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 Kenntissen 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

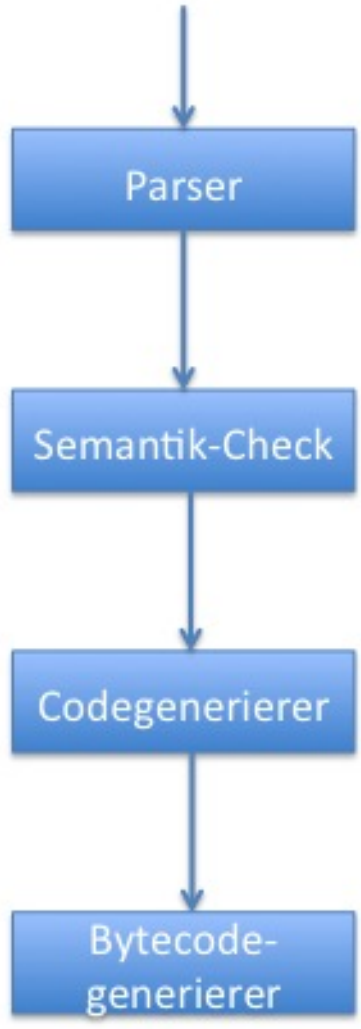

James Gosling, Bill Joy, Guy Steele, Gilad Bracha, and Alex Buckley.
The Java® Language Specification.
The Java series. Addison-Wesley, Java SE 8 edition, 2014.


Tim Lindholm, Frank Yellin, Gilad Bracha, and Alex Buckley.
The Java® Virtual Machine Specification.
The Java series. Addison-Wesley, Java SE 8 edition, 2014.

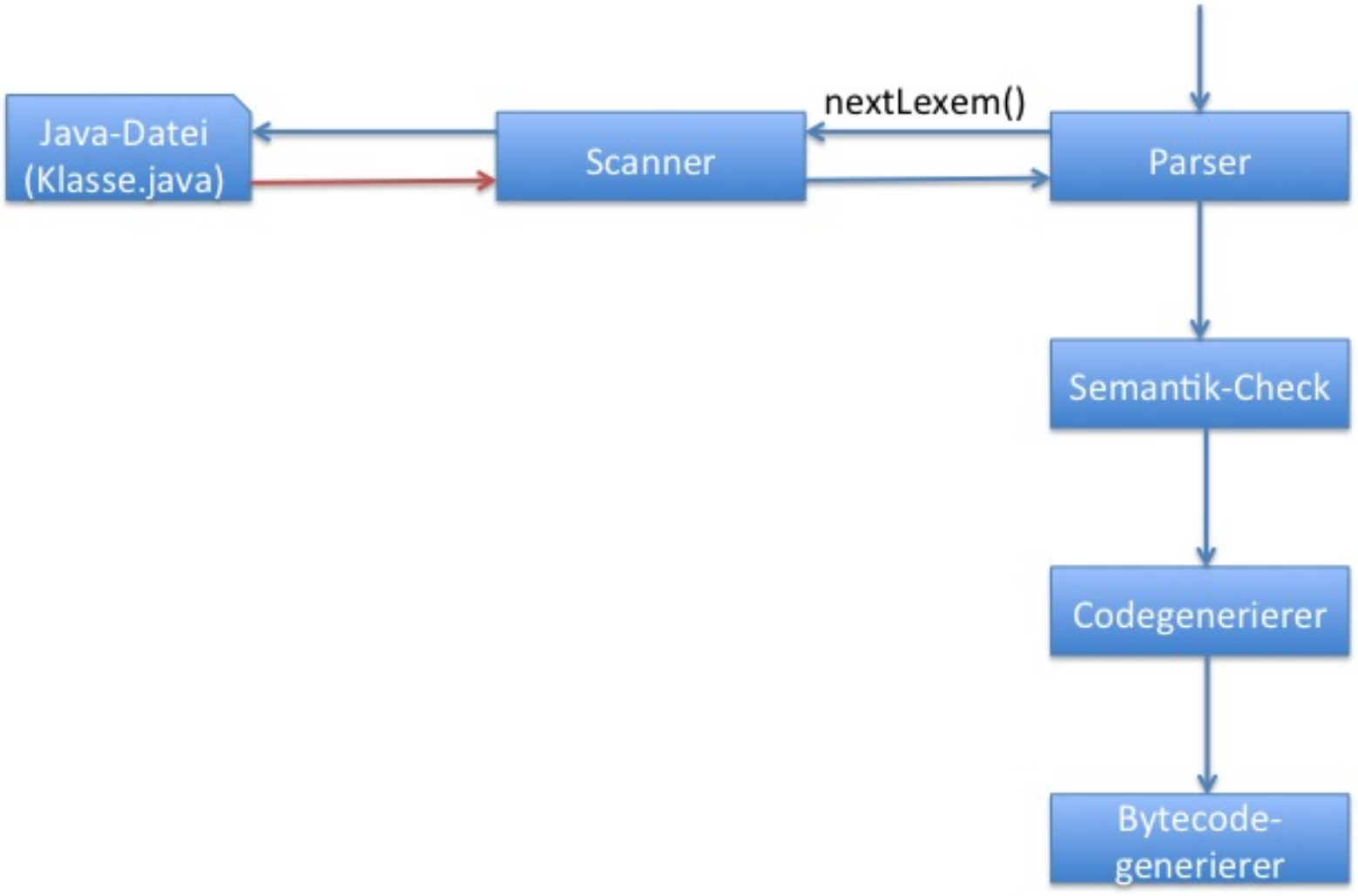

Bryan O'Sullivan, Donald Bruce Stewart, and John Goerzen.
Real World Haskell.
O'Reilly, 2009.


