

Compilerbau

Martin Plümicke

WS 2021/22

Agenda

Überblick Vorlesung

- Literatur

Compiler Überblick

Compiler (I)

- Scanner

- Parser

Überblick Funktionale Programmierung

- Einleitung

- Haskell-Grundlagen

- Scanner in Funktionalen Sprachen

- Parser in Funktionalen Sprachen

Compiler (II)

- Abstrakte Syntax

- Abstrakte Syntax Java

- Semantische Analyse/Typecheck

- Antlr

- Codegenerierung

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.

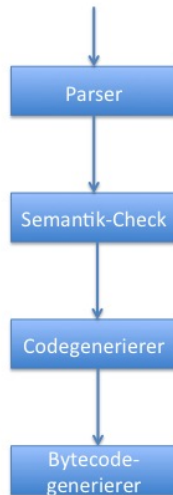
O'Reilly, 2009.



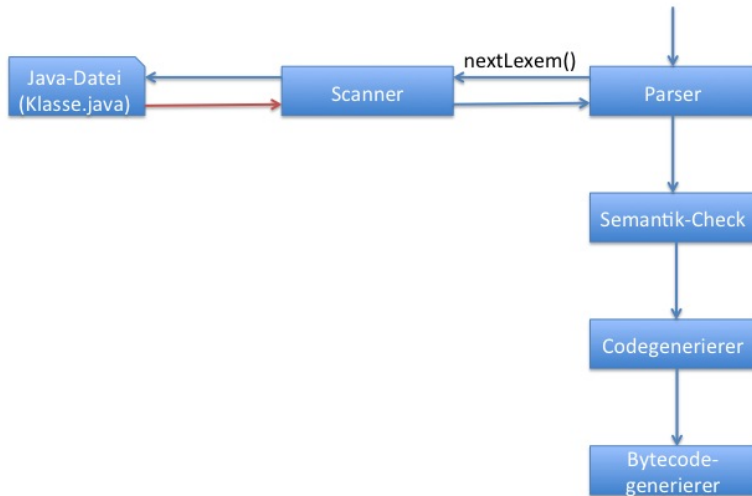
Peter Thiemann.
Grundlagen der funktionalen Programmierung.

Teubner, 1994.

