



A. Koch

# Optimierende Compiler

## 2. Kompilierung

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen  
Informatik, TU Darmstadt

Sommersemester 2008

# Organisatorisches



A. Koch

- Dienstag und Donnerstag Anmeldung zu den praktischen Arbeiten
- 6 Dreiergruppen

Programmgrößen aus 2006 in Zeilen Java-Code

6378
10487
3740
11225
4253

# Benotung der IV4-Variante



A. Koch

- Viel Freiheit bei der Realisierung
- Keine starren Bewertungsrichtlinien
  - Analog zu Diplom-Arbeit o.ä.



- Brauchbar kommentierte
- Brauchbar dokumentierte
- im Wesentlichen **funktionierende**

Lösung der Aufgabenstellung

➔ **Note 2,0**

- Kleinere Schwächen sind akzeptabel
  - Einbußen in Lösungsqualität, Rechenzeit, Speicher, ...

# Aber Luft nach **oben** Richtung Note 1,0



A. Koch

Beispielsweise für:

- Sehr gute eigene Algorithmen und Datenstrukturen
- Umfassende Kommentierung und Dokumentation
- Sehr gute Lösungsqualität
- Sehr kurze Rechenzeiten
- Niedriger Speicherverbrauch
- ...



- Zusammengesetzt aus
  - Erste Klausur (37,5%)
  - Programmierprojekt (62,5%)
    - Funktion, Code-Qualität, ...
  - Kolloquien
- Individuelle Prüfung
  - Nur in Zweifelsfällen
  - Bei nichtnachvollziehbarer Mitarbeit



A. Koch

# Kompilierung

# Ablauf der Übersetzung 1



A. Koch

## Terminologie: Phase

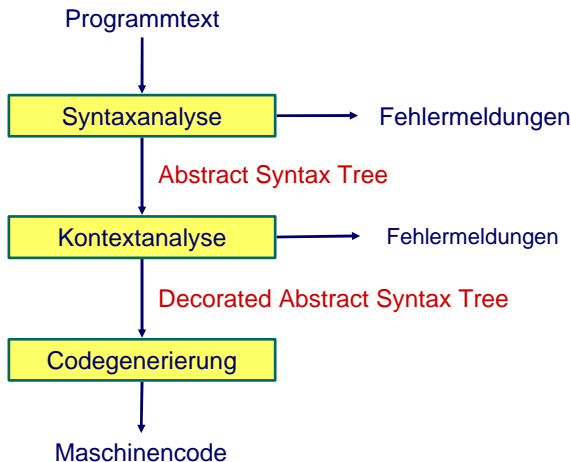
- Transformationsschritte
  - Von Quellcode
  - ... zum Maschinencode
- Entspricht häufig den Teilen der Sprachspezifikation
  - 1 Syntax → Syntaxanalyse
  - 2 Kontextuelle Einschränkungen → Kontextanalyse
  - 3 Semantik → Codegenerierung



# Ablauf der Übersetzung 2



A. Koch



# Ablauf der Übersetzung 3



A. Koch

Terminologie: Durchgang (*pass*)

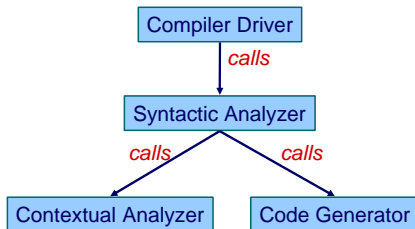
- Kompletter Durchgang des Programmes
- Läuft über Quelltext oder IR
- Pass *kann* Phase entsprechen
- ... muss aber nicht!
- Einzelner Pass kann mehrere Phasen durchführen
- Aufbau des Compiles wird von der Anzahl der Passes dominiert

# Ein-Pass Compiler



- 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

A. Koch

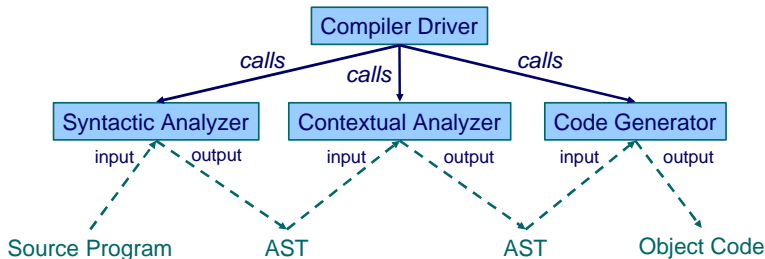


# Multi-Pass Compiler



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

A. Koch



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



A. Koch

	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?