Peter Thiemann.
Grundlagen der funktionalen Programmierung.
Teubner, 1994.

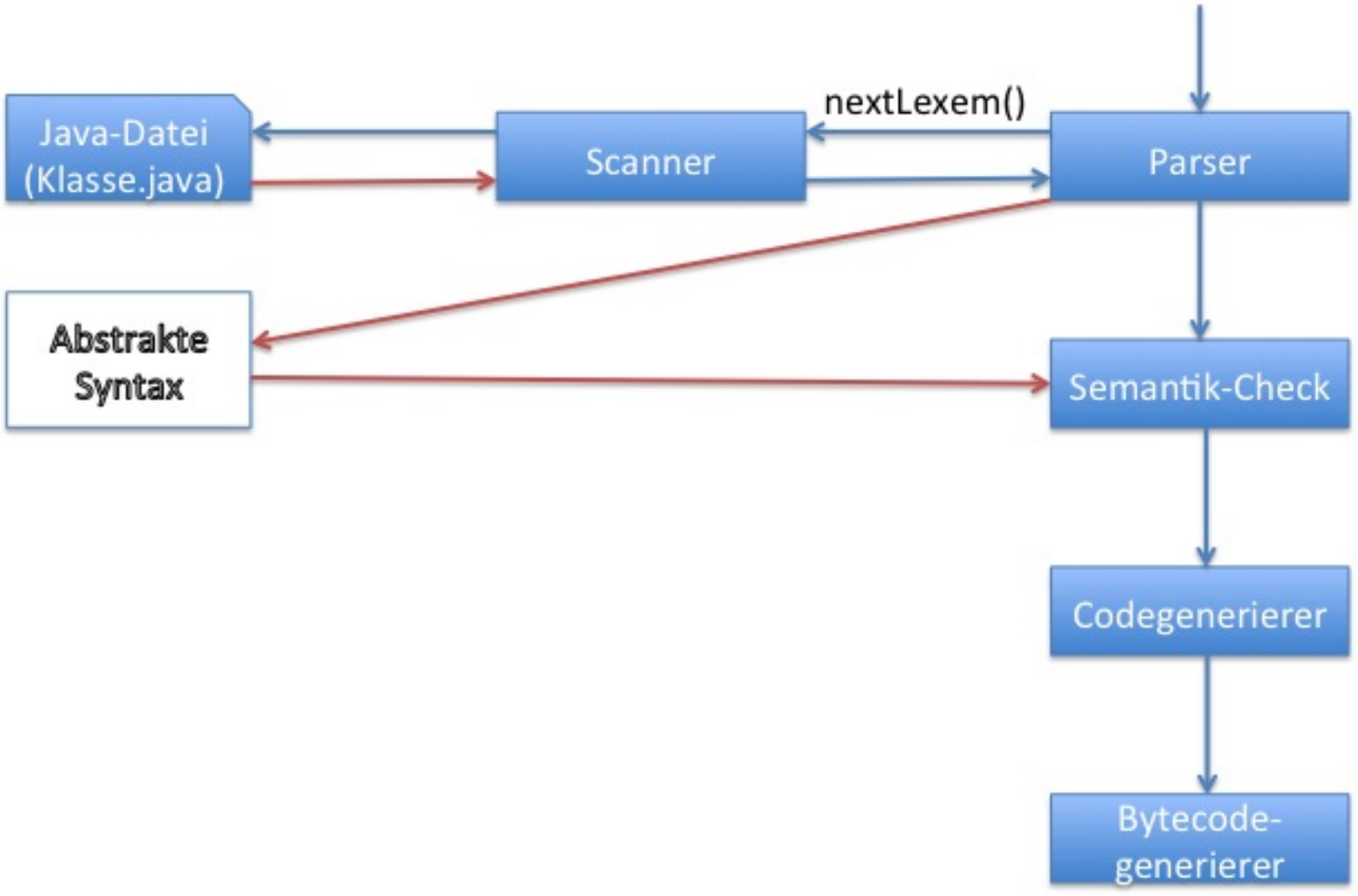
Compiler Überblick



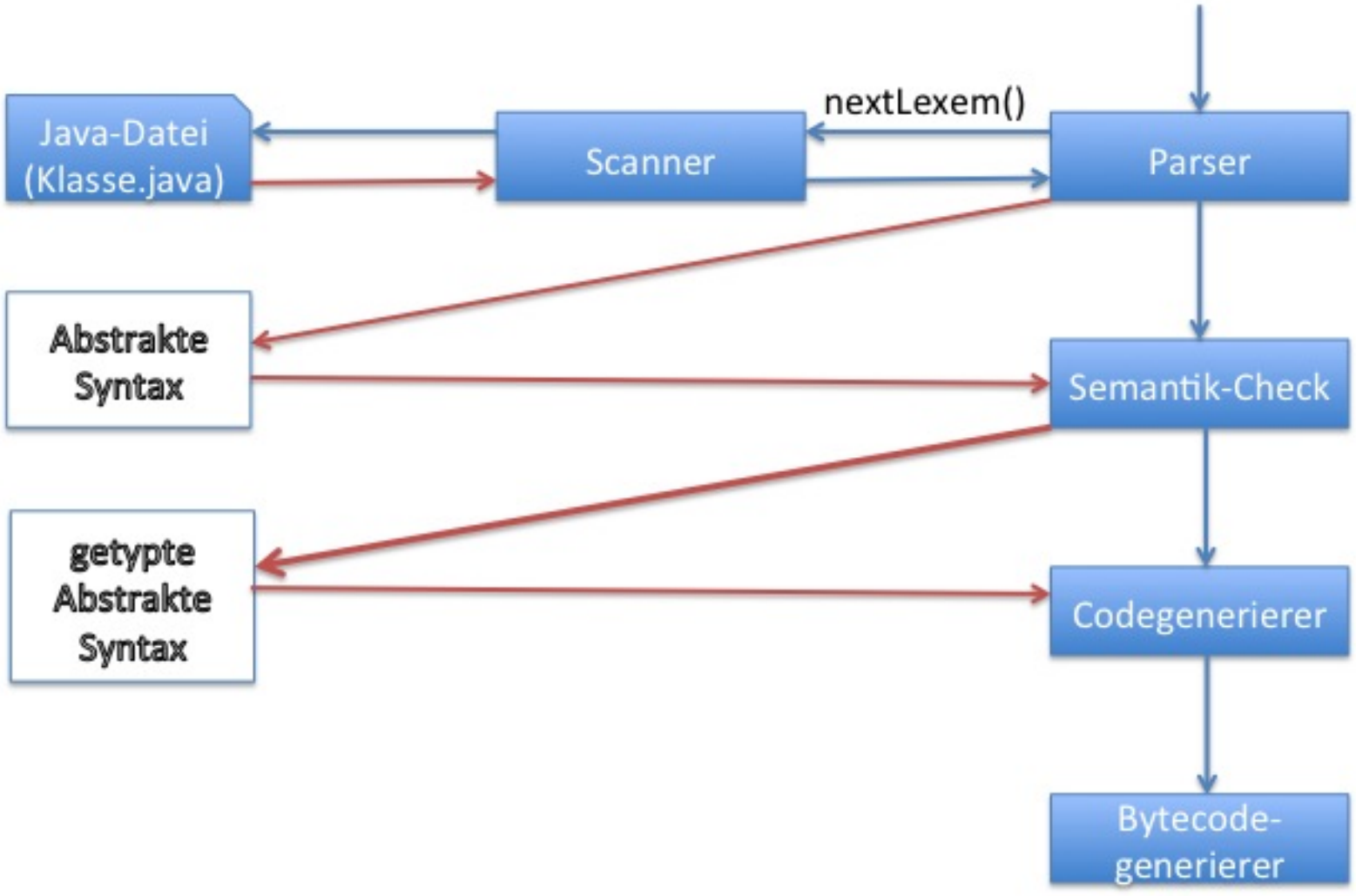
Compiler Überblick



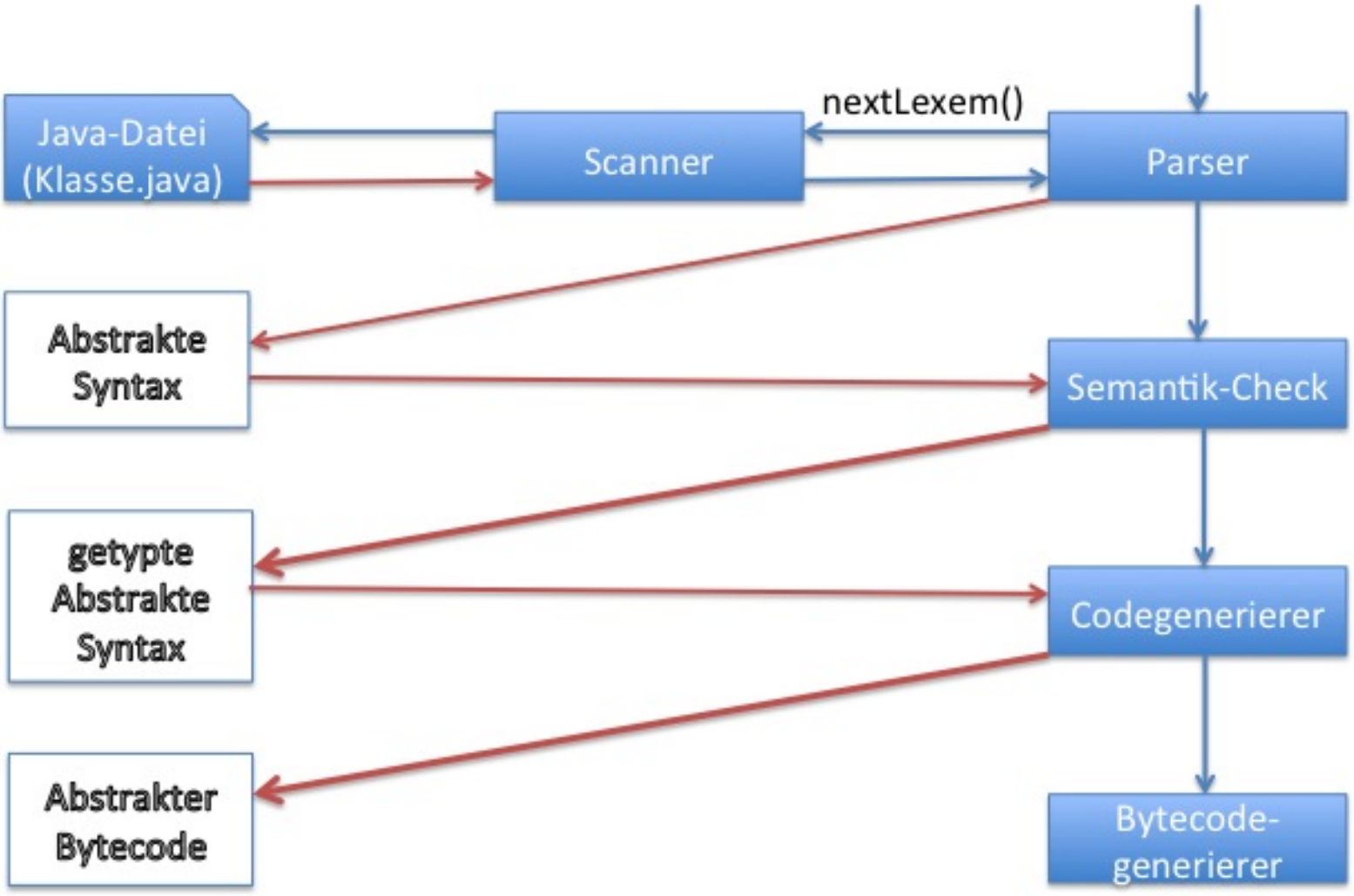
Compiler Überblick



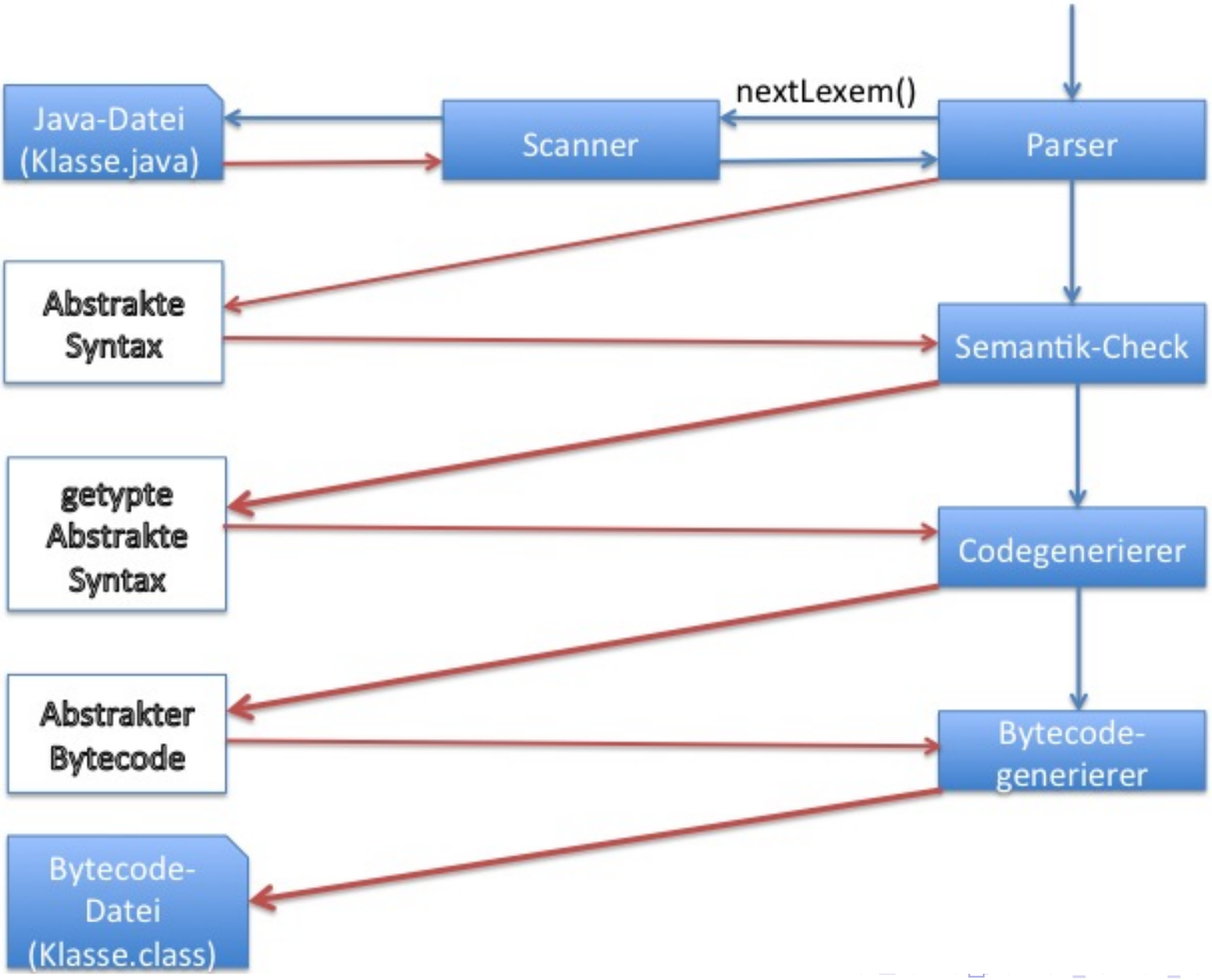
Compiler Überblick



Compiler Überblick



Compiler Überblick



Überblick Funktionale Programmierung
Einleitung

Funktionen

$$f : D \to W$$

- Definitionsbereich D
- Wertebereich W
- Abbildungsvorschrift: $x \mapsto f(x)$

Spezifikation als Funktion

Eingabe: Spezifikation des Definitionsbereichs

Ausgabe: Spezifikation des Wertebereichs

funktionaler Zusammenhang: Definition der Abbildungsvorschrift

1. Quadratfunktion

$\textbf{square} : \mathbb{Z} \to \mathbb{Z}$
$\textbf{square}(\, x \,) = x^2$

1. Quadratfunktion

$\textbf{square} : \mathbb{Z} \to \mathbb{Z}$
$\textbf{square}(\, x \,) = x^2$

Java:

```
int square(int x) {
    return x^2;
}
```

1. Quadratfunktion

$\textbf{square} : \mathbb{Z} \to \mathbb{Z}$