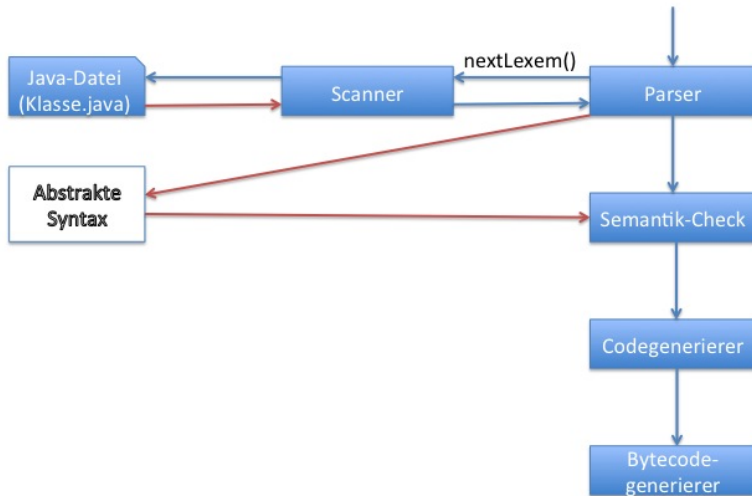
Compiler Überblick



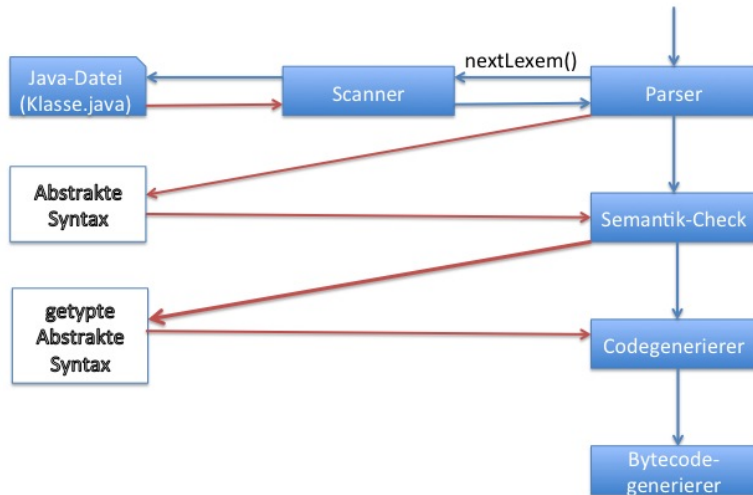
Compiler Überblick



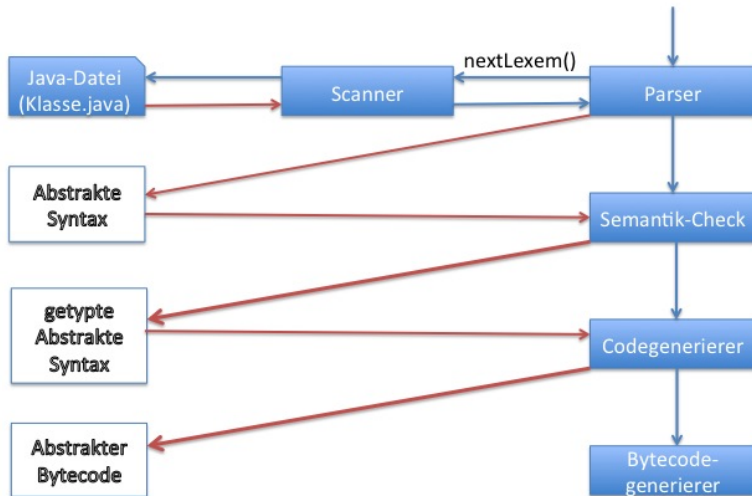
Compiler Überblick



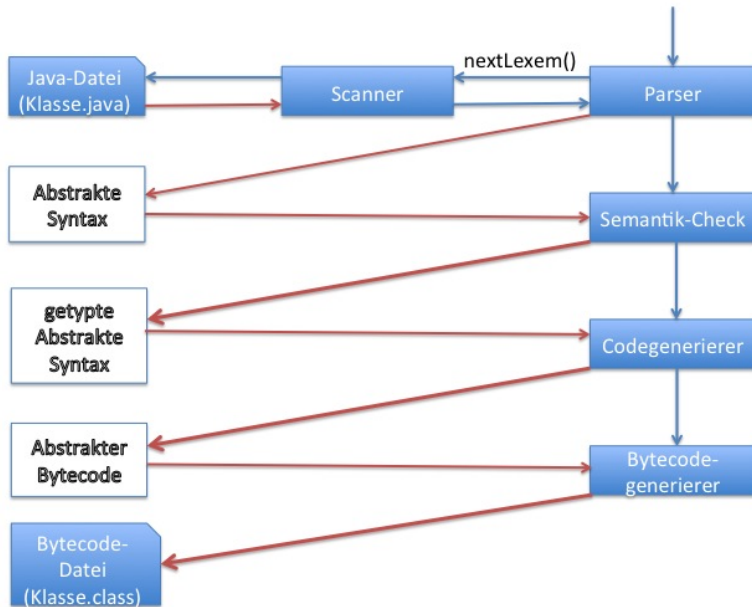
Compiler Überblick



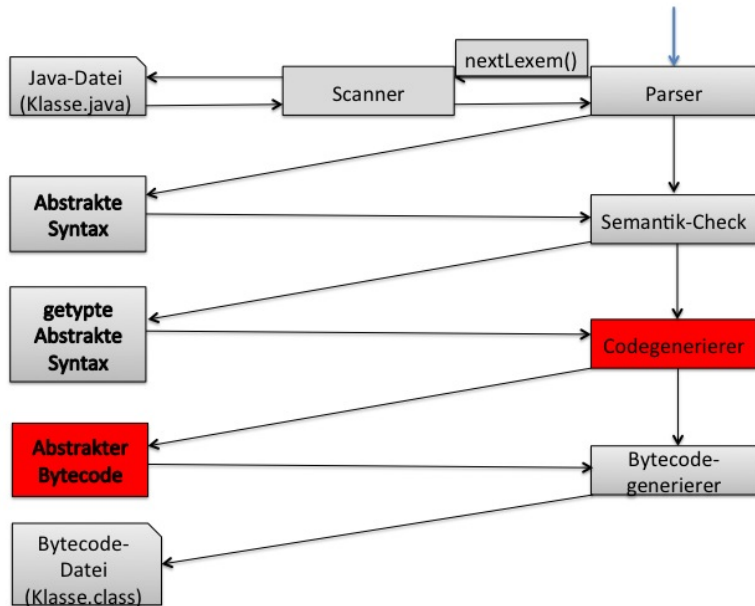
Compiler Überblick



Compiler Überblick



Codegenerierung



Codegenerierung

Typisierte abstrakte Syntax -> Abstrakten Bytecode

Abstrakter Bytecode (HackageDB)¹

```
data ClassFile =
  ClassFile { magic          :: Magic          -- CAFEBABE
            , minver         :: MinorVersion   -- Versionen
            , maxver         :: MajorVersion
            , count_cp       :: ConstantPool_Count -- Anz. Eintr. Konst.p
            , array_cp       :: CP_Infos       -- Konstantenpool
            , acfg           :: AccessFlags    -- Berechtigungen
            , this           :: ThisClass      -- This-Klasse
            , super          :: SuperClass     -- Super-Klasse
            , count_interfaces :: Interfaces_Count -- Anz. Interfaces
            , array_interfaces :: Interfaces    -- Interfaces
            , count_fields    :: Fields_Count   -- Anzahl Fields
            , array_fields    :: Field_Infos    -- Fields
            , count_methods   :: Methods_Count  -- Methoden
            , array_methods   :: Method_Infos   -- Methoden
            , count_attributes :: Attributes_Count -- Anz. Attribute
            , array_attributes :: Attribute_Infos -- Attribute
            }
}
```

```
type CP_Infos      = [CP_Info]
type Interfaces    = [Interface]
type Field_Infos  = [Field_Info]
type Method_Infos = [Method_Info]
type Attribute_Infos = [Attribute_Info]

data Magic = Magic

data MinorVersion = MinorVersion {
    numMinVer :: Int
}

data MajorVersion = MajorVersion {
    numMaxVer :: Int
}
```

Konstantenpool-Einträge I

```
data CP_Info =
  Class_Info
    { tag_cp           :: Tag
    , index_cp         :: Index_Constant_Pool
    , desc             :: String           }
  | FieldRef_Info
    { tag_cp           :: Tag
    , index_name_cp    :: Index_Constant_Pool
    , index_nameandtype_cp :: Index_Constant_Pool
    , desc             :: String           }
  | MethodRef_Info
    { tag_cp           :: Tag
    , index_name_cp    :: Index_Constant_Pool
    , index_nameandtype_cp :: Index_Constant_Pool
    , desc             :: String           }
  | InterfaceMethodRef_Info
    { tag_cp           :: Tag
    , index_name_cp    :: Index_Constant_Pool
    , index_nameandtype_cp :: Index_Constant_Pool
    , desc             :: String           }
```

Konstantenpool-Einträge II

```
| String_Info
    { tag_cp          :: Tag
      , index_cp      :: Index_Constant_Pool
      , desc          :: String          }
| Integer_Info
    { tag_cp          :: Tag
      , numi_cp       :: Int
      , desc          :: String          }
| Float_Info
    { tag_cp          :: Tag
      , numf_cp       :: Float
      , desc          :: String          }
| Long_Info
    { tag_cp          :: Tag
      , numi_l1_cp    :: Int
      , numi_l2_cp    :: Int
      , desc          :: String          }
| Double_Info
    { tag_cp          :: Tag
      , numi_d1_cp    :: Int
      , numi_d2_cp    :: Int
      , desc          :: String          }
```

Konstantenpool-Einträge III

```
| NameAndType_Info
    { tag_cp           :: Tag
      , index_name_cp  :: Index_Constant_Pool
      , index_descr_cp :: Index_Constant_Pool
      , desc           :: String                }
| Utf8_Info
    { tag_cp           :: Tag
      , tam_cp         :: Int
      , cad_cp         :: String
      , desc           :: String                }
```

```
data Tag = TagClass
  | TagFieldRef
  | TagMethodRef
  | TagInterfaceMethodRef
  | TagString
  | TagInteger
  | TagFloat
  | TagLong
  | TagDouble
  | TagNameAndType
  | TagUtf8
```

Field_Info und Method_Infos

```
data Field_Info = Field_Info
    { af_fi          :: AccessFlags
    , index_name_fi  :: Index_Constant_Pool    -- name_index
    , index_descr_fi :: Index_Constant_Pool    -- descriptor_index
    , tam_fi         :: Int                    -- count_attributte
    , array_attr_fi  :: Attribute_Infos
    }
```

```
data Method_Info = Method_Info
    { af_mi          :: AccessFlags
    , index_name_mi   :: Index_Constant_Pool    -- name_index
    , index_descr_mi  :: Index_Constant_Pool    -- descriptor_index
    , tam_mi          :: Int                    -- attributes_count
    , array_attr_mi   :: Attribute_Infos
    }
```

Attribute_Info

```
data Attribute_Info =
  ...
| AttributeCode
  { index_name_attr      :: Index_Constant_Pool  -- attribute_name_index
  , tam_len_attr         :: Int                  -- attribute_length
  , len_stack_attr       :: Int                  -- max_stack
  , len_local_attr       :: Int                  -- max_local
  , tam_code_attr        :: Int                  -- code_length
  , array_code_attr      :: ListaInt             -- code como array
                                              -- de bytes
-- , array_code_attr      :: [Code]              -- code array (altern.)
  , tam_ex_attr          :: Int                  -- exceptions_length
  , array_ex_attr        :: Tupla4Int            -- no usamos
  , tam_attr_attr        :: Int                  -- attributes_count
  , array_attr_attr      :: Attribute_Infos
  }
| ...
```

Beispiel: Byte-Code

```
class bct {  
    Integer i;  
}
```

```
> javac -g:none bct.java
```

```
magic = 0x CAFEBAFE
minor_version = 0
major_version = 52
constant_pool_count = 12
constant_pool =
{
1| tag = CONSTANT_Methodref, class_index = 3, name_and_type_index = 9
2| tag = CONSTANT_Class, name_index = 10
3| tag = CONSTANT_Class, name_index = 11
4| tag = CONSTANT_Utf8, length = 1, bytes = i
5| tag = CONSTANT_Utf8, length = 19, bytes =Ljava/lang/Integer;
6| tag = CONSTANT_Utf8, length = 6, bytes = <init>
7| tag = CONSTANT_Utf8, length = 3, bytes = ()V
8| tag = CONSTANT_Utf8, length = 4, bytes = Code
9| tag = CONSTANT_NameAndType, name_index = 6, descriptor_index = 7
10| tag = CONSTANT_Utf8, length = 3, bytes = bct
11| tag = CONSTANT_Utf8, length = 16, bytes = java/lang/Object
}
access_flags = 32 // ACC_SUPER
this_class = #2 // bct
super_class = #3 // java/lang/Object
interfaces_count = 0
interfaces = {}
```

```
fields_count = 1
fields [0] =
{
  access_flags = 0
  name_index = #4 // i
  descriptor_index = #5 // Ljava/lang/Integer;
  attributes_count = 0
  attributes = {}
}
methods_count = 1
methods [0] =
{
  access_flags = 0
  name_index = #6 // <init>
  descriptor_index = #7 // ()V
```

```
attributes_count = 1
attributes [0] =
{
attribute_name_index = #8  // Code
attribute_length = 17
max_stack = 1, max_locals = 1
code_length = 5
code =
{
    0  aload_0
    1  invokespecial #1  // java/lang/Object.<init> ()V
    4  return
}
exception_table_length = 0
exception_table = {}
attributes_count = 0
attributes = {}
}
}
attributes_count = 0
attributes = {}
```

