

Compilerbau





Martin Plümicke
Andreas Stadelmeier

SS 2025





Beschreibung

In der Vorlesung werden anwendungsnahe Konzepte und Techniken zu Programmiersprachen und Compilerbau vermittelt. Konkret werden zunächst die Phasen des Compilerbaus an Hand eines Java-Compilers vorgestellt. Als Implementierungstechnik wird die funktionale Programmiersprache Haskell verwendet. Dazu werden die notwendigen Grundlagen der funktionalen Programmierung aufbauend auf den Kenntnissen der Grundvorlesung vermittelt. Im 2. Teil der Lehrveranstaltungen werden die Studierenden in Gruppenarbeit einen Mini-Java-Compiler mit den gelernten Techniken implementieren.

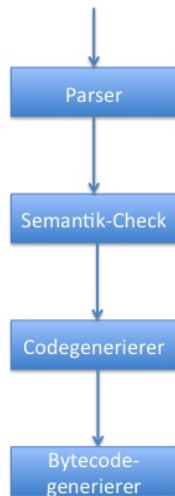
Literatur

-  Bauer and Höllerer.
Übersetzung objektorientierter Programmiersprachen.
Springer-Verlag, 1998, (in german).
-  Alfred V. Aho, Ravi Lam, Monica S.and Sethi, and Jeffrey D. Ullman.
Compiler: Prinzipien, Techniken und Werkzeuge.
Pearson Studium Informatik. Pearson Education Deutschland, 2.
edition, 2008.
(in german).
-  Alfred V. Aho, Ravi Sethi, and Jeffrey D. Ullman.
Compilers Principles, Techniques and Tools.
Addison Wesley, 1986.
-  Reinhard Wilhelm and Dieter Maurer.
Übersetzerbau.
Springer-Verlag, 2. edition, 1992.
(in german).

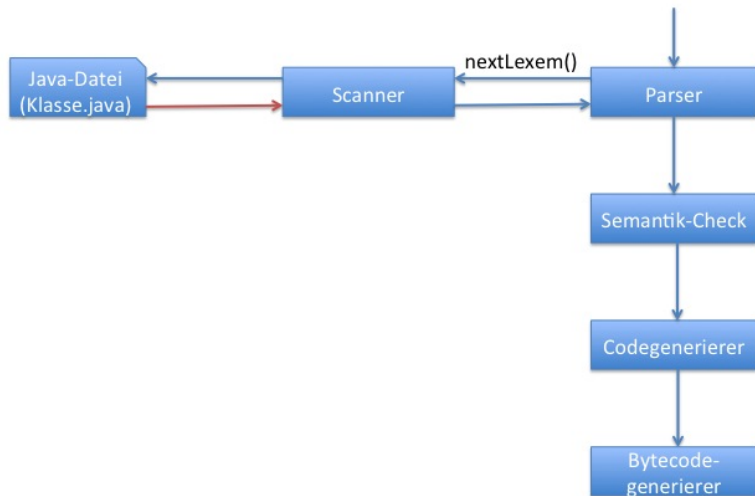
Literatur II

-  James Gosling, Bill Joy, Guy Steele, Gilad Bracha, and Alex Buckley.
The Java[®] Language Specification.
The Java series. Addison-Wesley, Java SE 8 edition, 2014.
-  Tim Lindholm, Frank Yellin, Gilad Bracha, and Alex Buckley.
The Java[®] Virtual Machine Specification.
The Java series. Addison-Wesley, Java SE 8 edition, 2014.
-  Bryan O'Sullivan, Donald Bruce Stewart, and John Goerzen.
Real World Haskell.
O'Reilly, 2009.
-  Peter Thiemann.
Grundlagen der funktionalen Programmierung.
Teubner, 1994.