# Beispiel Multi-Pass



A. Koch

Java-Compilierung **erfordert** mehrere Passes

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

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

# Aufbau des Triangle-Compilers



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

A. Koch

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

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

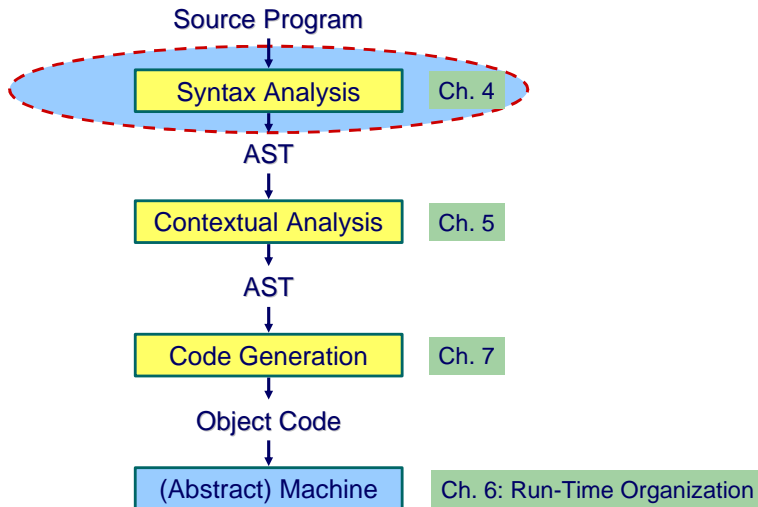
        Program theAST = parser.parse();
        checker.check(theAST);
        generator.encode(theAST);
    }

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

# Syntaxanalyse



A. Koch

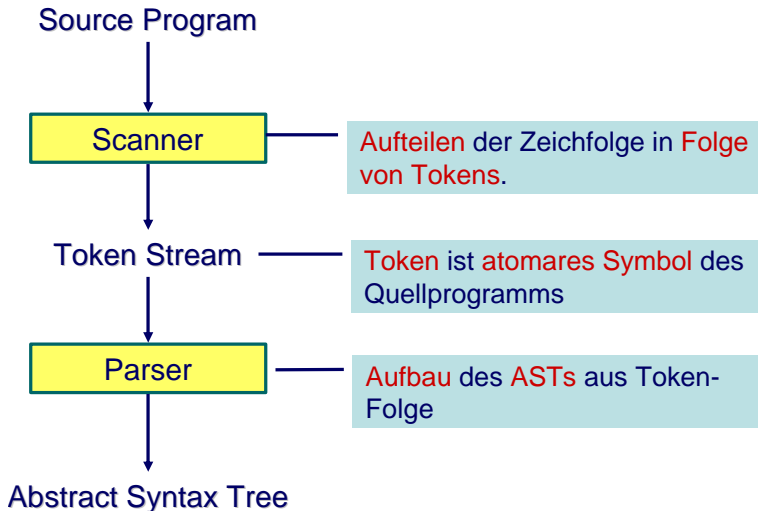




# Subphasen der Syntaxanalyse



A. Koch





## 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))
```

A. Koch

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 ) )
```

# Tokens



A. Koch

- **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

# Konstanten für Token-Arten



A. Koch

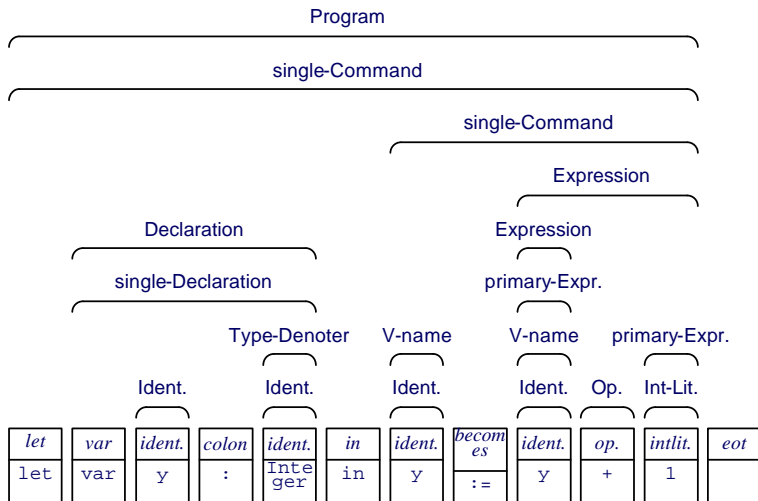
```
public class Token {  
    ...  
    public static final byte  
        IDENTIFIER = 0,  
        INTLITERAL = 1,  
        OPERATOR = 2,  
        BEGIN = 3,  
        ...  
        EOT = 20; // end-of-text  
}
```