JVM – Zur Laufzeit

Frame: Für jeden Methodenaufruf wird ein Frame erzeugt:

- ▶ Array von lokalen Variablen
- ▶ Operanden-Stack
- ▶ Referenz zum zugehörigen Konstantenpool

JVM – Zur Laufzeit

Frame: Für jeden Methodenaufruf wird ein Frame erzeugt:

- ▶ Array von lokalen Variablen
- ▶ Operanden-Stack
- ▶ Referenz zum zugehörigen Konstantenpool

Stack: Auf dem Stack liegen die Frames, der aufgerufenen Methoden

JVM – Zur Laufzeit

Frame: Für jeden Methodenaufruf wird ein Frame erzeugt:

- ▶ Array von lokalen Variablen
- ▶ Operanden-Stack
- ▶ Referenz zum zugehörigen Konstantenpool

Stack: Auf dem Stack liegen die Frames, der aufgerufenen Methoden

Heap: Speicher für alle Objekte

JVM – Zur Laufzeit

Frame: Für jeden Methodenaufruf wird ein Frame erzeugt:

- ▶ Array von lokalen Variablen
- ▶ Operanden-Stack
- ▶ Referenz zum zugehörigen Konstantenpool

Stack: Auf dem Stack liegen die Frames, der aufgerufenen Methoden

Heap: Speicher für alle Objekte

Method Area: Speicher für alle Methoden

Code-Übersetzung

Standard-Konstruktor

```
class bct {  
    bct() {  
        super();  
    }  
}
```

führt zu

```
0  aload_0  
1  invokespecial #1  // java/lang/Object.<init> ()V  
4  return
```

aload_<n>, aload

Code: **aload_<n>**

Format: **aload_<n>**

Bechreibung: Lädt die Referenz der n -ten lokalen Variablen auf den Stack

Formen: `aload_0 = 42 (0x2a)`

`aload_1 = 43 (0x2b)`

`aload_2 = 44 (0x2c)`

`aload_3 = 45 (0x2d)`

aload_<n>, aload

Code: **aload_<n>**

Format: **aload_<n>**

Bechreibung: Lädt die Referenz der n -ten lokalen Variablen auf den Stack

Formen: `aload_0 = 42 (0x2a)`

`aload_1 = 43 (0x2b)`

`aload_2 = 44 (0x2c)`

`aload_3 = 45 (0x2d)`

Code: **aload**

Format: **aload *index***

Bechreibung: Lädt die Variable *index*-te Variable auf den Stack

Formen: `aload = 25 (0x19)`

invokespecial

Code: `invokespecial`

Format: `invokespecial indexbyte1 indexbyte2`

Bechreibung: Ruft die Instanzmethode auf, die durch die Referenz `indexbyte1 << 8 | indexbyte2` in den Konstantenpool bestimmt wird. (Ohne dynamische Bindung!!!)

- ▶ Wenn die Methode nicht vorhanden ist wird in Superklassen gesucht.
- ▶ Die Argumente der Methoden müssen ebenfalls auf den Stack liegen.
- ▶ Am Ende werden die Argumente und das Objekt vom Stack gelöscht und das Ergebnis drauf gelegt.

Formen: `invokespecial = 183 (0xb7)`

Opcode: return

Code: return

Format: return

Bechreibung: Gibt void von einer Methode zurück.
Gibt die Kontrolle an die aufgerufene Methode zurück.

Formen: return = 177 (0xb1)

Variablen beschreiben

```
class bct {  
    int i;  
  
    void m () {  
        i = 1;  
    }  
}
```

führt zu

```
0  aload_0      //this  
1  iconst_1  
2  putfield #2  // bct.i I  
5  return
```

iconst_<n>

Code: iconst_<i>

Format: iconst_<i>

Bechreibung: Push int Konstante auf den Stack

Formen: iconst_m1 = 2 (0x2)

iconst_0 = 3 (0x3)

iconst_1 = 4 (0x4)

iconst_2 = 5 (0x5)

iconst_3 = 6 (0x6)

iconst_4 = 7 (0x7)

iconst_5 = 8 (0x8)

bipush

Code: **bipush**

Format: **bipush byte**

Bechreibung: Push *byte*

Formen: **bipush** = 16 (0x10)

putfield

Code: **putfield**

Format: **putfield indexbyte1 indexbyte2**

Bechreibung: Ordnet das Oberste Element des Stacks dem Attribut *indexbyte1* $\ll 8 \mid$ *indexbyte2* des Konstantenpools im Objekt des zweiobersten Elements des Stacks zu, löscht die beiden obersten Elemente des Stacks.

Formen: `putfield = 181 (0xb5)`

Variablen auslesen und beschreiben

```
class bct {  
    int i;  
  
    void m () {  
        i = i + 1;  
    }  
}
```

führt zu

```
0  aload_0  //this  
1  aload_0  //this  
2  getfield #2  // bct.i I  
5  iconst_1  
6  iadd  
7  putfield #2  // bct.i I  
10 return
```

getfield

Code: `getfield`

Format: `getfield indexbyte1 indexbyte2`

Bechreibung: Liest das Attribut *indexbyte1* $\ll 8$ | *indexbyte2* im Konstantenpool des Obersten Element des Stacks aus, löscht das oberste Element und legt den gelesenen Wert auf den Stack.

Formen: `getfield = 180 (0xb4)`

iadd

Code: **iadd**

Format: **iadd**

Bechreibung: Addiert die beiden obersten Elemente des Stacks und nimmt sie vom Stack und legt das Ergebnis drauf.

Formen: $iadd = 96$ (0x60)

iadd

Code: **iadd**

Format: **iadd**

Bechreibung: Addiert die beiden obersten Elemente des Stacks und nimmt sie vom Stack und legt das Ergebnis drauf.

Formen: $iadd = 96$ (0x60)

Anlog: *isub*, *imul*, *idiv*, *iand*, *ior*, *ixor*, *ineg*, ...

Inkrement/Dekrement

```
class bct {  
  
    void m () {  
        int i = 0;  
        i++;  
        i--;  
    }  
}
```

führt zu

```
0  iconst_0  
1  istore_1  
2  iinc 1 1    //Variable 1 (+1)  
5  iinc 1 255  //Variable 1 (-1)  
8  return
```

istore_<n>

Code: istore_<n>

Format: istore_<n>

Bechreibung: Schreibt den Integerwert des obersten Elements des Operanden-Stacks in die n -te lokale Variable und löscht das oberste Element des Operanden-Stacks.

Formen: istore_0 = 59 (0x3b)

istore_1 = 60 (0x3c)

istore_2 = 61 (0x3d)

istore_3 = 62 (0x3e)

istore

Code: **istore**

Format: **istore index**

Bechreibung: Schreibt den Integerwert des obersten Elements des Operanden-Stacks in die *index*-te lokale Variable und löscht das oberste Element des Operanden-Stacks.