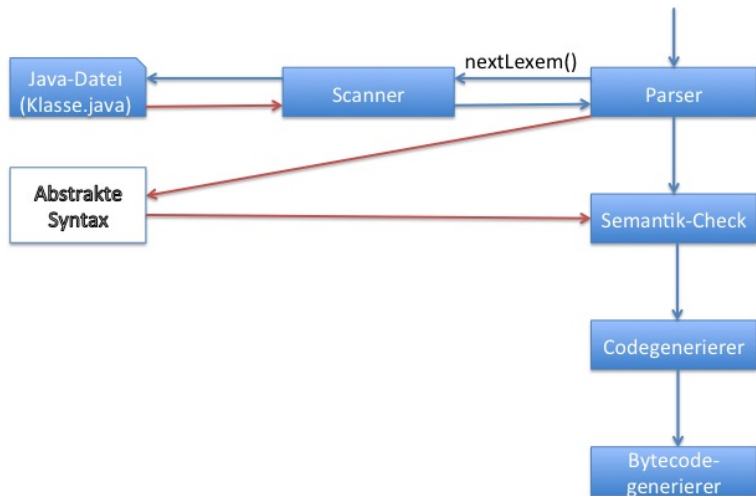
Compiler Überblick



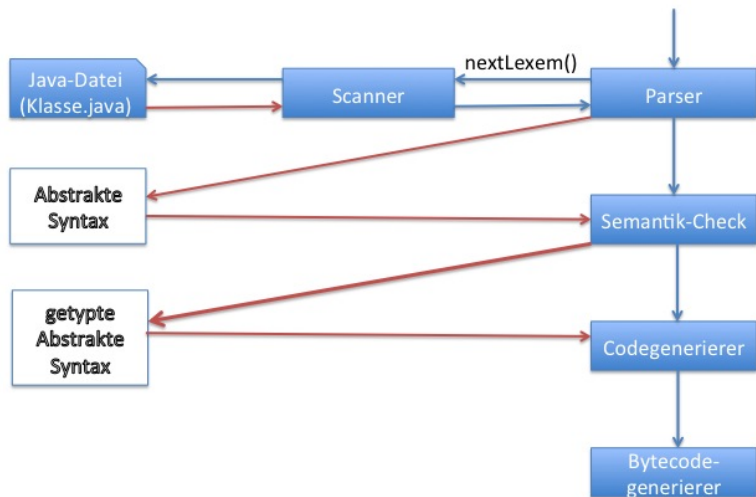
Compiler Überblick



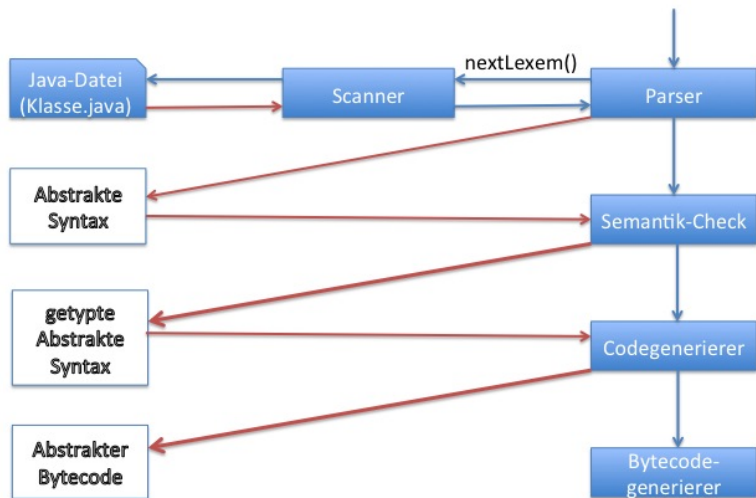
Compiler Überblick



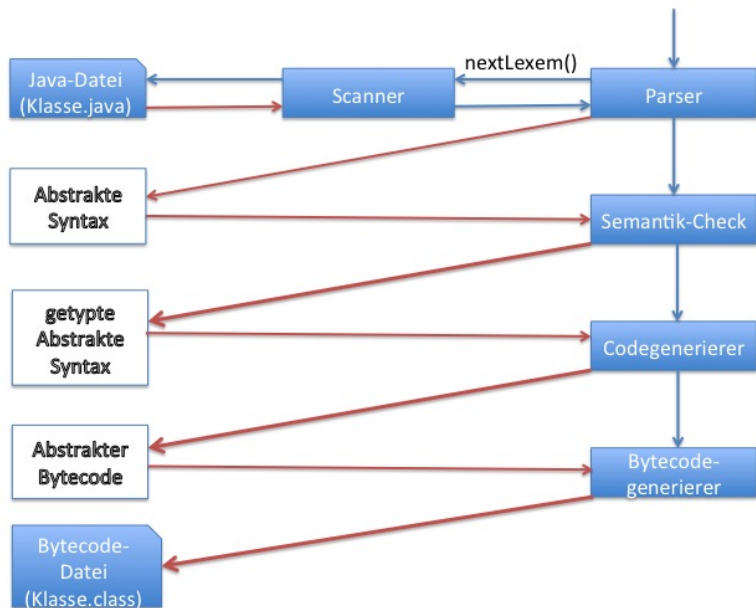
Compiler Überblick



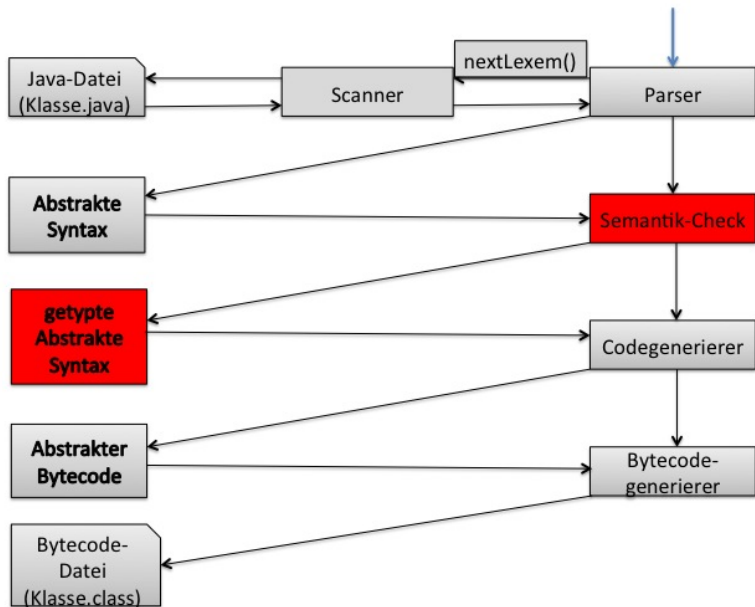
Compiler Überblick



Compiler Überblick



Semantische Analyse/Typecheck



Semantische Analyse/Typecheck

- ▶ Überprüfen der Kontextsensitiven Nebenbedingungen:
 - ▶ alle Variablen/Methoden deklariert/sichtbar?
 - ▶ Typen korrekt?
- ▶ Typisierung aller Sub-Terme

Ungetypte abstrakte Syntax für *Mini-Java* I

```
data Class = Class(Type, [FieldDecl], [MethodDecl])

data FieldDecl = Field(Type, String)

data MethodDecl = Method(Type, String, [(Type,String)], Stmt)

data Stmt = Block([Stmt])
           | Return( Expr )
           | While( Expr , Stmt )
           | LocalVarDecl(Type, String)
           | If(Expr, Stmt , Maybe Stmt)
           | StmtExprStmt(StmtExpr)

data StmtExpr = Assign(String, Expr)
                | New(Type, [Expr])
                | MethodCall(Expr, String, [Expr])
```

Ungetypte abstrakte Syntax für *Mini-Java II*

```
data Expr = This
  | Super
  | LocalOrFieldVar(String)
  | InstVar(Expr, String)
  | Unary(String, Expr)
  | Binary(String, Expr, Expr)
  | Integer(Integer)
  | Bool(Bool)
  | Char(Char)
  | String(String)
  | Jnull
  | StmtExprExpr(StmtExpr)

type Prg = [Class]
```

Formale Definitionen I

Typableitungen

Menge von Typannahmen: $O = \{ id_1 : ty_1, \dots, id_n : ty_n \}$

Formale Definitionen I

Typableitungen

Menge von Typannahmen: $O = \{ id_1 : ty_1, \dots, id_n : ty_n \}$

$$O \triangleright_{id} id : ty$$

Aus der Menge der Typannahmen O ist für den Bezeichner id der Typ ty ableitbar.

Formale Definitionen I

Typableitungen

Menge von Typannahmen: $O = \{ id_1 : ty_1, \dots, id_n : ty_n \}$

$$O \triangleright_{Id} id : ty$$

Aus der Menge der Typannahmen O ist für den Bezeichner id der Typ ty ableitbar.

$$O \triangleright_{Expr} e : ty$$

Aus der Menge der Typannahmen O ist für den Ausdruck e der Typ ty ableitbar.