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

# Parsen der Token-Folge



A. Koch



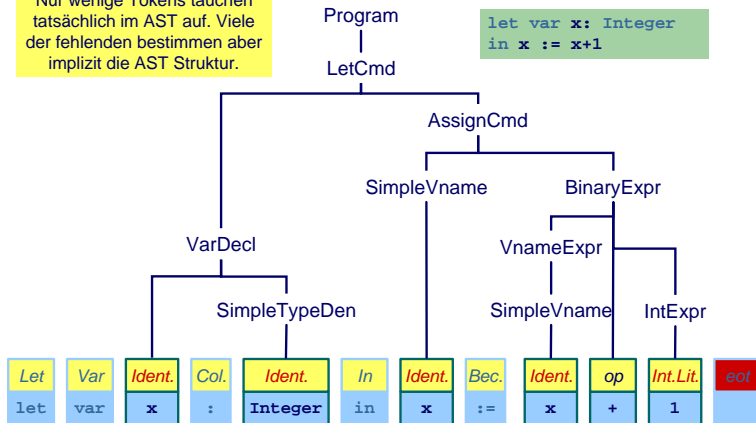
# Aufbau des AST aus Token-Folge



A. Koch

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
```



# Kurzwiederholung Grammatiken



A. Koch

- 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

# Beispiel: Produktionen in EBNF



A. Koch

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 ) *
```



# Reguläre Ausdrücke und Grammatiken



A. Koch

- 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

# Transformation von Grammatiken



A. Koch

## Hilfsmittel

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

# Grammatik-Transformation durch Gruppierung



A. Koch

- 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** |  $\varepsilon$

# Grammatik-Transformation durch Linksausklammern



A. Koch

- 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)
```

# Beseitigung von Linksrekursion



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

A. Koch

Beispiel:



Identifer ::= Letter  
          | Identifier Letter  
          | Identifier Digit

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

# Kombinierter Fall



A. Koch

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

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

# 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

A. Koch

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!

# Nutzen von Grammatiktransformationen



A. Koch

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



# Parsing Terminologie



A. Koch

**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



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

# Beispiel: Micro-English



## Produktionen

A. Koch

**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 .



## 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

# Bottom-Up Parsing 2



A. Koch

Zwei Arten von Aktionen

**Shift** Lese Zeichen ein

- Zusätzlich: Und lege es auf dem Stack ab

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

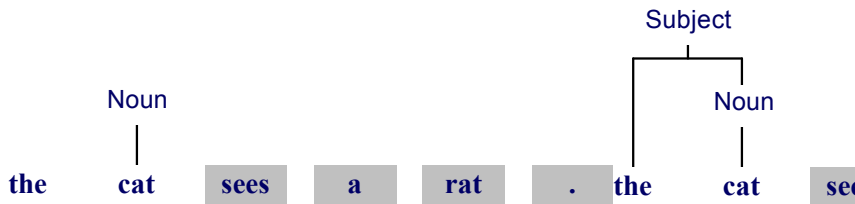
- Zusätzlich: Oberste Elemente des Stapels müssen RHS von  $p$  entsprechen, ersetze durch LHS von  $p$  (Zusammenfassen)
- Ende wenn Startsymbol  $S$  erreicht und Eingabetext komplett gelesen

# Beispiel Bottom-Up Parsing

the cat sees a rat .



A. Koch



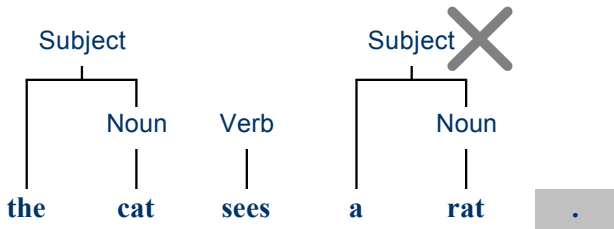
Sentence ::= Subject Verb Object .  
Subject ::= I | a Noun | the Noun  
Object ::= me | a Noun | the Noun  
Noun ::= cat | mat | rat  
Verb ::= like | is | see | sees

# Schwierigkeit bei Bottom-Up Parsing



A. Koch

**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



# Top-Down Parsing 2



A. Koch

## Aktion

- Expandiere jeweils das am weitesten 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

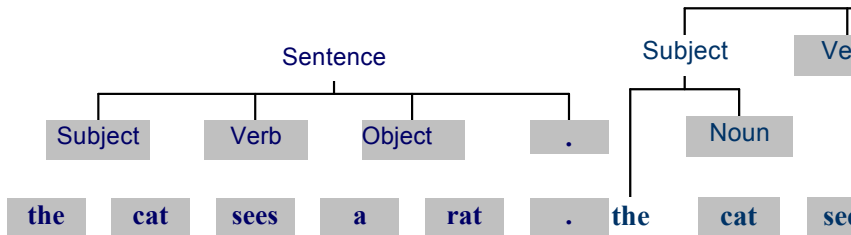
# Beispiel Top-Down Parsing



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

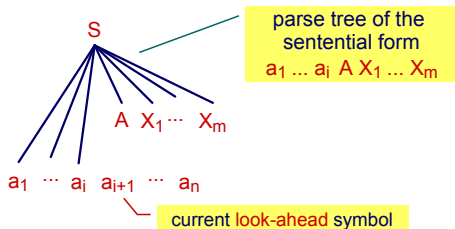
A. Koch



# Hintergrund Top-Down Parsing



A. Koch



Falls es möglich ist,

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

dann ist die Grammatik  $LL(k)$

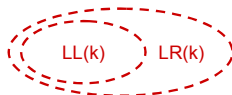
- **L**: Lese Eingabetext von links nach rechts
- **L**: Leite immer vom am weitesten links stehenden Nicht-Terminal ab.

# Vergleich Top-Down mit Bottom-Up Parsing



- 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

A. Koch



# Parsen mit rekursivem Abstieg

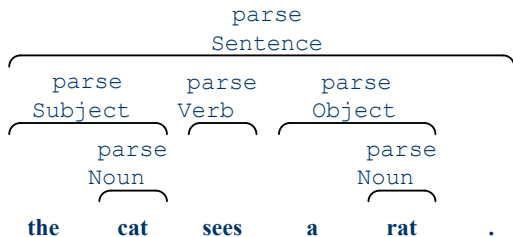


**Einfache** Implementierung der Top-Down Strategie, Idee:

- 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

A. Koch

Beispiel:



# Beispiel für Micro-English 1



A. Koch

Sentence ::= Subject Verb Object .

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

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

# Beispiel für Micro-English 2



Subject ::= I | a Noun | the Noun

A. Koch