Formen: `istore = 54 (0x36)`

iinc

Code: **iinc**

Format: **iinc index const**

Bechreibung: Inkrement der lokalen Variable *index* durch
vozeichenbehaftete 8-Bit *const*.

Formen: **iinc** = 132 (0x84)

New

```
class A { }  
  
class bct {  
    void m () {  
        A aa = new A();  
    }  
}
```

führt zu

```
0  new #2  // A  
3  dup  
4  invokespecial #3  // A.<init> ()V  
7  astore_1  
8  return
```

Opcode: new

Code: new

Format: new indexbyte1 indexbyte2

Bechreibung: Erzeugt ein neues Objekt der Klasse *indexbyte1* << 8 | *indexbyte2* des Konstantenpool auf dem Heap und initialisiert die Attribute. Eine Referenz auf den Speicher in Heap wird auf den Stack gelegt.

Formen: new = 187 (0xbb)

dup

Code: dup

Format: dup

Bechreibung: Dubliziert das oberste stack Element

Formen: dup = 89 (0x59)

astore_<n>, astore

Code: astore_<n>

Format: astore_<n>

Bechreibung: Schreibt die oberste Referenz des Stacks in die *n*-te lokale Variable und löscht die Referenz vom Stack

Formen: astore_0 = 75 (0x4b)

astore_1 = 76 (0x4c)

astore_2 = 77 (0x4d)

astore_3 = 78 (0x4e)

astore_<n>, astore

Code: astore_<n>

Format: astore_<n>

Bechreibung: Schreibt die oberste Referenz des Stacks in die *n*-te lokale Variable und löscht die Referenz vom Stack

Formen: astore_0 = 75 (0x4b)

astore_1 = 76 (0x4c)

astore_2 = 77 (0x4d)

astore_3 = 78 (0x4e)

Code: astore

Format: astore index

Bechreibung: Schreibt die oberste Referenz des Stacks in die *index*-te lokale Variable und löscht die Referenz vom Stack

Formen: astore = 58 (0x3a)

Methodenaufruf

```
class A { int m2(int a)  return a;  }  
class bct {  
    void m () {  
        int j = 0;  
        A aa = new A();  
        int i = aa.m2(j); }  
}
```

führt zu

```
...  
2  new #2  // A  
5  dup  
6  invokespecial #3  // A.<init> ()V  
9  astore_2  
10 aload_2  
11 iload_1  
12 invokevirtual #4  // A.m2 (I)I  
15 istore_3  
16 return
```

iload_<n>, iload

Code: **iload_<n>**

Format: **iload_<n>**

Bechreibung: Lädt den Integerwert aus der n -ten lokalen Variable auf den Stack.

Formen: iload_0 = 26 (0x1a)

iload_1 = 27 (0x1b)

iload_2 = 28 (0x1c)

iload_3 = 29 (0x1d)

`iload_<n>, iload`

Code: `iload_<n>`

Format: `iload_<n>`

Bechreibung: Lädt den Integerwert aus der n -ten lokalen Variable auf den Stack.

Formen: `iload_0 = 26 (0x1a)`

`iload_1 = 27 (0x1b)`

`iload_2 = 28 (0x1c)`

`iload_3 = 29 (0x1d)`

Code: `iload`

Format: `iload index`

Bechreibung: Lädt den Integerwert aus der $index$ -ten lokalen Variable auf den Stack.

Formen: `iload = 21 (0x15)`

invokevirtual

Code: **invokevirtual**

Format: **invokevirtual indexbyte1 indexbyte2**

Bechreibung: Ruft die Instanzmethode *abhängig von der aktuellen Receiver-Klasse* auf, die durch die Referenz **indexbyte1** << 8 | **indexbyte2** in dem Konstantenpool bestimmt wird.

- ▶ Wenn die Methode nicht vorhanden ist wird in Superklassen gesucht.
- ▶ Die Argumente der Methoden müssen ebenfalls auf dem Stack liegen.
- ▶ Am Ende werden die Argumente und das Objekt vom Stack gelöscht und das Ergebnis drauf gelegt.

Formen: invokevirtual = 182 (0xb6)

Dynamische Bindung

```
class Superclass {  
  
    void interestingMethod() {  
        System.out.println("Superclass's interesting method."); }  
  
    void exampleMethod() {  
        interestingMethod(); }  
}  
  
class Subclass extends Superclass {  
  
    void interestingMethod() {  
        System.out.println("Subclass's interesting method."); }  
  
    public static void main(String args[]) {  
        Subclass me = new Subclass();  
        me.exampleMethod(); }  
}
```

Dynamische Bindung

```
class Superclass {  
  
    void interestingMethod() {  
        System.out.println("Superclass's interesting method."); }  
  
    void exampleMethod() {  
        interestingMethod(); }  
}
```

```
class Subclass extends Superclass {  
  
    void interestingMethod() {  
        System.out.println("Subclass's interesting method."); }  
  
    public static void main(String args[]) {  
        Subclass me = new Subclass();  
        me.exampleMethod(); }  
}
```

Erg: Subclass's interesting method.

Dynamische Bindung (Bytecode)

```
class Superclass {  
  
    void interestingMethod() {  
        System.out.println("Superclass's interesting method."); }  
  
    void exampleMethod() {  
        interestingMethod(); }  
}
```

führt zu

```
0  aload_0  
1  invokevirtual #5  // interestingMethod ()V (dynamisch)  
4  return
```

Statische Bindung

```
class Superclass {  
  
    private void interestingMethod() {  
        System.out.println("Superclass's interesting method."); }  
  
    void exampleMethod() {  
        interestingMethod(); }  
}  
  
class Subclass extends Superclass {  
  
    void interestingMethod() {  
        System.out.println("Subclass's interesting method."); }  
  
    public static void main(String args[]) {  
        Subclass me = new Subclass();  
        me.exampleMethod(); }  
}
```

Statische Bindung

```
class Superclass {  
  
    private void interestingMethod() {  
        System.out.println("Superclass's interesting method."); }  
  
    void exampleMethod() {  
        interestingMethod(); }  
}  
  
class Subclass extends Superclass {  
  
    void interestingMethod() {  
        System.out.println("Subclass's interesting method."); }  
  
    public static void main(String args[]) {  
        Subclass me = new Subclass();  
        me.exampleMethod(); }  
}
```

Erg: Superclass's interesting method.

Statische Bindung (Bytecode)

```
class Superclass {  
  
    private void interestingMethod() {  
        System.out.println("Superclass's interesting method."); }  
  
    void exampleMethod() {  
        interestingMethod(); }  
}
```

führt zu

```
0  aload_0  
1  invokespecial #5    // Superclass.interestingMethod ()V  
4  return
```

Return

```
class bct {  
    bct b;  
  
    int m1() { return 1; }  
  
    bct m2() { return b; }  
}
```

führt zu

```
0  iconst_1          //m1  
1  ireturn  
  
0  aload_0           //m2  
1  getfield #2       // bct.b Lbct;  
4  areturn
```

areturn, ireturn

Code: **areturn**

Format: **areturn**

Bechreibung: Rückgabe des obersten Elements des (Operanden-)Stacks als Referenz auf ein Objekt. Legt die Referenz auf den (Operanden-)Stack des Frames der aufrufenden Methode.

Formen: areturn = 176 (0xb0)

areturn, ireturn

Code: **areturn**

Format: **areturn**

Bechreibung: Rückgabe des obersten Elements des (Operanden-)Stacks als Referenz auf ein Objekt. Legt die Referenz auf den (Operanden-)Stack des Frames der aufrufenden Methode.

