

Programmierung in Haskell

Prof. Dr. David Sabel

LFE Theoretische Informatik



- 1 Eine kurze Einführung in Haskell
- 2 I/O in Haskell
 - Einleitung
 - Monadisches IO
 - Verzögern in der IO-Monade
 - Speicherplätze

Ideen der funktionalen Programmiersprachen:

- Programme bestehen **nur aus Funktionen** (keine Prozeduren, Methoden, usw.)
- Ersetze imperative Konstrukte (vor allem Schleifen) durch Rekursion
- Bei **puren** funktionalen Programmiersprachen: Funktionen sind im **engen mathematischen Sinn** zu sehen, als Abbildung von Werten auf Werte

Funktionale Programmiersprachen (2)

- **Seiteneffekte verboten:** Funktionen angewendet auf Argumente produzieren einen Wert, dabei gibt es keine (sichtbare) Speicheränderungen oder ähnlich
- **Referentielle Transparenz:** Gleiche Werte angewendet auf gleiche Funktion, liefert immer das gleiche Ergebnis

Funktionale Programmiersprachen (2)

- **Seiteneffekte verboten**: Funktionen angewendet auf Argumente produzieren einen Wert, dabei gibt es keine (sichtbare) Speicheränderungen oder ähnlich
- **Referentielle Transparenz**: Gleiche Werte angewendet auf gleiche Funktion, liefert immer das gleiche Ergebnis
- insbesondere **keine Zuweisung**: Variablen in funktionalen Programmiersprachen stehen für feste Werte, nicht für veränderliche Objekte

Funktionale Programmiersprachen (3)

- Programmieren = Schreiben von Funktionen
- Ausführung der Programme:
 - imperative Sprachen: Abarbeiten einer **Befehlsfolge**
 - bei funktionalen Sprachen: **Auswertung von Ausdrücken**
- Resultat: Wert des Ausdrucks

Funktionale Programmiersprachen (3)

- Programmieren = Schreiben von Funktionen
- Ausführung der Programme:
imperative Sprachen: Abarbeiten einer **Befehlsfolge**
bei funktionalen Sprachen: **Auswertung von Ausdrücken**
- Resultat: Wert des Ausdrucks

Beispiel: Berechne Quadratzahl

- Programmieren: `quadrat x = x * x`
- Ausführen: Werte `quadrat 5` aus

`quadrat 5` \rightarrow $5 * 5$ \rightarrow 25

- Resultat: 25

Funktionale Programmiersprachen (3)

- Modulare Programmierung: Einzelne Funktionalitäten in Funktionen auslagern
- Erstellen von größeren Funktionalitäten durch **Komposition** von Funktionen
- Beispiel:

```
quadriereUndVerdopple x = verdopple (quadrat x)
```

äquivalent dazu:

```
quadriereUndVerdopple = verdopple . quadrat
```


Haskell – Ein wenig Syntax

- Funktionsargumente werden “curried” geschrieben: Statt

`f(x,y) = x*y`

schreibt man in Haskell

`f x y = x * y`

- Pattern-matching: Definition von Funktionen fallweise, Abarbeitung von oben nach unten, z.B.

`fakultaet 0 = 1`

`fakultaet x = x*(fakultaet (x-1))`

Haskell – Ein wenig Syntax (2)

Anonyme-Funktionen: Lambda-Notation

Beispiele:

- `\x -> x` entspricht der Identitätsfunktion (`id x = x`)
- `\x y -> x` entspricht der `const`-Funktion (`const x y = x`)
- `\x -> x*x` entspricht der quadrat-Funktion

Vorteil:

- Man kann Funktionen “in-place” definieren und verwenden
- Bsp.: `quadriereUndVerdopple = (\x -> x+x) . (\y -> y*y)`

Haskell – Ein wenig Syntax (3)

Einige primitive und vordefinierte Datentypen

- Zahlen: Int, Integer (beliebig groß), Float, Double, etc.
- Boolesche Werte: True, False
- Tupel: (True,5,False) usw.