$\textbf{square}(\, x \,) = x^2$

Java:

```
int square(int x) {
    return x^2;
}
```

Haskell:

```
square :: Int -> Int
square(x) = x^2
```

2. Maximumsfunktion

$$\textbf{max} : \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \to \mathbb{Z}$$

$$\textbf{max}(\, x, y \,) = \begin{cases} x & x \geq y \\ y & \text{sonst} \end{cases}$$

2. Maximumsfunktion

$$\textbf{max} : \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \to \mathbb{Z}$$

$$\textbf{max}(\, x, y \,) = \begin{cases} x & x \geq y \\ y & \text{sonst} \end{cases}$$

Java:

```
int max(int x, int y) {
    if (x >= y) return x
    else return y;
}
```

2. Maximumsfunktion

$$\textbf{max} : \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \to \mathbb{Z}$$

$$\textbf{max}(x, y) = \begin{cases} x & x \geq y \\ y & \text{sonst} \end{cases}$$

Java:

```
int max(int x, int y) {
    if (x >= y) return x
    else return y;
}
```

Haskell:

```
maxi :: (Int, Int) -> Int
maxi(x,y) | x >= y     = x
          | otherwise = y

maxi(x, y) = if x >= y then x else y
```

3. Kreisfunktion

kreis $:[0, 2\pi] \to [-1, 1] \times [-1, 1]$
$x \mapsto (cos(x), sin(x))$

3. Kreisfunktion

kreis $:[0, 2\pi] \to [-1, 1] \times [-1, 1]$
$x \mapsto (cos(x), sin(x))$

Java:

```
class Kreis {
  float a;
  float b;

  Kreis kreisfunktion(float x) {
    Kreis k = new Kreis();
    k.a = Math.cos(x);
    k.b = Math.sin(x);
    return k;}
```

3. Kreisfunktion

kreis $:[0, 2\pi] \to [-1, 1] \times [-1, 1]$
$x \mapsto (cos(x), sin(x))$

Java:

```
class Kreis {
  float a;
  float b;

  Kreis kreisfunktion(float x) {
    Kreis k = new Kreis();
    k.a = Math.cos(x);
    k.b = Math.sin(x);
    return k;}
```

Haskell:

```
kreis :: Float -> (Float,Float)
kreis(x) = (cos(x), sin(x))
```

4. Vektorarithmetik

$$\mathbf{f} : \mathbf{VR}(\mathbb{R}) \times \mathbf{VR}(\mathbb{R}) \times (\mathbb{R} \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}) \to \mathbf{VR}(\mathbb{R})$$
$$((v_1, \ldots, v_n), (v'_1, \ldots, v'_n), \oplus) \mapsto ((v_1 \oplus v'_1), \ldots, (v_n \oplus v'_n))$$

4. Vektorarithmetik (Java)

```
interface Arth {
    Double verkn (Double x, Double y);
}

class Vektorarithmetik extends Vector<Double> {

  Vektorarithmetik f (Vektorarithmetik v, Arth a) {
    Vektorarithmetik ret = new Vektorarithmetik();
    for (int i=0;i<v.size();i++) {
      ret.setElementAt(a.verkn(this.elementAt(i),
                               v.elementAt(i)), i);
    }
    return ret;
  }
}
```

```
class Add implements Arth {
  public Double verkn (Double x, Double y) {
    return x + y;
  }
}

class Sub implements Arth {
  public Double verkn (Double x, Double y) {
    return x - y;
  }
}
```

```
class Main {
  public static void main(String[] args) {
    Vektorarithmetik v1 = new Vektorarithmetik();
    v1.addElement(1.0);v1.addElement(2.0);
    Vektorarithmetik v2 = new Vektorarithmetik();
    v2.addElement(3.0);v2.addElement(4.0);
    Add add = new Add();
    Sub sub = new Sub();
    System.out.println(v1.f(v2, add));
    System.out.println(v1.f(v2, sub));
  }
}
```