Formen: areturn = 176 (0xb0)

Code: **ireturn**

Format: **ireturn**

Bechreibung: Rückgabe des obersten Elements des (Operanden-)Stacks als int, boolean, byte, short, char und legt Element auf den (Operanden-)Stack des Frames der aufrufenden Methode.

Formen: ireturn = 172 (0xb0)

While

```
class bct {  
  
    void m () {  
        int i = 0;  
        while (i == 1) { i++; }  
    }  
}
```

führt zu

```
0  iconst_0  
1  istore_1  
2  iload_1  
3  iconst_1  
4  if_icmpne 0 9  
7  iinc 1 1      //Variable 1 (+1)  
10 goto 255 248  
13 return
```

if_icmp<cond>

Code: if_icmp<cond>

Format: if_icmp<cond> branchbyte1 branchbyte2

Bechreibung: relativer Sprung nach 16 bit vorzeichenbehaftete Zahl
branchbyte1 << 8 | *branchbyte2* wenn jeweiliger Integervergleich des
zweitobersten mit den obersten Stack Element erfolgreich ist

Formen: if_icmpeq = 159 (0x9f)

if_icmpne = 160 (0xa0)

if_icmplt = 161 (0xa1)

if_icmpge = 162 (0xa2)

if_icmpgt = 163 (0xa3)

if_icmple = 164 (0xa4)

goto

Code: `goto`

Format: `goto branchbyte1 branchbyte2`

Bechreibung: relativer Sprung nach 16 bit vorzeichenbehaftete Zahl
 $\text{branchbyte1} \ll 8 \mid \text{branchbyte2}$

Formen: `goto = 167 (0xa7)`

If

```
class bct {  
    void m () {  
        int i = 0;  
        if (i == 1) { i++; }  
    }  
}
```

führt zu

```
0  iconst_0  
1  istore_1  
2  iload_1  
3  iconst_1  
4  if_icmpne 0 6  
7  iinc 1 1    //Variable 1 (+1)  
10 return
```

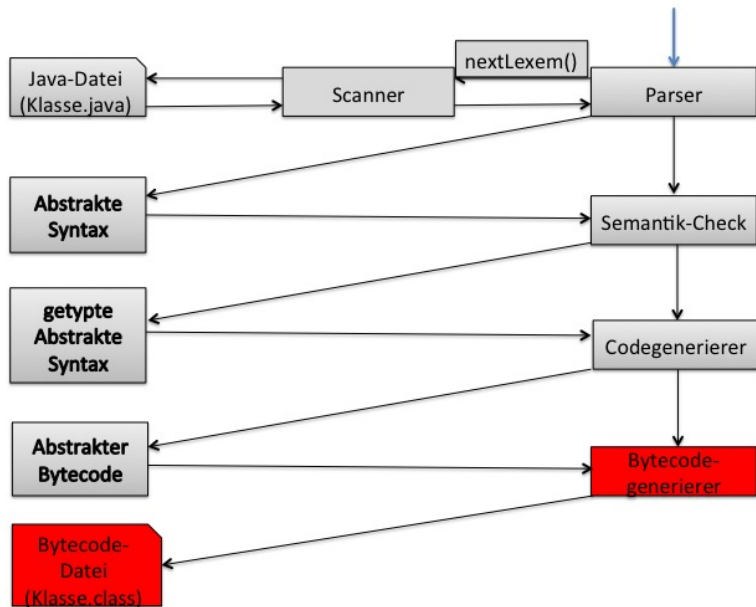
If_else

```
class bct {  
    void m () {  
        int i = 0;  
        if (i == 1) { i++; }  
        else { i--; }  
    }  
}
```

führt zu

```
0  iconst_0  
1  istore_1  
2  iload_1  
3  iconst_1  
4  if_icmpne 0 9  
7  iinc 1 1    //Variable 1 (+1)  
10 goto 0 6  
13 iinc 1 255  //Variable 1 (-1)  
16 return
```

Bytecodegenerierung



Abstrakter Bytecode -> Bytecode

Analyse des Binär-Files

Hexadezimal:

```
od -tx1 bct.class
```

```
00000000    ca  fe  ba  be  00  00  00  34  00  0c  0a  00  03  00  09  07
00000020    00  0a  07  00  0b  01  00  01  69  01  00  13  4c  6a  61  76
00000040    61  2f  6c  61  6e  67  2f  49  6e  74  65  67  65  72  3b  01
00000060    00  06  3c  69  6e  69  74  3e  01  00  03  28  29  56  01  00
00000100    04  43  6f  64  65  0c  00  06  00  07  01  00  03  62  63  74
00000120    01  00  10  6a  61  76  61  2f  6c  61  6e  67  2f  4f  62  6a
00000140    65  63  74  00  20  00  02  00  03  00  00  00  01  00  00  00
00000160    04  00  05  00  00  00  01  00  00  00  06  00  07  00  01  00
00000200    08  00  00  00  11  00  01  00  01  00  00  00  05  2a  b7  00
00000220    01  b1  00  00  00  00  00  00
0000230
```

```
magic = 0x CAFEBAFE  
minor_version = 0  
major_version = 52
```

```
ca fe ba be 00 00 00 34
```

```

constant_pool_count = 12
constant_pool =
{
1| tag = CONSTANT_Methodref, class_index = 3, name_and_type_index = 9
2| tag = CONSTANT_Class, name_index = 10
3| tag = CONSTANT_Class, name_index = 11
4| tag = CONSTANT_Utf8, length = 1, bytes = i
5| tag = CONSTANT_Utf8, length = 19, bytes = Ljava/lang/Integer;
6| tag = CONSTANT_Utf8, length = 6, bytes = <init>
7| tag = CONSTANT_Utf8, length = 3, bytes = ()V
8| tag = CONSTANT_Utf8, length = 4, bytes = Code
9| tag = CONSTANT_NameAndType, name_index = 6, descriptor_index = 7
10| tag = CONSTANT_Utf8, length = 3, bytes = bct
11| tag = CONSTANT_Utf8, length = 16, bytes = java/lang/Object
}

```

```

                                00  0c  0a  00  03  00  09  07
00  0a  07  00  0b  01  00  01  69  01  00  13  4c  6a  61  76
61  2f  6c  61  6e  67  2f  49  6e  74  65  67  65  72  3b  01
00  06  3c  69  6e  69  74  3e  01  00  03  28  29  56  01  00
04  43  6f  64  65  0c  00  06  00  07  01  00  03  62  63  74
01  00  10  6a  61  76  61  2f  6c  61  6e  67  2f  4f  62  6a
65  63  74

```

```
access_flags = 32 // ACC_SUPER
this_class = #2 // bct
super_class = #3 // java/lang/Object
interfaces_count = 0
interfaces = {}
```

```
00 20 00 02 00 03 00 00
```

```
fields_count = 1
fields [0] =
{
  access_flags = 0
  name_index = #4 // i
  descriptor_index = #5 // Ljava/lang/Integer;
  attributes_count = 0
  attributes = {}
}
```

00 01 00 00 00 04 00 05 00 00

```
methods_count = 1
methods [0] =
{
access_flags = 0
name_index = #6 // <init>
descriptor_index = #7 // ()V
```

00 01 00 00 00 06 00 07

```

attributes_count = 1
attributes [0] =
{
attribute_name_index = #8 // Code
attribute_length = 17
max_stack = 1, max_locals = 1
code_length = 5
code =
{
    0  aload_0
    1  invokespecial #1 // java/lang/Object.<init> ()V
    4  return
}

```

```

00 01 00 08 00 00 00 11 00 01 00 01 00 00 00 05
2a b7 00 01 b1

```

```
exception_table_length = 0  
exception_table = {}  
attributes_count = 0  
attributes = {}  
}  
}
```