Formale Definitionen I

Typableitungen

Menge von Typannahmen: $O = \{ id_1 : ty_1, \dots, id_n : ty_n \}$

$$O \triangleright_{Id} id : ty$$

Aus der Menge der Typannahmen O ist für den Bezeichner id der Typ ty ableitbar.

$$O \triangleright_{Expr} e : ty$$

Aus der Menge der Typannahmen O ist für den Ausdruck e der Typ ty ableitbar.

$$O \triangleright_{Stmt} s : ty$$

Aus der Menge der Typannahmen O ist für das Statement s der Typ ty ableitbar.

Formale Definitionen II

Typurteile

$$[\text{Regelname}] \frac{O1 \triangleright x : ty1}{O2 \triangleright y : ty2}$$

Aus der Regel *Regelname* folgt, wenn man aus $O1$ ableiten kann, dass x den Typ $ty1$ hat, dann kann man aus $O2$ ableiten dass y den Typ $ty2$ hat.

Ident-Rule

$$[\text{Ident}] \frac{(f : ty) \in O_\tau}{O_\tau \triangleright_{Id} f : ty}$$

O_τ : Menge aller in der Klasse τ sichtbaren Methoden und Attribute

Beispiel Ident-Rule

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

Beispiel Ident-Rule

```
class A {  
  int attr;  
  A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

► $O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$

$$\text{[Ident]} \frac{O_A}{O_A \triangleright_{Id} \text{attr} : \text{int}}$$

Beispiel Ident–Rule

```
class A {  
  int attr;  
  A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

► $O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$

$$\text{[Ident]} \frac{O_A}{O_A \triangleright_{Id} \text{attr} : \text{int}}$$

$$\text{[Ident]} \frac{O_A}{O_A \triangleright_{Id} \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A}$$

Literal-Regeln

[IntLiteral] $O \triangleright_{Expr}$ Integer(n) : int

[BoolLiteral] $O \triangleright_{Expr}$ Bool(b) : boolean

[CharLiteral] $O \triangleright_{Expr}$ Char(c) : char

[NullLiteral] $O \triangleright_{Expr}$ Null : θ'

Expression-Regel: Simple-Expressions

$$[\text{Unary1}] \frac{O \triangleright_{Expr} e : \text{int}}{O \triangleright_{Expr} \text{Unary}("+"/"-", e) : \text{int}}$$

Expression-Regel: Simple-Expressions

$$\text{[Unary1]} \frac{O \triangleright_{Expr} e : \text{int}}{O \triangleright_{Expr} \text{Unary}("+"/"-", e) : \text{int}}$$

$$\text{[Unary2]} \frac{O \triangleright_{Expr} e : \text{boolean}}{O \triangleright_{Expr} \text{Unary}("!", e) : \text{boolean}}$$

Expression-Regel: Simple-Expressions

$$\text{[Unary1]} \frac{O \triangleright_{Expr} e : \text{int}}{O \triangleright_{Expr} \text{Unary}("+"/"-", e) : \text{int}}$$

$$\text{[Unary2]} \frac{O \triangleright_{Expr} e : \text{boolean}}{O \triangleright_{Expr} \text{Unary}("!", e) : \text{boolean}}$$

$$\text{[Binary1]} \frac{O \triangleright_{Expr} e1 : \text{int}, O \triangleright_{Expr} e2 : \text{int}}{O \triangleright_{Expr} \text{Binary}("+"/"-"/"*"/"%", e1, e2) : \text{int}}$$

Expression-Regel: Simple-Expressions

$$\frac{O \triangleright_{Expr} e : \text{int}}{\text{[Unary1]} \quad O \triangleright_{Expr} \text{Unary}("+"/"-", e) : \text{int}}$$

$$\frac{O \triangleright_{Expr} e : \text{boolean}}{\text{[Unary2]} \quad O \triangleright_{Expr} \text{Unary}("!", e) : \text{boolean}}$$

$$\frac{O \triangleright_{Expr} e1 : \text{int}, O \triangleright_{Expr} e2 : \text{int}}{\text{[Binary1]} \quad O \triangleright_{Expr} \text{Binary}("+"/"-"/"*"/"%", e1, e2) : \text{int}}$$

$$\frac{O \triangleright_{Expr} e1 : \text{boolean}, O \triangleright_{Expr} e2 : \text{boolean}}{\text{[Binary2]} \quad O \triangleright_{Expr} \text{Binary}("&&"/"||", e1, e2) : \text{boolean}}$$

Expression-Regel: Variablen

$$\text{[LocalOrFieldVar]} \frac{O \triangleright_{Id} v : \theta}{O \triangleright_{Expr} \text{LocalOrFieldVar}(v) : \theta}$$

Expression–Regel: Variablen

$$\text{[LocalOrFieldVar]} \frac{O \triangleright_{Id} v : \theta}{O \triangleright_{Expr} \text{LocalOrFieldVar}(v) : \theta}$$

$$\text{[InstVar]} \frac{O \triangleright_{Expr} re : \bar{\tau}, \quad O_{\bar{\tau}} \triangleright_{Id} v : \theta}{O \triangleright_{Expr} \text{InstVar}(re, v) : \theta}$$

Beispiel InstVar

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$$

...

```
A a = new A()
```

```
a.attr = 5;
```

übersetzt in abstrakte syntax: **InstVar**(**LocalOrFieldVar**(*a*), *attr*).

Beispiel InstVar

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$$

...

```
A a = new A()
```

```
a.attr = 5;
```

übersetzt in abstrakte syntax: **InstVar**(**LocalOrFieldVar**(*a*), *attr*).

$$[\text{Ident}] \frac{\{a : A\}}{\{a : A\} \triangleright_{\text{Id}} a : A}$$

Beispiel InstVar

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$$

...

```
A a = new A()
```

```
a.attr = 5;
```

übersetzt in abstrakte syntax: **InstVar**(**LocalOrFieldVar**(*a*), *attr*).

$$\frac{\frac{\text{[Ident]} \quad \frac{\{ a : A \}}{\{ a : A \} \triangleright_{Id} a : A}}{\text{[LocalOrFieldVar]} \quad \{ a : A \} \triangleright_{Expr} \text{LocalOrFieldVar}(a) : A}}{O_A}}$$

Beispiel InstVar

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$$

...

```
A a = new A()
```

```
a.attr = 5;
```

übersetzt in abstrakte syntax: **InstVar**(**LocalOrFieldVar**(*a*), *attr*).