Java 8

```
class Main {
  public static void main(String[] args) {
    Vektorarithmetik v1 = new Vektorarithmetik();
    v1.addElement(1.0);v1.addElement(2.0);
    Vektorarithmetik v2 = new Vektorarithmetik();
    v2.addElement(3.0);v2.addElement(4.0);

    //nicht mehr notwendig
    //Add add = new Add();
    //Sub sub = new Sub();
    //System.out.println(v1.f(v2, add));
    //System.out.println(v1.f(v2, sub));

    //Lambda-Expressions
    System.out.println(v1.f(v2, (x,y) -> x+y));
    System.out.println(v1.f(v2, (x,y) -> x-y));
  }
}
```

4. Vektorarithmetik (Haskell)

```
f :: ([Int], [Int], ((Int, Int) -> Int)) -> [Int]
```

4. Vektorarithmetik (Haskell)

```
f :: ([Int], [Int], ((Int, Int) -> Int)) -> [Int]
```

```
f([], y, g) = []
f((v : vs), (w : ws), g) = (g(v,w)) : (f (vs, ws, g))
```

5. Addition einer Konstanten

$$\begin{aligned}&\mathbf{addn} : \mathbb{N} \to (\mathbb{N} \to \mathbb{N})\\ &n \mapsto (x \mapsto x + n)\end{aligned}$$

5. Addition einer Konstanten (bis Java–7)

```
class addn {
  int n;

  addn(int n) {
    this.n = n;
  }

  static addn add1(int n) {
    return new addn(n);
  }

  int add2(int x) {
    return n + x;
  }
```

```
  public static void main(String[] args) {
      System.out.println(add1(5).n);
      System.out.println(add1(5).add2(4));
  }
}
```

5. Addition einer Konstanten (Java–8)

```
interface Fun1<A,R> {
    R apply(A arg);
}
```

```
class Main {

    Fun1<Integer, Integer> addn(int n) {
        return x -> x + n;
    }
}
```

5. Addition einer Konstanten (Haskell)

```
addn :: Int -> (Int -> Int)
addn(n) = \x -> x + n
```

Grundlegende Eigenschaften Funktionaler Sprachen

1. Keine Seiteneffekte

Wird eine Funktion mehrfach auf das gleiche Argument angewandt, so erhält man **IMMER** das gleiche Ergebnis.

Grundlegende Eigenschaften Funktionaler Sprachen

2. Verzögerte Auswertung

```
f(x) = f(x)   (* rekursiver Ausruf *)

g(x, y) = y+1
```

Grundlegende Eigenschaften Funktionaler Sprachen

2. Verzögerte Auswertung

```
f(x) = f(x)   (* rekursiver Ausruf *)

g(x, y) = y+1
```

Was passiert beim Aufruf

```
g(f(2), 2)
```

Grundlegende Eigenschaften Funktionaler Sprachen

3. Polymorphes Typsystem

```
datatype Folge(A);

sorts A, Folge;

constructors
        empty:   → Folge;
        cons : A × Folge → Folge;
operations
        head : Folge → A;
        tail : Folge → Folge;
        is_empty: Folge → Boolean;
        cat: Folge × Folge → Folge;
        len: Folge → N;
```

Grundlegende Eigenschaften Funktionaler Sprachen

4. Automatische Speicherverwaltung

Die Programmierung von Speicherverwaltung entfällt. Die Speicher–Allocation und Konstruktion von Datenobjekten und die Freigabe von Speicherplatz (garbage–collection) geschieht ohne Einwirkung des Programmierers.

Grundlegende Eigenschaften Funktionaler Sprachen

5. Funktionen als Bürger 1. Klasse

Funktionen können sowohl als Argumente als auch als Rückgabewerte von Funktionen verwendet werden. (Vgl. Beispiele *Vektorarithmetik* und *Addition einer Konstanten*)

Deklarationen von Funktionen in Haskell

Def. und Wertebereich

```
vars    -> var_1 , ..., var_n
fundecl -> vars :: type

type  -> btype [-> type]       (function type)
btype-> [btype] atype         (type application)
atype-> qtycon
      | tyvar
      | "(" type_1,..., type_k ")" (tuple type, k>=2)
      | "[" type "]"              (list type)
      | "(" type ")"              (parenthesized
                                   constructor)
```

(Haskell-Grammatik: https://www.haskell.org/onlinereport/syntax-iso.html)