00 00 00 00

```
exception_table_length = 0  
exception_table = {}  
attributes_count = 0  
attributes = {}  
}  
}
```

00 00 00 00

```
attributes_count = 0  
attributes = {}
```

00 00

Dezimal (8 Bit)

```
od -td1 bct.class
```

```
00000000  -54  -2 -70 -66   0   0   0  52   0  12  10   0   3   0   9   7
00000020    0  10   7   0  11   1   0   1 105   1   0  19  76 106  97 118
00000040   97  47 108  97 110 103  47  73 110 116 101 103 101 114  59   1
00000060    0   6  60 105 110 105 116  62   1   0   3  40  41  86   1   0
0000100   4  67 111 100 101  12   0   6   0   7   1   0   3  98  99 116
0000120    1   0  16 106  97 118  97  47 108  97 110 103  47  79  98 106
0000140  101  99 116   0  32   0   2   0   3   0   0   0   1   0   0   0
0000160   4   0   5   0   0   0   1   0   0   0   6   0   7   0   1   0
0000200   8   0   0   0  17   0   1   0   1   0   0   0   5  42 -73   0
0000220   1 -79   0   0   0   0   0   0
0000230
```

ASCII

```
od -ta bct.class
```

```
00000000          nul  ff  nl nul etx nul  ht bel
00000020  nul  nl bel nul  vt soh nul soh  i soh nul dc3  L  j  a  v
00000040    a  /  l  a  n  g  /  I  n  t  e  g  e  r  ; soh
00000060  nul ack  <  i  n  i  t  > soh nul etx  (  )  V soh nul
0000100  eot  C  o  d  e  ff nul ack nul bel soh nul etx  b  c  t
0000120  soh nul dle  j  a  v  a  /  l  a  n  g  /  0  b  j
0000140    e  c  t nul  sp nul stx nul etx nul nul nul soh nul nul nul
0000160  eot nul enq nul nul nul soh nul nul nul ack nul bel nul soh nul
0000200  bs nul nul nul dc1 nul soh nul soh nul nul nul enq
0000220  soh      nul nul nul nul nul nul
0000230
```

Haskell: Codegen

```
codegen :: Class -> ClassFile
-- bildet abstrakte Syntax in abstrakten Bytecode ab

compiler :: String -> ClassFile
compiler = codegen . typecheck . parse . alexScanTokens

encodeClassFile :: FilePath -> ClassFile -> IO()
-- erzeugt Bytecode--Datei

decodeClassFile :: FilePath -> IO ClassFile
--liest Bytecode--Datei und erzeugt Class daraus
```

Haskell: Codegen

```
codegen :: Class -> ClassFile
-- bildet abstrakte Syntax in abstrakten Bytecode ab

compiler :: String -> ClassFile
compiler = codegen . typecheck . parse . alexScanTokens

encodeClassFile :: FilePath -> ClassFile -> IO()
-- erzeugt Bytecode--Datei

decodeClassFile :: FilePath -> IO ClassFile
--liest Bytecode--Datei und erzeugt Class daraus

main = do
  s <- readFile "name.java"
  encodeClassFile "name.class" (compiler s)
  cf <- decodeClassFile "name.class"
  print cf
```

javap

javap disassembliert Classfiles

Optionen:

- v Verbose (zusätzliche Informationen)
- p Zeigt auch private Klassen, Methoden und Attribute

javap -v -p bct.class |

```
class bct
  minor version: 0
  major version: 50
  flags: (0x0020) ACC_SUPER
  this_class: #2                                // bct
  super_class: #3                               // java/lang/Object
  interfaces: 0, fields: 1, methods: 1, attributes: 0
Constant pool:
  #1 = Methodref          #3.#9                // java/lang/Object."<init>":()
        V
  #2 = Class               #10                  // bct
  #3 = Class               #11                  // java/lang/Object
  #4 = Utf8                i
  #5 = Utf8                Ljava/lang/Integer;
  #6 = Utf8                <init>
  #7 = Utf8                ()V
  #8 = Utf8                Code
  #9 = NameAndType         #6:#7                // "<init>":()V
  #10 = Utf8               bct
  #11 = Utf8               java/lang/Object
```

javap -v -p bct.class II

```
{
  java.lang.Integer i;
    descriptor: Ljava/lang/Integer;
    flags: (0x0000)

  bct();
    descriptor: ()V
    flags: (0x0000)
    Code:
      stack=1, locals=1, args_size=1
        0: aload_0
        1: invokespecial #1 // Method java/lang/Object."<init>":()V
        4: return
}
```

Bytecode Generierung mit ASM

Fayez Abu Alia

javap

javap

- Disassemblierung von Klassendatei

Option	Aufgabe
-c	zeigt den erzeugten Bytecode
-p/-private	zeigt alle Methoden und Elemente der Klasse
-s	zeigt die Deskriptoren
-v/-verbose	zeigt ausführliche Informationen wie z.B. Konstantenpool

- Keine Option => zeigt nur die Struktur der Klassendatei

```
public class Bytecode {  
  
    public void m(){  
        System.out.println("Bytecode");  
    }  
  
}
```

~/Bytecode/examples » javap -c Bytecode

Compiled from "Bytecode.java"

```
public class Bytecode {  
    public Bytecode();  
        Code:  
        0: aload_0  
        1: invokespecial #1    // Method java/lang/Object."<init>":()V  
        4: return  
  
    public void m();  
        Code:  
        0: getstatic     #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
        3: ldc           #3    // String Bytecode  
        5: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V  
        8: return  
}
```

```
public class Bytecode {  
    public void m(){  
        System.out.println("Bytecode");  
    }  
}
```

~/Bytecode/examples » javap -c Bytecode

Compiled from "Bytecode.java"

```
public class Bytecode {  
    public Bytecode();  
        Code:  
        0: aload_0  
        1: invokespecial #1    // Method java/lang/Object."<init>":()V  
        4: return  
  
    public void m();  
        Code:  
        0: getstatic     #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
        3: ldc           #3    // String Bytecode  
        5: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V  
        8: return  
}
```

this auf den Stack laden



```

public class Bytecode {

    public void m(){
        System.out.println("Bytecode");
    }

}

```

~/Bytecode/examples » javap -c Bytecode

Compiled from "Bytecode.java"

```
public class Bytecode {
```

```
    public Bytecode();
```

```
        Code:
```

```
            0: aload_0
```

```
            1: invokespecial #1    // Method java/lang/Object."<init>":()V
```

```
            4: return
```

```
    public void m();
```

```
        Code:
```

```
            0: getstatic      #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
```

```
            3: ldc           #3    // String Bytecode
```

```
            5: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
```

```
            8: return
```

```
}
```

<init> auf this aufrufen



```

public class Bytecode {

    public void m(){
        System.out.println("Bytecode");
    }

}

```

~/Bytecode/examples » javap -c Bytecode

Compiled from "Bytecode.java"

```
public class Bytecode {
```

```
    public Bytecode();
```

```
        Code:
```

```
        0: aload_0
```

```
        1: invokespecial #1    // Method java/lang/Object."<init>":()V
```

```
        4: return
```

```
    public void m();
```

```
        Code:
```

```
        0: getstatic      #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
```

```
        3: ldc            #3    // String Bytecode
```

```
        5: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
```

```
        8: return
```

```
}
```

Konstruktor verlassen

```
public class Bytecode {  
  
    public void m(){  
        System.out.println("Bytecode");  
    }  
  
}
```

~/Bytecode/examples » javap -c Bytecode

Compiled from "Bytecode.java"

```
public class Bytecode {  
    public Bytecode();  
        Code:  
        0: aload_0  
        1: invokespecial #1    // Method java/lang/Object."<init>":()V  
        4: return  
  
    public void m();  
        Code:  
        0: getstatic    #2      // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
        3: ldc          #3        // String Bytecode  
        5: invokevirtual #4      // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V  
        8: return  
}
```