Einige Konstrukte:

- `if` Ausdruck `then` Ausdruck `else` Ausdruck
- `let` $f_1 x_{1,1} \dots x_{1,m} = \text{Expr}_1$
 \dots
 $f_n x_{n,1} \dots x_{n,m} = \text{Expr}_n$
in Expr
- Nachgestelltes `let` (ungefähr):
 where $f_1 x_{1,1} \dots x_{1,m} = \text{Expr}$
- Operationen: +, -, *, /, ==, <=, >=, <, >, /=

Auswertung in Haskell

Haskell wertet **verzögert** (nicht-strikt, lazy, call-by-need) aus:

Funktionsanwendung:

Argumente werden vor der Einsetzung **nicht** ausgewertet

Prinzip:

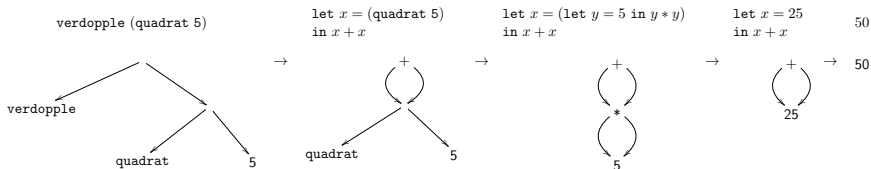
Werte erst aus, wenn Wert benötigt wird

Beispiel: `verdopple x = x + x`
`quadrat x = x * x`

nicht-strikte Auswertung (Haskell)	strikte Auswertung
<code>verdopple (quadrat 5)</code>	<code>verdopple (quadrat 5)</code>
<code>→ (quadrat 5) + (quadrat 5)</code>	<code>→ verdopple (5 * 5)</code>
<code>→ (5 * 5) + (quadrat 5)</code>	<code>→ verdopple 25</code>
<code>→ 25 + (quadrat 5)</code>	<code>→ 25 + 25</code>
<code>→ 25 + (5 * 5)</code>	<code>→ 50</code>
<code>→ 25 + 25</code>	
<code>→ 50</code>	

Auswertung in Haskell (2)

In Realität: Keine Einsetzung, sondern sharing:



Vorteil der call-by-need Auswertung:

- Aufrufe terminieren häufiger

`const x y` = `x`

`loop x` = `x + loop x`

Call-by-need Auswertung:

`const 5 (loop 3)` → 5

Strikte Auswertung:

`const 5 (loop 3)` → `const 5 (3 + loop 3)` → `const 5(3 + (3 + loop 3))` → ...

- Umgang mit unendlichen Datenstrukturen funktioniert (später)

Higher-Order Functions

- Funktionen sind ganz normale **Werte**
- Funktionen können **Parameter** anderer Funktion sein
- Funktionen können **Ergebnisse** von Funktionsanwendungen sein

Beispiele

- Umdrehen der Argumente einer Funktion:

```
flip f a b = f b a
```

- Funktionsionskomposition:

```
(.) f g x = f (g x)
```

Haskell ist stark, statisch, polymorph getypt

- stark: jeder Ausdruck hat einen Typ
- statisch: Zur **Compilezeit** kann Typcheck durchgeführt werden, keine Typfehler zur Laufzeit
- polymorph: Typen können Typvariablen enthalten (Funktionen können einen schematischen Typ haben)
- Typen können vom Compiler hergeleitet werden, müssen also nicht angegeben werden

Beispiele:

```
quadrat :: Int -> Int -> Int
const  :: a -> b -> a
(.)   :: (b -> c) -> (a -> b) -> a -> c
flip  :: (a -> b -> c) -> b -> a -> c
```


Rekursive Datenstrukturen: Listen

Listen werden konstruiert mit

- `[]` = "Nil" = leere Liste
- `:` = 'Cons', Listenkonstruktor

Typ von Cons: $(:) :: a \rightarrow [a] \rightarrow [a]$

- Syntaktischer Zucker: `[1,2,3] = 1:(2:(3:[]))`
- Pattern-matching wird benutzt um Listen zu zerlegen.

Beispiele:

```
tail [] = []
```

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

```
head [] = error "empty list"
```

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

Listen: Beispiel

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

```
filter p [] = []  
filter p (x:xs) = if p x then  
                  x:(filter p xs)  
                  else (filter p xs)
```

Beispielverwendungen

```
map (*4) [1,2,3,4] ergibt [4,8,12,16]
```

```
filter even [1,2,3,4,5] ergibt [2,4]
```

Unendliche Listen

```
repeat x = x:(repeat x)
```

```
repeat 1 ergibt [1,1,1,1,1,1,.....
```

Aber (wegen nicht-strikter Auswertung)

```
head (repeat 1)   wertet aus zu   1
```