$$\begin{array}{c} \text{[Ident]} \\ \hline \{ a : A \} \\ \text{[LocalOrFieldVar]} \frac{\{ a : A \} \triangleright_{Id} a : A}{\{ a : A \} \triangleright_{Expr} \text{LocalOrFieldVar}(a) : A,} \end{array} \quad \text{[Ident]} \frac{O_A}{O_A \triangleright_{Id} \text{attr} : \text{int}}$$

Beispiel InstVar

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$$

...

```
A a = new A()
```

```
a.attr = 5;
```

übersetzt in abstrakte syntax: **InstVar**(**LocalOrFieldVar**(*a*), *attr*).

$$\frac{\begin{array}{l} [\text{Ident}] \frac{\{ a : A \}}{\{ a : A \} \triangleright_{Id} a : A} \\ [\text{LocalOrFieldVar}] \frac{\{ a : A \} \triangleright_{Expr} \text{LocalOrFieldVar}(a) : A, \quad [\text{Ident}] \frac{O_A}{O_A \triangleright_{Id} \text{attr} : \text{int}} \\ [\text{InstVar}] \end{array}}{\{ a : A \} \triangleright_{Expr} \text{InstVar}(\text{LocalOrFieldVar}(a), \text{attr}) : \text{int}}$$

Expression–Regel: Statement–Expressions

[New] $O \triangleright_{Expr} \text{New}(\theta) : \theta$

Expression-Regel: Statement-Expressions

[New] $O \triangleright_{Expr} \text{New}(\theta) : \theta$

[Assign]
$$\frac{O \triangleright_{Expr} ve : \theta', O \triangleright_{Expr} e : \theta}{O \triangleright_{Expr} \text{Assign}(ve, e) : \theta'} \quad \theta \leq^* \theta'^1$$

¹ \leq^* ist die Subtypen-Relation

Expression–Regel: Statement–Expressions

[New] $O \triangleright_{Expr} \text{New}(\theta) : \theta$

[Assign]
$$\frac{O \triangleright_{Expr} ve : \theta', O \triangleright_{Expr} e : \theta}{O \triangleright_{Expr} \text{Assign}(ve, e) : \theta} \theta \leq^* \theta'^1$$

[Method-Call]
$$\frac{\begin{array}{l} O \triangleright_{Expr} re : \bar{\tau} \\ O_{\bar{\tau}} \triangleright_{Id} m : \theta'_1 \times \dots \times \theta'_n \rightarrow \theta \\ \forall 1 \leq i \leq n : O \triangleright_{Expr} e_i : \theta_i \end{array}}{O \triangleright_{Expr} \text{MethodCall}(re, m, (e_1, \dots, e_n)) : \theta} \theta_i \leq^* \theta'_i$$

¹ \leq^* ist die Subtypen–Relation

Beispiel MethodCall

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$$

...

```
A a = new A()
```

```
A aa = a.meth(true);
```

übers. in abstrakte Syntax:

```
MethodCall( LocalOrFieldVar( a ), meth, Bool( true ) ).
```

Beispiel MethodCall

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$$

...

```
A a = new A()
```

```
A aa = a.meth(true);
```

übers. in abstrakte Syntax:

MethodCall(**LocalOrFieldVar**(*a*), *meth*, **Bool**(*true*)).

$$\text{[Ident]} \frac{\{ a : A \}}{\{ a : A \} \triangleright_{Id} a : A}$$

Beispiel MethodCall

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$$

...

```
A a = new A()
```

```
A aa = a.meth(true);
```

übers. in abstrakte Syntax:

MethodCall(**LocalOrFieldVar**(*a*), *meth*, **Bool**(*true*)).

$$\begin{array}{l} \text{[Ident]} \\ \text{[LocalOrFieldVar]} \end{array} \frac{\{ a : A \}}{\{ a : A \} \triangleright_{\text{Id}} a : A} \quad \frac{\{ a : A \} \triangleright_{\text{Expr}} \text{LocalOrFieldVar}(a) : A}{\{ a : A \} \triangleright_{\text{Expr}} \text{LocalOrFieldVar}(a) : A}$$
$$\frac{O_A}{\text{MethodCall}(\text{LocalOrFieldVar}(a), \text{meth}, \text{Bool}(\text{true}))}$$

Beispiel MethodCall

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$$

...

```
A a = new A()
```

```
A aa = a.meth(true);
```

übers. in abstrakte Syntax:

MethodCall(**LocalOrFieldVar**(*a*), *meth*, **Bool**(true)).

$$\begin{array}{c} \text{[Ident]} \\ \hline \{ a : A \} \\ \text{[LocalOrFieldVar]} \frac{\{ a : A \} \triangleright_{Id} a : A}{\{ a : A \} \triangleright_{Expr} \text{LocalOrFieldVar}(a) : A,} \end{array} \quad \text{[Ident]} \frac{O_A}{O_A \triangleright_{Id} \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A}$$

Beispiel MethodCall

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$$

...

```
A a = new A()
```

```
A aa = a.meth(true);
```

übers. in abstrakte Syntax:

MethodCall(**LocalOrFieldVar**(*a*), *meth*, **Bool**(true)).

$$\begin{array}{c} \text{[Ident]} \\ \hline \{ a : A \} \\ \text{[LocalOrFieldVar]} \frac{\{ a : A \} \triangleright_{Id} a : A}{\{ a : A \} \triangleright_{Expr} \text{LocalOrFieldVar}(a) : A,} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{[Ident]} \\ \hline O_A \\ \text{[BoolLiteral]} \frac{O_A \triangleright_{Id} \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A}{\text{Bool}(\text{true}) : \text{boolean}} \end{array}$$

Beispiel MethodCall

```
class A {  
    int attr;  
    A meth(Boolean x) { ... }  
}
```

$O_A = \{ \text{attr} : \text{int}, \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A \}$

...

A a = new A()

A aa = a.meth(true);

übers. in abstrakte Syntax:

MethodCall(**LocalOrFieldVar**(a), meth, Bool(true)).