Beispiele:

```
square:: int -> int

maxi:: (int, int) -> int
```

Deklarationen von Funktionen in Haskell

Abbildungsvorschrift

```
fundecl   -> funlhs rhs

funlhs    -> var apat { apat }

apat      -> var [@ apat]              (as pattern)
          | literal
          | _                        (wildcard)
          | "(" pat ")"              (parenthesized pattern)
          | "(" pat1, ... , patk ")" (tuple pattern, k>=2)
          | "[" pat1, ... , patk "]" (list pattern, k>=1)

rhs       -> = exp
          | guardrhs

guardrhs -> gd = exp [gdrhs]
gd        -> "|" exp
```

Deklarationen von Funktionen in Haskell

Expressions

```
expr—> \apat_1...apat_n —> expr (lambda abstraction,
                                 n>=1)
    | let decls in expr          (let expression)
    | if expr then expr else expr (conditional)
    | case expr of { alts }      (case expression)
    | do { stmts }               (do expression)
    | fexp
fexp —> [fexp] aexp              (function application)

alts —> alt_1 ; ... ; alt_n      (n>=1)
alt  —> pat —> expr
```

```
aexp –> qvar                (variable)
     |  gcon                (general constructor)
     |  literal
     |  "(" expr ")"        (parenthesized expression)
     |  "(" expr_1, ... , expr_k ")" (tuple, k>=2)
     |  "[" expr_1, ... , expr_k "]" (list, k>=1)

literal –> integer | float | char | string
```

Beispiele:

```
square x = x^2
```

Beispiele:

```
square x = x^2
```

1. Variante:

```
maxi(x,y) = if x > y then x else y
```

2. Variante (guarded equations):

```
maxi(x,y) | x > y     = x
          | otherwise = y
```

Pattern–Matching

Vordefinierter Typ [a]

`[]` steht für leere Liste

`:` steht für den Listenkonstruktor

```
head :: [a] -> a
tail :: [a] -> [a]

head(x : xs) = x
tail(x : xs) = xs
```

Pattern–Matching

Vordefinierter Typ [a]

`[]` steht für leere Liste

`:` steht für den Listenkonstruktor

```
head :: [a] -> a
tail :: [a] -> [a]

head(x : xs) = x
tail(x : xs) = xs
```

Pattern-Matching

```
head(1 : 2 : 3 : 4 : []) = 1
tail(1 : 2 : 3 : 4 : []) = 2 : 3 : 4 : []
```

let/where–Kostrukte

```
len: [a] -> int
len(x) = let
           len0([], n) = n
           len0(x:xs, n) = len0(xs, n+1)
         in
           len0(x, 0)
```

let/where–Kostrukte

```
len: [a] -> int
len(x) = let
           len0([], n) = n
           len0(x:xs, n) = len0(xs, n+1)
         in
           len0(x, 0)
```

```
len(x) = len0(x, 0)
         where len0([], n) = n
               len0(x:xs, n)
                          = len0(xs, n+1)
```

Namenlose Funktionen

```
addn :: Int -> (Int -> Int)
addn n = \x -> x+n
```

Datentypen

Abkürzungen mit `type`

```
type String = [Char]
type Floatpair = (float, float)
```

Datentypen

Algebraische Datentypen

```
datadecl    -> data [context =>] simpletype
               = constrs [deriving]

simpletype -> tycon tyvar_1 ... tyvar_k   (k>=0)

constrs     -> constr_1 | ... | constr_n   (n>=1)
constr      -> con [!] atype_1 ... [!] atype_k (arity con = k,
                                                k>=0)
            |  con { fielddecl_1 , ... , fielddecl_n } (n>=0)

fielddecl   -> vars :: (type | ! atype)

deriving    -> deriving (dclass |
                         (dclass_1, ... , dclass_n))   (n>=0)
```

Beispiel:

```
data Folge a = Empty
             | Cons (a , Folge a)
```

$T_{\texttt{FolgeInt}} =$

$\{$ `Empty`, `Cons(1, Empty)`, , `Cons(1, Cons(1, Empty))`, , ...$\}$

`Cons(2, Empty)`, `Cons(1, Cons(2, Empty))`,

`Cons(3, Empty)`, `Cons(1, Cons(3, Empty))`,

... ...

head und tail über dem Datentyp Folge

```
head :: Folge(a) -> a
tail :: Folge(a) -> Folge(a)

head(Cons(x, xs)) = x

tail(Cons(x, xs)) = xs
```

Pattern–Matching:

```
head( Cons( 1, Cons( 2, Empty ) ) ) = 1

tail( Cons( 1, Cons( 2, Empty ) ) ) = Cons( 2, Empty )
```

Funktionen höherer Ordnung

Funktion als Argument:

$$(\tau \to \tau') \to \tau''$$

Funktion als Ergebnis:

$$\tau' \to (\tau' \to \tau'')$$

Currying

Satz: Sei $f : (\tau_1, \ldots, \tau_n) \to \tau$ eine Funktion mit $f(\, a_1, \ldots, a_n \,) = a$. Dann gibt es genau eine Funktion

$$f' : \tau_1 \to (\tau_2 \to (\ldots (\tau_n \to \tau) \ldots)$$

mit für alle a_i, a

$$(\ldots (((f' a_1)\ a_2)\ a_3)\ \ldots\ a_n) = a.$$

Currying Beispiel

```
curry :: ((a,b) -> c) -> (a -> (b -> c))
curry f = \x -> (\y -> f(x,y))
```