Statischer Feld auslesen



```
public class Bytecode {  
  
    public void m(){  
        System.out.println("Bytecode");  
    }  
  
}
```

~/Bytecode/examples » javap -c Bytecode

Compiled from "Bytecode.java"

```
public class Bytecode {  
    public Bytecode();  
        Code:  
        0: aload_0  
        1: invokespecial #1    // Method java/lang/Object."<init>":()V  
        4: return
```

```
    public void m();  
        Code:  
        0: getstatic    #2      // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
        3: ldc          #3        // String Bytecode  
        5: invokevirtual #4      // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V  
        8: return  
}
```

„Bytecode“ auf den Stack laden



```
public class Bytecode {  
    public void m(){  
        System.out.println("Bytecode");  
    }  
}
```

~/Bytecode/examples » javap -c Bytecode

Compiled from "Bytecode.java"

```
public class Bytecode {  
    public Bytecode();  
        Code:  
        0: aload_0  
        1: invokespecial #1    // Method java/lang/Object."<init>":()V  
        4: return  
  
    public void m();  
        Code:  
        0: getstatic    #2      // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
        3: ldc          #3      // String Bytecode  
        5: invokevirtual #4      // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V  
        8: return  
}
```

Methode „println“ aufrufen

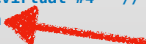


```
public class Bytecode {  
    public void m(){  
        System.out.println("Bytecode");  
    }  
}
```

~/Bytecode/examples » javap -c Bytecode

Compiled from "Bytecode.java"

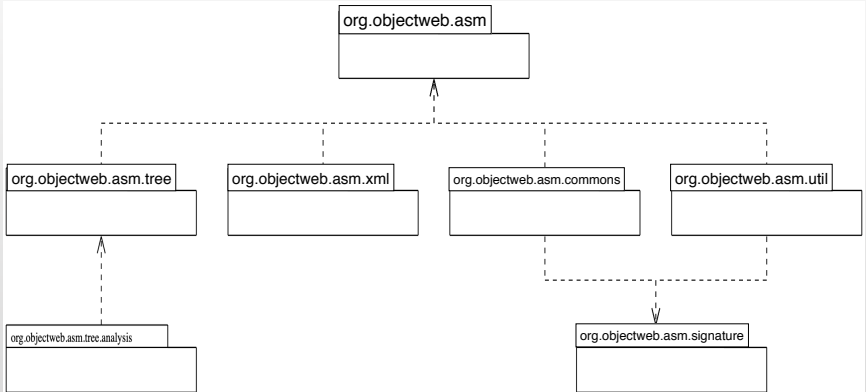
```
public class Bytecode {  
    public Bytecode();  
        Code:  
        0: aload_0  
        1: invokespecial #1    // Method java/lang/Object."<init>":()V  
        4: return  
  
    public void m();  
        Code:  
        0: getstatic     #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
        3: ldc           #3    // String Bytecode  
        5: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V  
        8: return  
}
```

 **Methode verlassen
Keine Rückgabe**

ASM

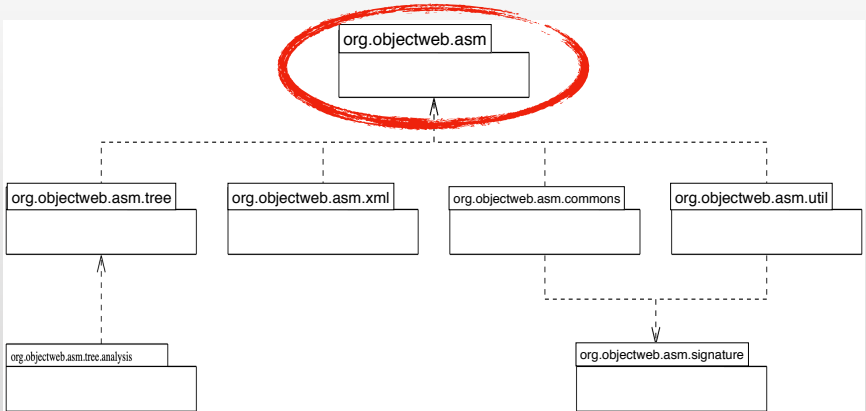
- ▶ ein Java Framework für Bearbeitung und Analyse von Bytecode
- ▶ Generierung und Transformation von Kompilierten Klassen
- ▶ Website:
 - ▶ <https://asm.ow2.io/>
 - ▶ Documentation
- ▶ Aktuelle Version 7.1

ASM



Quelle: <https://asm.ow2.io/asm-package-dependencies.svg>

ASM



Quelle: <https://asm.ow2.io/asm-package-dependencies.svg>

org.objectweb.asm

- ▶ Das core Package
- ▶ bietet:
 - ▶ ClassReader - parst kompilierten Java Klassen
 - ▶ ClassWriter - generiert Bytecode

ClassWriter

```
public class ClassWriter extends ClassVisitor {  
    public ClassWriter(int flags);  
  
    public void visit(int version, int access, String name,  
        String signature, String superName, String[] interfaces);  
  
    public FieldVisitor visitField(int access, String name,  
        String descriptor, String signature, Object value);  
  
    public MethodVisitor visitMethod(int access, String name,  
        String descriptor, String signature, String[] exceptions);  
  
    public void visitEnd();  
  
    public byte[] toByteArray();  
        :  
}  
}
```

MethodVisitor

```
public abstract class MethodVisitor {  
    public void visitCode();  
    public void visitInsn(int opcode);  
    public void visitVarInsn(int opcode, int operand);  
    public void visitLdcInsn(Object cst);  
    public void visitFieldInsn(int opc, String owner, String name,  
                               String desc);  
    public void visitMethodInsn(int opc, String owner, String name,  
                                String desc);  
    public void visitLabel(Label label);  
    public void visitMaxs(int maxStack, int maxLocals);  
    public void visitEnd();  
    :  
}
```

Opcodes

- ▶ Interface enthält Konstanten:
 - ▶ Java Versions: *V1_5, V1_6, V1_7,...*
 - ▶ Zugriffsrechte: *ACC_PUBLIC, ACC_PRIVATE,...*
 - ▶ Bytecodes: *ICONST_0, ALOAD, IADD,...*

Prozess

- ▶ Erstelle ClassWriter-Instanz
- ▶ Rufe für jedes Element der Klasse die entsprechende visit-Methode auf
- ▶ Schreibe Bytecode aus

Prozess

```
ClassWriter cw = ...;
cw.visit(...);

MethodVisitor mv1 = cw.visitMethod(..., "m1", ...);
MethodVisitor mv2 = cw.visitMethod(..., "m2", ...);
// Bytecode Generierung für „m1“
mv1.visitCode();
mv1.visitInsn(...);
...
mv1.visitMaxs(...);
mv1.visitEnd();
// Bytecode Generierung für „m2“
mv2.visitCode();
mv2.visitInsn(...);
...
mv2.visitMaxs(...);
mv2.visitEnd();

cw.visitEnd();
```

Beispiel 1

```
public class Bytecode {  
    public void m(){  
        System.out.println("Bytecode");  
    }  
}
```

Beispiel 1

```
ClassWriter cw = new ClassWriter(  
    ClassWriter.COMPUTE_FRAMES |  
    ClassWriter.COMPUTE_MAXS);
```

- ▶ ClassWriter.**COMPUTE_MAXS** : Automatische Berechnung von der maximalen Anzahl der lokalen Variablen und Größe der Stack
- ▶ ClassWriter.**COMPUTE_FRAMES** : Automatische Berechnung von Stackmap Frames