[Ident]	$\frac{\{ a : A \}}{\text{LocalOrFieldVar}(a) : A}$	[Ident]	$\frac{O_A}{O_A \triangleright_{Id} \text{meth} : \text{Boolean} \rightarrow A}$
[LocalOrFieldVar]	$\frac{\{ a : A \} \triangleright_{Id} a : A}{\{ a : A \} \triangleright_{Expr} \text{LocalOrFieldVar}(a) : A}$	[BoolLiteral]	$\text{Bool}(\text{true}) : \text{boolean}$
[MethodCall]	$\frac{\{ a : A \} \triangleright_{Expr} \text{MethodCall}(\text{LocalOrFieldVar}(a), \text{meth}, \text{Bool}(\text{true})) : A}{\text{MethodCall}(\text{LocalOrFieldVar}(a), \text{meth}, \text{Bool}(\text{true})) : A}$		

Statement-Regeln

$$\text{[Return]} \frac{O \triangleright_{Expr} e : \theta}{O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(e) : \theta}$$

Statement-Regeln

$$\text{[Return]} \frac{O \triangleright_{Expr} e : \theta}{O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(e) : \theta}$$

$$\text{[If]} \frac{\begin{array}{c} O \triangleright_{Stmt} s_1 : \theta_1, O \triangleright_{Stmt} s_2 : \theta_2 \\ O \triangleright_{Expr} e : \text{boolean} \end{array}}{O \triangleright_{Stmt} \text{If}(e, s_1, s_2) : \bar{\theta}, \text{ wobei } \bar{\theta} \in \mathbf{UB}^2(\theta_1, \theta_2)}$$

Statement-Regeln

$$\text{[Return]} \frac{O \triangleright_{Expr} e : \theta}{O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(e) : \theta}$$

$$\text{[If]} \frac{O \triangleright_{Stmt} s_1 : \theta_1, O \triangleright_{Stmt} s_2 : \theta_2, O \triangleright_{Expr} e : \text{boolean}}{O \triangleright_{Stmt} \text{If}(e, s_1, s_2) : \bar{\theta}, \text{ wobei } \bar{\theta} \in \mathbf{UB}^2(\theta_1, \theta_2)}$$

$$\text{[While]} \frac{O \triangleright_{Expr} e : \text{boolean}, O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(B) : \theta}{O \triangleright_{Stmt} \text{While}(e, \text{Block}(B)) : \theta}$$

Statement-Regeln: Statement-Expressions

[New] $O \triangleright_{Stmt} \text{New}(\theta) : \text{void}$

Statement-Regeln: Statement-Expressions

[New] $O \triangleright_{Stmt} \text{New}(\theta) : \text{void}$

[Assign]
$$\frac{O \triangleright_{Expr} ve : \theta', O \triangleright_{Expr} e : \theta}{O \triangleright_{Stmt} \text{Assign}(ve, e) : \text{void}} \quad \theta \leq^* \theta'$$

Statement-Regeln: Statement-Expressions

[New] $O \triangleright_{Stmt} \text{New}(\theta) : \text{void}$

[Assign]
$$\frac{O \triangleright_{Expr} ve : \theta', O \triangleright_{Expr} e : \theta}{O \triangleright_{Stmt} \text{Assign}(ve, e) : \text{void}} \quad \theta \leq^* \theta'$$

[Method-Call]
$$\frac{\begin{array}{l} O \triangleright_{Expr} re : \bar{\tau} \\ O_{\bar{\tau}} \triangleright_{Id} m : \theta'_1 \times \dots \times \theta'_n \rightarrow \theta \\ \forall 1 \leq i \leq n : O \triangleright_{Expr} e_i : \theta_i \end{array}}{O \triangleright_{Stmt} \text{MethodCall}(re, m, (e_1, \dots, e_n)) : \text{void}} \quad \theta_i \leq^* \theta'_i$$

Block-Statement Regeln

$$\frac{O \triangleright_{Stmt} stmt : \theta}{O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(stmt) : \theta} \text{ [BlockInit]}$$

Block-Statement Regeln

$$O \triangleright_{Stmt} stmt : \theta$$

[BlockInit]

$$O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(stmt) : \theta$$

$$O \triangleright_{Stmt} s_1 : \theta, O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(s_2; \dots; s_n) : \theta'$$

[Block]

$$O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(s_1; s_2; \dots; s_n) : \bar{\theta}, \text{ wobei } \bar{\theta} \in \mathbf{UB}(\theta, \theta')$$

Block–Statement Regeln

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{stmt} : \theta$$

[BlockInit]

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(\text{stmt}) : \theta$$

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} s_1 : \theta, O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(s_2; \dots; s_n) : \theta'$$

[Block]

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(s_1; s_2; \dots; s_n) : \bar{\theta}, \text{ wobei } \bar{\theta} \in \mathbf{UB}(\theta, \theta')$$

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} s_1 : \text{void},$$

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(s_2; \dots; s_n) : \theta$$

[Blockvoid]

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(s_1; s_2; \dots; s_n) : \theta$$

Block–Statement Regeln

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{stmt} : \theta$$

[BlockInit]

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(\text{stmt}) : \theta$$

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} s_1 : \theta, O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(s_2; \dots; s_n) : \theta'$$

[Block]

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(s_1; s_2; \dots; s_n) : \bar{\theta}, \text{ wobei } \bar{\theta} \in \mathbf{UB}(\theta, \theta')$$

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} s_1 : \text{void},$$

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(s_2; \dots; s_n) : \theta$$

[Blockvoid]

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(s_1; s_2; \dots; s_n) : \theta$$

Block-
[Local-
VarDecl]

$$O \setminus \{v : \theta'\} \cup \{v : \bar{\theta}\} \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(s_2; \dots; s_n) : \theta$$

$$O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(\text{LocalVarDecl}(v, \bar{\theta}); s_2; \dots; s_n) : \theta$$

Beispiel I

```
while (true) {  
    return 1;  
}
```

Beispiel I

```
while (true) {  
    return 1;  
}
```

$O = \emptyset$

Beispiel I

```
while (true) {  
    return 1;  
}
```

$O = \emptyset$

[Int-
Literal]

$O \triangleright_{Expr} \text{Integer}(1) : \text{int}$

Beispiel I

```
while (true) {  
    return 1;  
}
```

$O = \emptyset$

$$\frac{\begin{array}{l} \text{Int-} \\ \text{Literal} \\ \text{Return} \end{array} \quad O \triangleright_{Expr} \text{Integer}(1) : \text{int}}{O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(\text{Integer}(1)) : \text{int}}$$

Beispiel I

```
while (true) {  
    return 1;  
}
```

$O = \emptyset$

Int-	
Literal	$O \triangleright_{Expr} \text{Integer}(1) : \text{int}$
[Return]	_____
	$O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(\text{Integer}(1)) : \text{int}$
Block	_____
[Init]	$O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(\text{Return}(\text{Integer}(1))) : \text{int}$

Beispiel I

```
while (true) {  
    return 1;  
}
```

$O = \emptyset$

$[\text{Bool-Literal}] O \triangleright_{Expr} \text{Bool}(True) : \text{boolean}$