Noch ein paar Listenfunktionen

```
[] ++ ys = ys  
(x:xs) ++ ys = x:(xs ++ ys)
```

```
reverse [] = []  
reverse (x:xs) = (reverse xs) ++ x
```

```
concat [] = []  
concat (xs:xxs) = xs ++ concat xxs
```

```
take 0 _ = []  
take i [] = []  
take i (x:xs) = x:(take (i-1) xs)
```

List comprehensions

Mengenausdrücke, die Listen beschreiben (generieren)

- $\{x^2 \mid x \in \mathbb{N}, x > 5, \text{gerade } x\}$

als List comprehension

```
[x^2 | x <- [1..], x > 4, even x]
```

Test: `take 10 [x^2 | x <- [1..], x > 4, even x]`
`[36,64,100,144,196,256,324,400,484,576]`

- $\{(x, y) \mid x \in \{1, 2, 3, 4, 5\}, y \in \{A, B, C\}\}$

als List comprehension

```
[(x,y) | x <- [1,2,3,4,5], y <- ['A','B','C']]
```

ergibt

```
[(1,'A'),(1,'B'),(1,'C'),(2,'A'),(2,'B'),(2,'C'),(3,'A'),  
(3,'B'),(3,'C'),(4,'A'),(4,'B'),(4,'C'),(5,'A'),(5,'B'),(5,'C')]
```

Selbst definierte Datentypen

Aufzählungstypen

```
data Bool      = True | False
```

```
data RGB       = Rot | Gruen | Blau
```

Pattern-Matching zum Selektieren

```
zeigeAn :: RGB -> String
zeigeAn Rot    = "Farbe Rot"
zeigeAn Gruen  = "Farbe Gr\"un"
zeigeAn Blau   = "Farbe Blau"
```

```
isGruen :: RGB -> Bool
istGruen Gruen = True
istGruen _     = False
```

Selbst definierte Datentypen (2)

Polymorphe Datentypen

```
data Maybe a    = Nothing | Just a
```

```
data Either a b = Left a | Right b
```

```
lookup :: a -> [(a,b)] -> Maybe b
```

```
lookup x []           = Nothing
```

```
lookup x ((y,z):ys) =  
  if x == y then Just z  
  else lookup x ys
```

Selbst definierte Datentypen (3)

Rekursive Datentypen

```
data IntBaum    = Blatt Int | Knoten Int IntBaum Intbaum
```

```
data PolyBaum a = Blatt a  
                | Knoten a (PolyBaum a) (PolyBaum a)
```

```
data List a     = Nil | Cons a (List a)
```

Beispiel:

```
mapBaum :: (a -> b) -> PolyBaum a -> PolyBaum b  
mapBaum f (Blatt x)                = Blatt (f x)  
mapBaum f (Knoten x bauml baumr) =  
  Knoten (f x) (mapBaum f bauml) (mapBaum f baumr)
```


Typsynonyme

```
type Koordinate = (Int,Int)
type IntBaum    = PolyBaum Int
type MeineListe a = [a]
```

- Zur Überladung von Operatoren, z.B. (+), (==) für verschiedene Typen
- Beispiele

`(+) :: (Num a) => a -> a -> a`

`lookup :: (Eq a) => a -> [(a, b)] -> Maybe b`

`show :: (Show a) => a -> String`

Ein- und Ausgabe in Haskell

Problematik

Echte Seiteneffekte sind in Haskell nicht erlaubt.

Warum?

Problematik

Echte Seiteneffekte sind in Haskell nicht erlaubt.

Warum?

Annahme: `getZahl` wäre eine "Funktion", die eine Zahl von der Standardeingabe liest

Echte Seiteneffekte sind in Haskell nicht erlaubt.

Warum?

Annahme: `getZahl` wäre eine “Funktion”, die eine Zahl von der Standardeingabe liest

- Referentielle Transparenz ist verletzt, da `getZahl` je nach Ablauf unterschiedliche Werte liefert.

Echte Seiteneffekte sind in Haskell nicht erlaubt.

Warum?

Annahme: `getZahl` wäre eine “Funktion”, die eine Zahl von der Standardeingabe liest

- Referentielle Transparenz ist verletzt, da `getZahl` je nach Ablauf unterschiedliche Werte liefert.
- Gelten noch mathematische Gleichheiten wie $e + e = 2 * e$?

Echte Seiteneffekte sind in Haskell nicht erlaubt.