```
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.

# Beispiel für Micro-English 3



```
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() { ... }
    ...
}
```

```
public class
    protected

    public vo
        curren
        parseS
        check th
    }

    protected
    protected
    protected
    protected
    protected
    protected
    ...
}
```





- **currentToken** enthält nacheinander die Tokens des Eingabetextes
- Ablauf einer Methode **parseN**
  - Bei Eintritt enthält **currentToken** eines der Token, **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

# Systematische Konstruktion von Parseern



## Entwicklung von Parseern mit rekursivem Abstieg

A. Koch

- 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

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

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

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

# Berechnungsregeln für starters[[**X**]]



A. Koch

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

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

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

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

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

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

Ausbügeln der Ungenauigkeiten später (siehe Folie 56)

# Inhalt der `parseN`-Methoden



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

A. Koch

$\varepsilon$  ; (=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 ()` ;

# Folgemengen



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

A. Koch

Beispiel

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

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

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

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

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

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

# Anwendbarkeit der Zerlegungsregeln



A. Koch

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!

# Verfeinerte Zerlegungsregeln



A. Koch

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**]]

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

Analog für **P\***. Korrigiere so Folie 52.



# Beispiel für nicht-LL(1) Grammatik



A. Koch

- 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  $k > 1$ .

A. Koch

## 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( $k$ )

# Parser für Mini-Triangle: Grammatikanpassung



A. Koch

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

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

# Parser für Mini-Triangle: `parseCommand`



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

A. Koch

```
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

# Parser für Mini-Triangle: `parseSingleCommand`



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

A. Koch

```
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.