$[\text{Int-Literal}]$	$O \triangleright_{Expr} \text{Integer}(1) : \text{int}$
$[\text{Return}]$	$O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(\text{Integer}(1)) : \text{int}$
$[\text{Block-Init}]$	$O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(\text{Return}(\text{Integer}(1))) : \text{int}$

Beispiel I

```
while (true) {  
    return 1;  
}
```

$O = \emptyset$

			$[Int-Literal]$	$O \triangleright_{Expr} Integer(1) : int$
			$[Return]$	$O \triangleright_{Stmt} Return(Integer(1)) : int$
			$[BlockInit]$	$O \triangleright_{Stmt} Block(Return(Integer(1))) : int$
$[Bool-Literalwhile]$	$O \triangleright_{Expr} Bool(True) : boolean$			$O \triangleright_{Stmt} While(Bool(True), Block(Return(Integer(1)))) : int$

Beispiel II

```
class A { }
```

```
{ return new A();  
  new A();  
  return new B(); }
```

```
class B { }
```

Beispiel II

```
class A { }
```

```
{ return new A();  
  new A();  
  return new B(); }
```

```
class B { }
```

$O = \emptyset$

Beispiel II

```
class A { }
```

```
{ return new A();  
  new A();  
  return new B(); }
```

```
class B { }
```

$O = \emptyset$

[New]

$O \triangleright_{Expr} \text{New}(B) : B$

Beispiel II


```
class A { }
```

```
{ return new A();  
  new A();  
  return new B(); }
```

```
class B { }
```

$O = \emptyset$

$$\frac{[\text{New}] \quad O \triangleright_{Expr} \text{New}(B) : B}{[\text{Return}] \quad O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(\text{New}(B)) : B}$$

³analog zu $O \triangleright_{Expr} \text{Return}(\text{New}(B)) : B$ hergeleitet 

Beispiel II


```
class A { }
```

```
{ return new A();  
  new A();  
  return new B(); }
```

```
class B { }
```

$O = \emptyset$

$$\frac{\begin{array}{l} \text{[New]} \\ \text{[Return]} \end{array} \frac{O \triangleright_{Expr} \text{New}(B) : B}{\text{Return}(\text{New}(B)) : B}}{\begin{array}{l} \text{[Block -]} \\ \text{[Init]} \end{array} \frac{O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(\text{Return}(\text{New}(B))) : B}{O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(\text{Return}(\text{New}(B))) : B}}$$

³analog zu $O \triangleright_{Expr} \text{Return}(\text{New}(B)) : B$ hergeleitet 

Beispiel II

```
class A { }
```


```
{ return new A();  
  new A();  
  return new B(); }
```

```
class B { }
```

$O = \emptyset$

$[New] \quad O \triangleright_{Stmt} \text{New}(A) : \text{void}$

$$\frac{[New] \quad O \triangleright_{Expr} \text{New}(B) : B}{[Return] \text{---}} \quad O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(\text{New}(B)) : B$$
$$\frac{[Block -] \quad O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(\text{New}(B)) : B}{[Init] \text{---}} \quad O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(\text{Return}(\text{New}(B))) : B$$

³analog zu $O \triangleright_{Expr} \text{Return}(\text{New}(B)) : B$ hergeleitet 

Beispiel II


```
class A { }
```

```
{ return new A();  
  new A();  
  return new B(); }
```

```
class B { }
```

$O = \emptyset$

$$\frac{\begin{array}{l} \text{[New]} \quad O \triangleright_{\text{Expr}} \text{New}(B) : B \\ \text{[Return]} \text{-----} \\ O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Return}(\text{New}(B)) : B \\ \text{[Block -]} \text{-----} \\ \text{[Init]} \quad O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(\text{Return}(\text{New}(B))) : B \end{array}}{\begin{array}{l} \text{[New]} \quad O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{New}(A) : \text{void} \\ \text{[Block-]} \text{-----} \\ \text{void} \end{array}}{\begin{array}{l} O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{Block}(\text{New}(A); \text{Return}(\text{New}(B))) : B \end{array}}$$

³analog zu $O \triangleright_{\text{Expr}} \text{Return}(\text{New}(B)) : B$ hergeleitet 

Beispiel II

```
class A { }
```


```
{ return new A();  
  new A();  
  return new B(); }
```

```
class B { }
```

$O = \emptyset$

$$\begin{array}{c} \text{[New]} \quad O \triangleright_{Expr} \text{New}(B) : B \\ \text{[Return]} \quad \frac{}{O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(\text{New}(B)) : B} \\ \text{[Block -]} \quad \frac{}{O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(\text{Return}(\text{New}(B))) : B} \\ \text{[Init]} \end{array}$$
$$\begin{array}{c} \text{[New]} \quad O \triangleright_{Stmt} \text{New}(A) : \text{void} \\ \text{[Block-]} \quad \frac{}{O \triangleright_{Stmt} \text{Return}(\text{New}(A)) : A^3} \\ \text{[Block]} \quad \frac{}{O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(\text{Return}(\text{New}(A)); \text{New}(A); \text{Return}(\text{New}(B))) : \text{Object},} \\ \text{[Block]} \quad \frac{}{O \triangleright_{Stmt} \text{Block}(\text{Return}(\text{New}(A)); \text{New}(A); \text{Return}(\text{New}(B))) : \text{Object},} \end{array}$$

wobei $\mathbf{UB}(A, B) = \text{Object}$

³analog zu $O \triangleright_{Expr} \text{Return}(\text{New}(B)) : B$ hergeleitet 

SemantikCheck von Methoden

Sei

$$\text{retty meth}(ty_1 a_1, \dots, ty_n a_n) \{bl\}$$

gegeben.

meth is typkorrekt, falls

$$\{a_1 : t_1, \dots, a_n : ty_n\} \triangleright \{bl\} : \text{retty}$$

Datenstruktur typisierter Expressions

```
type Type = String
```

-- data Type = TVar(String)	— Typvariable
-- TC(String, [Type])	— Typkonstruktor
-- WC	— Wildscard
-- WC_Super(Type)	— Super-Wildscard
-- WC_Extends(Type)	— Extends-Wildcard