Currying Beispiel

```
curry :: ((a,b) -> c) -> (a -> (b -> c))
curry f = \x -> (\y -> f(x,y))
```

```
uncurry ::  (a -> (b -> c)) -> ((a,b) -> c)
uncurry f = \(x, y) -> ((f x) y)
```

Konventionen

Für

$$\tau_1 \to (\tau_2 \to (\tau_3 \to \ldots \tau_n)\ldots)$$

schreibt man

$$\tau_1 \to \tau_2 \to \tau_3 \to \ldots \tau_n.$$

Konventionen

Für

$$\tau_1 \to (\tau_2 \to (\tau_3 \to \ldots \tau_n)\ldots)$$

schreibt man

$$\tau_1 \to \tau_2 \to \tau_3 \to \ldots \tau_n.$$

Für

$$(\ldots(((f(\,a_1\,))(\,a_2\,)\,)(\,a_3\,)\,)\ldots)(\,a_n\,)$$

schreibt man

$$f\ a_1\ a_2\ a_3\ \ldots\ a_n.$$

map

```
map :: (a -> b) -> ([a] -> [b])
```

map

```
map :: (a -> b) -> ([a] -> [b])

map f [] = []
map f (x : xs) = (f x) : (map f xs)
```

Bsp.:

```
square :: int -> int
square x = x*x

qu :: int -> int
qu x = x * x * x
```

Bsp.:

```
square :: int -> int
square x = x*x

qu :: int -> int
qu x = x * x * x


sqlist :: [int] -> [int]
sqlist li = map square li

qulist :: [int] -> [int]
qulist li = map qu li
```

fold

Gegeben: $[a_1, \ldots, a_n]$

Verknüpfung:

rechtsassoziativ:

$$a_1 \oplus (a_2 \oplus (\ldots (a_{n-1} \oplus a_n) \ldots))$$

fold

Gegeben: $[a_1, \ldots, a_n]$

Verknüpfung:

rechtsassoziativ:

$$a_1 \oplus (a_2 \oplus (\ldots (a_{n-1} \oplus a_n) \ldots))$$

linksassoziativ:

$$(\ldots ((a_1 \oplus a_2) \oplus a_3) \ldots \oplus a_n$$

foldr

```
foldr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> b
```

foldr

```
foldr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> b
```

```
foldr f e []       = e
foldr f e (x : xs) = f x (foldr f e xs)
```

foldl

```
foldl :: (b -> a -> b) -> b -> [a] -> b
```

foldl

```
foldl :: (b -> a -> b) -> b -> [a] -> b
```

```
foldl f e []       = e
foldl f e (x : xs) = foldl f (f e x) xs
```

fold Beispiele

```
sum, prod :: [int] -> int

sum = foldr (+) 0
prod = foldl (*) 1
```

fold Beispiele

```
sum, prod :: [int] -> int

sum = foldr (+) 0
prod = foldl (*) 1
```

```
foldr (^) 1 [4,3,2]  =  ?
foldl (^) 1 [4,3,2]  =  ?
```

fold Beispiele

```
sum, prod :: [int] -> int

sum = foldr (+) 0
prod = foldl (*) 1
```

```
foldr (^) 1 [4,3,2]  =  262144
foldl (^) 1 [4,3,2]  =  1
```

I/O über die Konsole

```
main = do
     putStrLn "Hallo! Wie heissen Sie? "
     inpStr <- getLine
     putStrLn $ "Willkommen bei Haskell, " ++
            inpStr ++ "!"
```

I/O über die Konsole

```
main = do
     putStrLn "Hallo! Wie heissen Sie? "
     inpStr <- getLine
     putStrLn $ "Willkommen bei Haskell, " ++
            inpStr ++ "!"
```

Ausführen

```
pl@martin-pluemickes-macbook.local% runhaskell IO.hs
Hallo! Wie heissen Sie?
Martin
Willkommen bei Haskell. Martin!
```

Das Modul System I/O

```
openeFile :: FilePath -> IO Mode -> IO Handle
hgetChar  :: Handle -> IO Char
hgetLine  :: Handle -> IO String
hIsEOF    :: Handle -> IO Bool
hPutStr   :: Handle -> String -> IO ()
hPutStrLn :: Handle -> String -> IO ()
hClose    :: Handle -> IO()
```

File–Handling

```
import System.IO
import Data.Char(toUpper)

main = do
       inh <- openFile "input.txt" ReadMode
       outh <- openFile "output.txt" WriteMode
       mainloop inh outh
       hClose inh
       hClose outh
```

File–Handling II

```
mainloop :: Handle -> Handle -> IO ()
mainloop inh outh =
          do ineof <- hIsEOF inh
             if ineof then return ()
                else do inpStr <- hGetLine inh
                        hPutStrLn outh (map toUpper inpStr)
                        mainloop inh outh
```

Stdin/Stdout

```
import System.IO
import Data.Char(toUpper)

main = mainloop stdin stdout

mainloop :: Handle -> Handle -> IO ()
mainloop inh outh =
         do ineof <- hIsEOF inh
            if ineof then return ()
               else do inpChar <- hGetChar inh
                       hPutChar outh inpChar
                       mainloop inh outh
```