Warum?

Annahme: `getZahl` wäre eine “Funktion”, die eine Zahl von der Standardeingabe liest

- Referentielle Transparenz ist verletzt, da `getZahl` je nach Ablauf unterschiedliche Werte liefert.
- Gelten noch mathematische Gleichheiten wie $e + e = 2 * e$?
Nicht für $e = \text{getZahl}$!

Echte Seiteneffekte sind in Haskell nicht erlaubt.

Warum?

Annahme: `getZahl` wäre eine "Funktion", die eine Zahl von der Standardeingabe liest

- Referentielle Transparenz ist verletzt, da `getZahl` je nach Ablauf unterschiedliche Werte liefert.
- Gelten noch mathematische Gleichheiten wie $e + e = 2 * e$?
Nicht für $e = \text{getZahl}$!
- `length[getZahl, getZahl]` fragt nach gar keiner Zahl?

```
length [] = 0
```

```
length ( _:xs ) = 1 + length xs
```

Echte Seiteneffekte sind in Haskell nicht erlaubt.

Warum?

Annahme: `getZahl` wäre eine "Funktion", die eine Zahl von der Standardeingabe liest

- Referentielle Transparenz ist verletzt, da `getZahl` je nach Ablauf unterschiedliche Werte liefert.
- Gelten noch mathematische Gleichheiten wie $e + e = 2 * e$?
Nicht für $e = \text{getZahl!}$
- `length[getZahl, getZahl]` fragt nach gar keiner Zahl?
 $\text{length } [] = 0$
 $\text{length } (.:xs) = 1 + \text{length } xs$
- Festlegung auf eine genaue Auswertungsreihenfolge nötig.
(Verhindert Optimierungen + Parallelisierung)

Kapselung des I/O

- Datentyp `IO a`
- Wert des Typs `IO a` ist eine **I/O-Aktion**, die beim Ausführen Ein-/Ausgabe durchführt und anschließend einen Wert vom Typ `a` liefert.

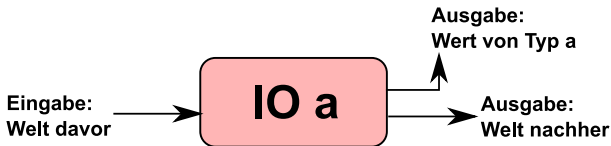
Kapselung des I/O

- Datentyp `IO a`
- Wert des Typs `IO a` ist eine **I/O-Aktion**, die beim Ausführen Ein-/Ausgabe durchführt und anschließend einen Wert vom Typ `a` liefert.
- Programmierer in Haskell I/O-Aktionen, Ausführung quasi **außerhalb** von Haskell

Monadisches I/O (2)

Vorstellung:

```
type IO a = Welt -> (a, Welt)
```

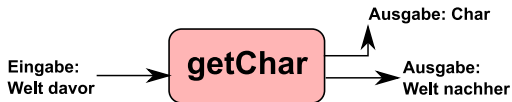


Monadisches I/O (3)

- Werte vom Typ `IO a` sind **Werte**, d.h. sie können nicht weiter ausgewertet werden
- Sie können allerdings **ausgeführt** werden (als Aktion)
- In der Vorstellung: erst dann wenn eine Welt reingesteckt wird

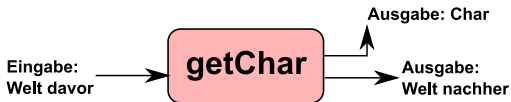
Primitive I/O-Operationen

`getChar :: IO Char`

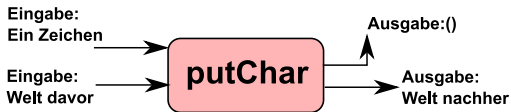


Primitive I/O-Operationen

`getChar :: IO Char`

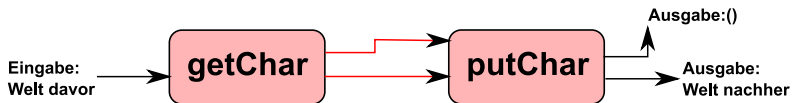


`putChar :: Char -> IO ()`



I/O Aktionen programmieren

- Man braucht Operationen, um I/O Operationen miteinander zu kombinieren!
- Z.B. erst ein Zeichen lesen (`getChar`), danach dieses Zeichen ausgeben (`putChar`)