Datenstruktur typisierter Expressions

```
type Type = String
```

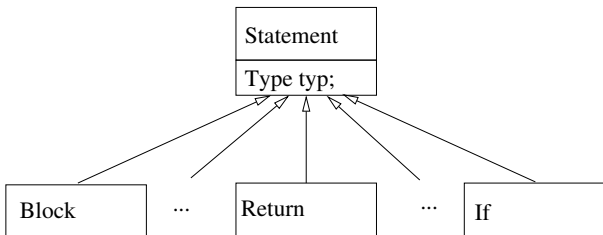
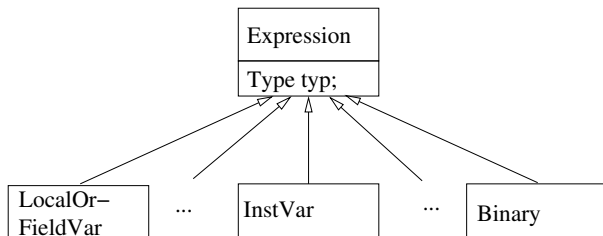
```
-- data Type = TVar(String)           -- Typvariable  
--      | TC(String, [Type])       -- Typkonstruktor  
--      | WC                          -- Wildscard  
--      | WC_Super(Type)            -- Super-Wildscard  
--      | WC_Extends(Type)          -- Extends-Wildcard  
data Expr = This  
  | Super  
  | LocalOrFieldVar(String)  
  | InstVar(Expr, String)  
  | Unary(String, Expr)  
  | Binary(String, Expr, Expr)  
  | Integer(Integer)  
  | Bool(Bool)  
  | Char(Char)  
  | String(String)  
  | Jnull  
  | StmtExprExpr(StmtExpr)  
  | TypedExpr(Expr, Type)
```


Datenstruktur typisierter Statements

```
data Stmt = Block([Stmt])
          | Return( Expr )
          | While( Expr , Stmt )
          | LocalVarDecl(String)
          | If(Expr, Stmt , Maybe Stmt)
          | StmtExprStmt(StmtExpr)
          | TypedStmt(Stmt, Type)

data StmtExpr = Assign(String, Expr)
              | New(Type, [Expr])
              | MethodCall(Expr, String, [Expr])
              | TypedStmtExpr(StmtExpr, Type)
```

Datenstruktur typisierter Expressions/Statements



Typisierung von Simple-Expressions

```
return 1 + 2
```

Erg. der Parsers:

```
Binary("+", Integer(1), Integer(2))
```

Typisierung von Simple-Expressions

```
return 1 + 2
```

Erg. der Parsers:

```
Binary("+", Integer(1), Integer(2))
```

Typisierung:

```
Return(  
  TypedExpr(  
    Binary("+",  
            TypedExpr(Integer(1), "int"),  
            TypedExpr(Integer(2), "int")),  
    "int"))
```

Typisierung von Simple-Expressions

```
return 1 + 2
```

Erg. der Parsers:

```
Binary("+", Integer(1), Integer(2))
```

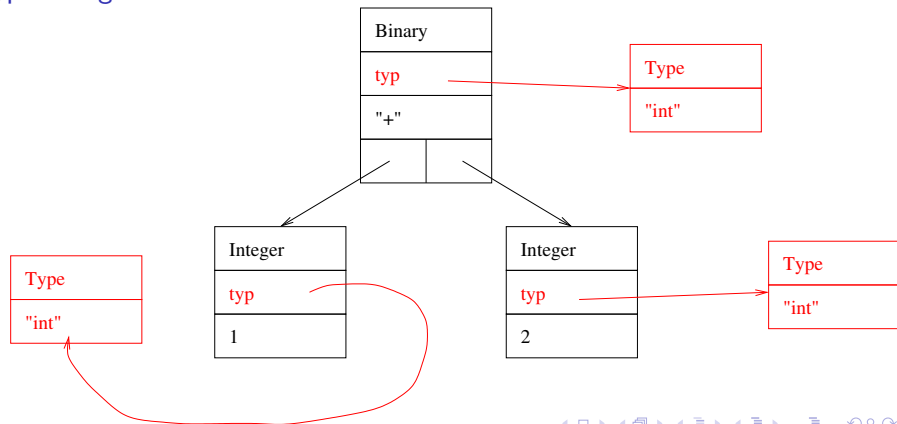
Typisierung von Simple-Expressions

```
return 1 + 2
```

Erg. der Parsers:

Binary("+", Integer(1), Integer(2))

Typisierung:



LocalOrFieldVar

```
class Klassenname {  
    int v;  
    int methode (int x) { return v + x; }  
}
```

LocalOrFieldVar

```
class Klassenname {  
    int v;  
    int methode (int x) { return v + x; }  
}
```

Erg. der Parsers:

```
Return(Binary("+",  
             LocalOrFieldVar("v")      ← FieldVar  
             LocalOrFieldVar("x")))    ← LocalVar
```


LocalOrFieldVar

```
class Klassenname {  
    int v;  
    int methode (int x) { return v + x; }  
}
```

Erg. der Parsers:

```
Return(Binary("+",  
            LocalOrFieldVar("v")      ← FieldVar  
            LocalOrFieldVar("x")))    ← LocalVar
```

Typisierung:

```
Return(  
    TypedExpr(  
        Binary("+",  
            TypedExpr(LocalOrFieldVar("v"), "int"),  
            TypedExpr(LocalOrFieldVar("x"), "int")),  
        "int"))
```

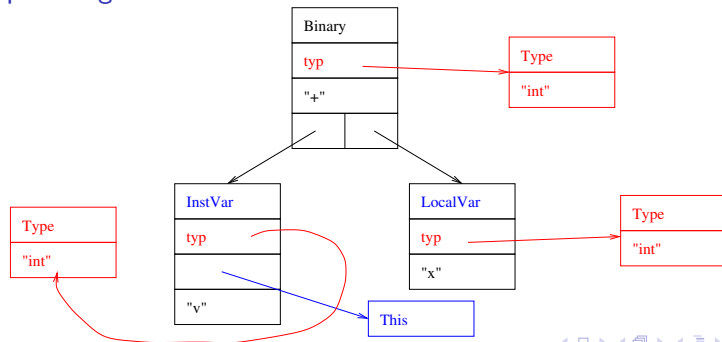
LocalOrFieldVar

```
class Klassenname {  
    int v;  
    int methode (int x) { return v + x; }  
}
```

Erg. der Parsers:

```
Return(Binary("+",  
            LocalOrFieldVar("v") ← FieldVar  
            LocalOrFieldVar("x"))) ← LocalVar
```

Typisierung:



