlüsselworten
    - Bezeichnern
  - Wird beides als **Identifizier** beschrieben
- ↳ während des Scannens reparieren.

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
public class Scanner {  
  
    private char currentChar = get first source char;  
    private StringBuffer currentSpelling;  
    private byte currentKind;  
  
    private char take(char expectedChar) {  
        if (currentChar == expectedChar) {  
            currentSpelling.append(currentChar);  
            currentChar = get next source char;  
        }  
        else report lexical error  
    }  
    private char takelt() {  
        currentSpelling.append(currentChar);  
        currentChar = get next source char;  
    }  
    ...  
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
...  
public Token scan() {  
    // Get rid of potential separators before  
    // scanning a token  
    while ( (currentChar == '!')  
           || (currentChar == ' ' )  
           || (currentChar == '\n' ) )  
        scanSeparator();  
    currentSpelling = new StringBuffer();  
    currentKind = scanToken();  
    return new Token(currentkind,  
                    currentSpelling.toString());  
}
```

```
private void scanSeparator() { ... }  
private byte scanToken() { ... }  
...
```

Entwicklung sehr  
ähnlich zu Parse-  
Methoden

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
Token ::= Letter (Letter | Digit)*  
        | Digit Digit*  
        | + | - | * | / | < | > | =  
        | ; | : (=|ε) | ~ | ( | ) | eot
```

```
private byte scanToken() {  
    switch (currentChar) {  
        case 'a': case 'b': ... case 'z':  
        case 'A': case 'B': ... case 'Z':  
            scan Letter (Letter | Digit)*  
            return Token.IDENTIFIER;  
        case '0': ... case '9':  
            scan Digit Digit*  
            return Token.INTLITERAL ;  
        case '+': case '-': ... : case '=':  
            takelt();  
            return Token.OPERATOR;  
        ...etc...  
    }  
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
...  
return ...  
case 'a': case 'b': ... case 'z':  
case 'A': case 'B': ... case 'Z':  
  takelt();  
  while (isLetter(currentChar)  
         || isDigit(currentChar) )  
    takelt();  
  return Token.IDENTIFIER;  
case '0': ... case '9':  
...  

```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning

```
...  
public Token scan() {  
    // Get rid of potential separators before  
    // scanning a token  
    while ( (currentChar == '!')  
            || (currentChar == ' ' )  
            || (currentChar == '\n' ) )  
        scanSeparator();  
    currentSpelling = new StringBuffer();  
    currentKind = scanToken();  
    return new Token(currentkind,  
                    currentSpelling.toString());  
}
```

Wo nun Unterscheidung zwischen Bezeichnern und  
Schlüsselworten?

# Ändern von Token-Art während der Konstruktion

```
public class Token {  
    ...  
    public Token(byte kind, String spelling) {  
        if (kind == Token.IDENTIFIER) {  
            int currentKind = firstReservedWord;  
            boolean searching = true;  
            while (searching) {  
                int comparison = tokenTable[currentKind].compareTo(spelling);  
                if (comparison == 0) {  
                    this.kind = currentKind;  
                    searching = false;  
                } else if (comparison > 0 || currentKind == lastReservedWord) {  
                    this.kind = Token.IDENTIFIER;  
                    searching = false;  
                } else {  
                    currentKind++;  
                }  
            }  
        } else  
            this.kind = kind;  
    }  
    ...  
}
```

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver

Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning



```
public class Token {  
    ...  
  
    private static String[] tokenTable = new String[] {  
        "<int>", "<char>", "<identifier>", "<operator>",  
        "array", "begin", "const", "do", "else", "end",  
        "func", "if", "in", "let", "of", "proc", "record",  
        "then", "type", "var", "while",  
        ":", ":", ":", ":", ":", ":", ":", ":", ":", ":", ":", ":", ":", ":", ":",  
        "<error>" };  
  
    private final static int firstReservedWord = Token.ARRAY,  
                           lastReservedWord = Token.WHILE;  
  
    ...  
}
```

- Sehr mechanischer Ablauf
- Gut automatisierbar
- Beispiele
  - JLex/JFlex: Scanner basiert auf endlichem Automaten
  - Eingebaute Scanner in Parser-Generatoren  
ANTLR/JavaCC

OC

A. Koch

Organisatorisch

Kompilierung

Syntaxanalyse

Parsing

Rekursiver  
Abstieg

Konstruktion

ASTs

Scanning