- 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

# Häufige Fehler: Grammatik ist nicht LL(1)

## Grammatik



## Auszug aus Grammatik

A. Koch

```
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 }
```

# Häufige Fehler: Grammatik ist nicht LL(1)

Implementierung des Parsers



## Durch Zerlegung gewonnener Java-Code

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

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

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

        }

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

A. Koch



# Häufige Fehler: Linksausklammern vergessen



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

A. Koch

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

Anfangsmengen

$\text{starters}[[ \text{Identifier} := \text{Expression} ]] = \{ \text{Identifier} \}$

$\text{starters}[[ \text{Identifier} ( \text{Expression} ) ]] = \{ \text{Identifier} \}$

# Häufige Fehler: Linksausklammern vergessen



A. Koch

Jetzt mit Linksausklammern

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

Neue Anfangsmengen

$$\text{starters}[[ := \text{Expression} ]] = \{ := \}$$
$$\text{starters}[[ ( \text{Expression} ) ]] = \{ ( \}$$

# Häufige Fehler: Linksrekursion nicht beseitigt



A. Koch

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 }
```

# Häufige Fehler: Linksrekursion nicht beseitigt



## 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;
    }
```

A. Koch

# Abstrakte Syntaxbäume 1



A. Koch

- 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

# Abstrakte Syntaxbäume 2



A. Koch

- 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

# AST Knoten von Mini-Triangle



Program ::= Command

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

Expression ::= Integer-Literal

| V-name

| Operator Expression

| Expression Operator Expression

V-name ::= Identifier

Declaration ::= Declaration ; Declaration

| **const** Identifier ~ Expression

| **var** Identifier : Type-denoter

Type-denoter ::= Identifier

Program

SequentialCmd

AssignCmd

CallCmd

IfCmd

WhileCmd

LetCmd

IntegerExpr

VnameExpr

UnaryExpr

BinaryExpr

SimpleVname

SeqDecl

ConstDecl

VarDecl

SimpleTypeDen

Program

Command

Expression

V-name

Declaration

Type-denoter

# Sub-ASTs von Mini-Triangle



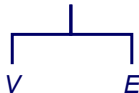
A. Koch

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

SequentialCmd



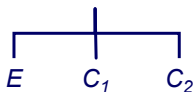
AssignCmd



CallCmd



IfCmd



WhileCmd



LetCmd





# Java-Implementierung der ASTs



- Abstrakte Basisklasse

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

- Eigene Subklassen für alle Arten von AST-Knoten

A. Koch

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 {
```

# 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
```

A. Koch

```
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.

# Sonderfall: Terminal-Knoten



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

A. Koch

## 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;  
    }  
}
```

# Aufbau des ASTs



A. Koch

- 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  
}
```

# Zusammensetzen von Subphrasen ASTs 1



EBNF

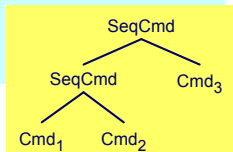
**Command ::= single-Command ( ; single-Command)\***

A. Koch

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;  
}
```



# Zusammensetzen von Subphrasen ASTs 2



```
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, eAST);
        } break;
        default:
            melde Syntaxfehler
    }
    return declAST;
}
```

A. Koch

# Scanning - Woher kommen die Tokens?



Zwei relevante Methoden im Parser

A. Koch

```
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();
    }

    ...
}
```



- 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



# Scanner-Sicht auf Tokens



A. Koch

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

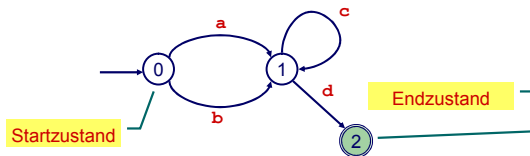
# Darstellung von Scannern als endlicher Automat



A. Koch

- 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:  $(a \mid b) c^* d$



# Alternative: Rekursiver Abstieg



## Systematische Konstruktion von Scannern

A. Koch

- 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

# Struktur des Java-Codes



```
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() { ... }
    ...
}
```

```
public class ...
    protected ...
    protected ...
    protected ...

    public Tok...
        discard se...
        current...
        current...
        return ...
    }

    protected ...
        switch ...
        ...
    }

    protected ...
    protected ...
    ...
}
```

# Scanner für Mini-Triangle



## 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
```

A. Koch

## 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!

# Feinheiten am Rande



A. Koch

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

# Zeichenweises Einlesen



A. Koch

```
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 takeIt() {  
        currentSpelling.append(currentChar);  
        currentChar = get next source char;  
    }  
  
    ...  
}
```

# Scan-Methoden



A. Koch

```
...  
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

```
...
```



# Beispiel scanToken



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

A. Koch

```
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...  
    }  
}
```

# Genauer: Scannen von **Identifizier**



A. Koch

```
...  
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':  
...
```

# Hauptmethode `scan()`



A. Koch

```
...
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 Schlüsselwörtern?

# Ändern von Token-Art während der Konstruktion



A. Koch

```
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;
...
    }
}
```

# Liste der Schlüsselworte



A. Koch

```
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