Beispiel 1

```
cw.visit(Opcodes.V1_8,  
        Opcodes.ACC_PUBLIC,  
        "Bytecode",  
        null,  
        "java/lang/Object",  
        null);
```

- definiert Klassenkopf

Beispiel 1

```
MethodVisitor constructor =  
    cw.visitMethod(Opcodes.ACC_PUBLIC,  
                  "<init>",  
                  "()V",  
                  null,  
                  null);
```

```
MethodVisitor method =  
    cw.visitMethod(Opcodes.ACC_PUBLIC,  
                  "m",  
                  "()V",  
                  null,  
                  null);
```

Beispiel 1

```
constructor.visitCode();

// aload_0
constructor.visitVarInsn(OpCodes.ALOAD, 0);

// invokespecial
constructor.visitMethodInsn(OpCodes.INVOKESPECIAL,
    "java/lang/Object", "<init>", "()V", false);

// return
constructor.visitInsn(OpCodes.RETURN);

constructor.visitMaxs(0, 0);

constructor.visitEnd();
```

Beispiel 1

```
method.visitCode();
// getstatic
method.visitFieldInsn(Opcodes.GETSTATIC,
                      "java/lang/System", "out",
                      "Ljava/io/PrintStream;");

// ldc "Bytecode"
method.visitLdcInsn("Bytecode");
// invokevirtual
method.visitMethodInsn(Opcodes.INVOKEVIRTUAL,
                      "java/io/PrintStream", "println",
                      "(Ljava/lang/String;)V", false);

// return
method.visitInsn(Opcodes.RETURN);

method.visitMaxs(0, 0);

method.visitEnd();
```

Beispiel 2

```
public void m() {  
    int i = 0;  
    while(i<5) {  
        System.out.println("Bytecode");  
        i++;  
    }  
}
```

```
public void m() {  
    int i = 0;  
    while(i<5) {  
        System.out.println("Bytecode");  
        i++;  
    }  
}
```

```
start:  
    int i = 0
```

```
loop:  
    if i>=5 goto end  
    print("Bytecode")  
    i = i + 1  
    goto loop
```

```
end:  
    return
```

```
start:
    int i = 0

loop:
    if i >= 5 goto end

print("Bytecode")
    i = i + 1
    goto loop

end:
    return
```

```
Label start = new Label();
Label loop = new Label();
Label end = new Label();
```

```
Label start = new Label();  
Label loop = new Label();  
Label end = new Label();
```

```
start:  
int i = 0
```

```
method.visitLabel(start);  
method.visitInsn(Opcodes.ICONST_0);  
method.visitVarInsn(Opcodes.ISTORE, 1);
```

```
start:  
  int i = 0
```

```
loop:
```

```
  if i >= 5 goto end  
  print("Bytecode")  
  i = i + 1  
  goto loop
```

```
Label start = new Label();  
Label loop = new Label();  
Label end = new Label();
```

```
method.visitLabel(start);  
method.visitInsn(OpCodes.ICONST_0);  
method.visitVarInsn(OpCodes.ISTORE, 1);
```

```
method.visitLabel(loop);  
method.visitVarInsn(OpCodes.ILOAD, 1);  
method.visitInsn(OpCodes.ICONST_5);  
method.visitJumpInsn(OpCodes.IF_ICMPGE, end);
```

```
start:  
  int i = 0
```

```
loop:  
  if i >= 5 goto end  
  print("Bytecode")  
  i = i + 1  
  goto loop
```

```
Label start = new Label();  
Label loop = new Label();  
Label end = new Label();
```

```
method.visitLabel(start);  
method.visitInsn(OpCodes.ICONST_0);  
method.visitVarInsn(OpCodes.ISTORE, 1);
```

```
method.visitLabel(loop);  
method.visitVarInsn(OpCodes.ILOAD, 1);  
method.visitInsn(OpCodes.ICONST_5);  
method.visitJumpInsn(OpCodes.IF_ICMPGE, end);
```

```
method.visitFieldInsn(OpCodes.GETSTATIC,  
    "java/lang/System", "out",  
    "Ljava/io/PrintStream;");  
method.visitLdcInsn("Bytecode");  
method.visitMethodInsn(OpCodes.INVOKEVIRTUAL,  
    "java/io/PrintStream", "println",  
    "(Ljava/lang/String;)V", false);
```

```
start:  
int i = 0
```

```
loop:  
if i>=5 goto end  
print("Bytecode")  
i = i + 1  
goto loop
```

```
Label start = new Label();  
Label loop = new Label();  
Label end = new Label();
```

```
method.visitLabel(start);  
method.visitInsn(OpCodes.ICONST_0);  
method.visitVarInsn(OpCodes.ISTORE, 1);
```

```
method.visitLabel(loop);  
method.visitVarInsn(OpCodes.ILOAD, 1);  
method.visitInsn(OpCodes.ICONST_5);  
method.visitJumpInsn(OpCodes.IF_ICMPGE, end);
```

```
method.visitFieldInsn(OpCodes.GETSTATIC,  
    "java/lang/System", "out",  
    "Ljava/io/PrintStream;");  
method.visitLdcInsn("Bytecode");  
method.visitMethodInsn(OpCodes.INVOKEVIRTUAL,  
    "java/io/PrintStream", "println",  
    "(Ljava/lang/String;)V", false);
```

```
method.visitIincInsn(1, 1);  
method.visitJumpInsn(OpCodes.GOTO, loop);
```

```
start:  
  int i = 0
```

```
loop:  
  if i >= 5 goto end  
  print("Bytecode")  
  i = i + 1  
  goto loop
```

```
end:  
  return
```

```
Label start = new Label();  
Label loop = new Label();  
Label end = new Label();
```

```
method.visitLabel(start);  
method.visitInsn(Opcodes.ICONST_0);  
method.visitVarInsn(Opcodes.ISTORE, 1);
```

```
method.visitLabel(loop);  
method.visitVarInsn(Opcodes.ILOAD, 1);  
method.visitInsn(Opcodes.ICONST_5);  
method.visitJumpInsn(Opcodes.IF_ICMPGE, end);
```

```
method.visitFieldInsn(Opcodes.GETSTATIC,  
    "java/lang/System", "out",  
    "Ljava/io/PrintStream;");  
method.visitLdcInsn("Bytecode");  
method.visitMethodInsn(Opcodes.INVOKEVIRTUAL,  
    "java/io/PrintStream", "println",  
    "(Ljava/lang/String;)V", false);
```

```
method.visitIincInsn(1, 1);  
method.visitJumpInsn(Opcodes.GOTO, loop);
```

```
method.visitLabel(end);  
method.visitInsn(Opcodes.RETURN);
```

Literatur

- ▶ <https://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se8/html/jvms-2.html>
- ▶ <https://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se8/html/jvms-4.html>
- ▶ <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/technotes/tools/windows/javap.html>
- ▶ Offizielle ASM-Webseite: <https://asm.ow2.io/>

codeGen-Methode

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

- ▶ Aufruf der jeweiligen visit-Funktionen.

Beispiel: Klasse Class

```
class Class {
    Type name;
    Vector<Field> fields
    Vector<Method> meth;

    void typeCheck() { ... }

    void codeGen() {
        ClassWriter cw = new ClassWriter( ClassWriter.COMPUTE_FRAMES |
                                           ClassWriter.COMPUTE_MAXS);
        cw.visit(Opcodes.V1_8, Opcodes.ACC_PUBLIC, name, null,
                "java/lang/Object", null);
        for(field: fields) { field.codeGen(cw); }
        for(m: meth) { m.codeGen(cw); }
        writeClassfile(cw); }
}
```