InstVar, MethodCall

```
class C11 {  
  char m1 () {  
    int b;  
    C12 x = new C12 ()  
    return x.m2(x.v, b);  
  }  
}
```

```
class C12 {  
  C13 v;  
  char m2(C13 v, int w) { ...}  
}  
  
class C13 { ...}
```

InstVar, MethodCall

```
class C11 {  
  char m1 () {  
    int b;  
    C12 x = new C12 ()  
    return x.m2(x.v, b);  
  }  
}
```

```
class C12 {  
  C13 v;  
  char m2(C13 v, int w) { ...}  
}  
  
class C13 { ...}
```

Erg. der Parsers:

```
Return(MethodCall(LocalOrFieldVar("x"), "m2",  
  [InstVar(LocalOrFieldVar("x"), "v"),  
   LocalOrFieldVar("b")]))
```

InstVar, MethodCall

```
class C11 {
    char m1 () {
        int b;
        C12 x = new C12 ()
        return x.m2(x.v, b);
    }
}

class C12 {
    C13 v;
    char m2(C13 v, int w) { ...}
}

class C13 { ...}
```

Erg. der Parsers:

```
Return(MethodCall(LocalOrFieldVar("x"), "m2",
    [InstVar(LocalOrFieldVar("x"), "v"),
     LocalOrFieldVar("b")]))
```

Typisierung:

```
Return(TypedExpr(
    MethodCall(TypedExpr(LocalOrFieldVar("x"), "C12"), "m2",
        [TypedExpr(
            InstVar(TypedExpr(LocalOrFieldVar("x"), "C12"),
                "v"), "C13"),
            TypedExpr(LocalOrFieldVar("b"), "int")]), "char"))
```

Semantische Analyse/Algorithmus typecheck (Haskell)

`typecheckExpr :: Expr -> [(String, Type)] -> [Class] -> Expr`

`typecheckStmt :: Stmt -> [(String, Type)] -> [Class] -> Stmt`

1. Argument: **Ungetypter Ausdruck/Statement**
 2. Argument: Tabelle mit lokalen Variablen, die durch Deklarationen `LocalVarDecl` verändert werden.
 3. Argument: **Alle sichtbaren Klassen mit Fields und Methoden**
- Ergebnis: **getypeter Ausdruck/Statement**

Semantische Analyse/Algorithmus typecheck (Haskell)

`typecheckExpr :: Expr -> [(String, Type)] -> [Class] -> Expr`

`typecheckStmt :: Stmt -> [(String, Type)] -> [Class] -> Stmt`

1. Argument: **Ungetypter Ausdruck/Statement**
2. Argument: Tabelle mit lokalen Variablen, die durch Deklarationen `LocalVarDecl` verändert werden.
3. Argument: **Alle sichtbaren Klassen mit Fields und Methoden**

Ergebnis: **getypeter Ausdruck/Statement**

Ablauf: Lauf über alle Methoden aller Klassen:

- ▶ Check ob Variablen/Methoden deklariert
- ▶ Check, ob die Typen der Metdodenaufrufe/Zuweisung korrekt sind
- ▶ Einfügen der Typisierungen

Beispiel: typeCheck für IF

$$\text{[If]} \frac{O \triangleright_{\text{Stmt}} s_1 : \theta_1, O \triangleright_{\text{Stmt}} s_2 : \theta_2 \quad O \triangleright_{\text{Expr}} e : \text{boolean}}{O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{If}(e, s_1, s_2) : \bar{\theta}, \text{ wobei } \bar{\theta} \in \text{UB}(\theta_1, \theta_2)}$$

```
typecheckStmt :: Stmt -> [(String, Type)] -> [Class] -> Stmt
typecheckStmt (If(be, ifs, Nothing)) symtab cls =
  let
    bexp = typecheckExpr be symtab cls
    ifstmt = typecheckStmt ifs symtab cls
  in
    if ((getTypeFromExpr bexp) == "boolean") then
      TypedStmt(If(bexp, ifstmt, Nothing), getTypeFromStmt ifstmt)
    else
      error "boolean expected"

getTypeFromExpr :: Expr -> Type
getTypeFromExpr (TypedExpr(_, typ)) = typ

getTypeFromStmt :: Stmt -> Type
getTypeFromStmt (TypedStmt(_, typ)) = typ
```


Semantische Analyse/Algorithmus typecheck (Java)

```
Type typeCheck(Map<String, Type> localVars, Vector<Class>  
classes)
```

1. Argument: Tabelle mit lokalen Variablen, die durch Deklarationen LocalVarDecl verändert werden.
 2. Argument: Klassen mit Attributen (Fields) und Methoden
- Ergebnis: Typ des Ausdrucks/Statements

Semantische Analyse/Algorithmus typecheck (Java)

```
Type typeCheck(Map<String, Type> localVars, Vector<Class>  
classes)
```

1. Argument: Tabelle mit lokalen Variablen, die durch Deklarationen LocalVarDecl verändert werden.
 2. Argument: Klassen mit Attributen (Fields) und Methoden
- Ergebnis: Typ des Ausdrucks/Statements

Ablauf: Lauf über alle Methoden, alle Statements und alle Expressions der Klasse:

- ▶ Check ob Variablen/Methoden deklariert
- ▶ Check, ob die Typen der Metdodenaufrufe/Zuweisung korrekt sind
- ▶ Einfügen der Typisierungen
- ▶ Ersetzen von LocalOrFieldVar zu InstVar bzw. LocalVar

Beispiel: typeCheck für IF

$$\text{[If]} \frac{\begin{array}{l} O \triangleright_{\text{Stmt}} s_1 : \theta_1, O \triangleright_{\text{Stmt}} s_2 : \theta_2 \\ O \triangleright_{\text{Expr}} e : \text{boolean} \end{array}}{O \triangleright_{\text{Stmt}} \text{If}(e, s_1, s_2) : \bar{\theta}, \text{ wobei } \bar{\theta} \in \text{UB}(\theta_1, \theta_2)}$$

```
class Statement {
  Type typ;
  abstract Type typeCheck(Map<String, Type> localVars, Vector<Class>
    classes);
}

class If extends Statement {
  Expression cond;
  Statement ifStmt;
  Statement elseStmt;

  Type typeCheck(Map<String, Type> localVars, Vector<Class> classes) {
    if (cond.typeCheck(localVars, classes).equals(new Type("boolean"))
      && ifStmt.typeCheck(localVars, classes)
        .equals(elseStmt.typeCheck(localVars, classes))) {
      typ = ifStmt.typeCheck(localVars, classes);
      return typ; }
    else { //error }
  }
}
```