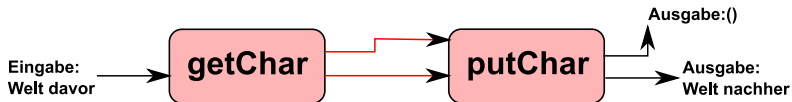
I/O Aktionen komponieren

Der `>>=` Operator (gesprochen: “bind”)

```
(>>=) :: IO a -> (a -> IO b) -> IO b
```

```
echo :: IO ()
```

```
echo = getChar >>= putChar
```



I/O Aktionen komponieren (3)

Der >> Operator (gesprochen: “then”)

```
(>>) :: IO a -> IO b -> IO b
```

Kann mit >>= definiert werden:

```
(>>) :: IO a -> IO b -> IO b
```

```
(>>) akt1 akt2 = akt1 >>= \_ -> akt2
```

I/O Aktionen komponieren (4)

Gelesenes Zeichen zweimal ausdrucken

```
echoDup :: IO ()  
echoDup = getChar >>= (\x -> putChar x >> putChar x)
```

I/O Aktionen komponieren (5)

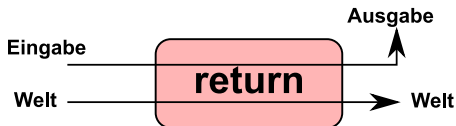
Neue I/O-Aktionen bauen, die zwei Zeichen liest und als Paar zurück liefert

```
getTwoChars :: IO (Char,Char)
getTwoChars = getChar >>= \x ->
              getChar >>= \y ->
              ???
```

I/O Aktionen komponieren (5)

Neue I/O-Aktionen bauen, die zwei Zeichen liest und als Paar zurück liefert

```
getTwoChars :: IO (Char,Char)
getTwoChars = getChar >>= \x ->
              getChar >>= \y ->
              return (x,y)
```



I/O Aktionen komponieren (6)

Syntaktischer Zucker: **do**-Notation:

```
getTwoChars :: IO (Char,Char)
getTwoChars =
    getChar >>= \x ->
    getChar >>= \y ->
    return (x,y)
```

```
getTwoChars :: IO (Char,Char)
getTwoChars = do
    x <- getChar;
    y <- getChar;
    return (x,y)
```

do-Notation weg transformieren

do-Notation kann in `>>=` übersetzt werden:

```
do { x<-e; s } = e >>= \x -> do { s }
do { e; s }    = e >> do { s }
do { e }       = e
```

Ausreichend

`>>=` und `return`

Wir lassen in der `do`-Notation, die geschweiften Klammern und ; weg.

(Der Parser fügt sie automatisch, bei richtiger Einrückung ein)

Eine Zeile einlesen

```
getLine :: IO [Char]
getLine = do c <- getChar;
             if c == '\n' then
               return []
             else
               do
                 cs <- getLine
                 return (c:cs)
```

Eine Monade besteht aus einem Typkonstruktor M und zwei Operationen:

```
(>>=)  :: M a -> (a -> M b) -> M b  
return :: a -> M a
```

wobei zusätzlich 3 Gesetze gelten müssen.

$$(1) \quad \text{return } x \gg= f \quad = f \ x$$

$$(2) \quad m \gg= \text{return} \quad = m$$

$$(3) \quad m1 \gg= (\backslash x \rightarrow m2 \gg= (\backslash y \rightarrow m3)) \\ =$$

$$(m1 \gg= (\backslash x \rightarrow m2)) \gg= (\backslash y \rightarrow m3)$$

- Man kann nachweisen, dass $M = IO$ mit $\gg=$ und return eine Monade ist.
- Monade erzwingt Sequentialisierung ("I/O ist richtig implementiert")

Monadisches I/O: Anmerkungen

- Beachte: Es gibt keinen Weg aus der IO-Monade heraus
- Aus I/O-Aktionen können nur I/O-Aktionen zusammengesetzt werden
- Keine Funktion vom Typ `IO a -> a!`

Monadisches I/O: Anmerkungen

- Beachte: Es gibt keinen Weg aus der IO-Monade heraus
- Aus I/O-Aktionen können nur I/O-Aktionen zusammengesetzt werden
- Keine Funktion vom Typ `IO a -> a!`
- Das ist nur die halbe Wahrheit!
- Wenn obiges gilt, funktioniert I/O sequentiell
- Aber: Man möchte auch “lazy I/O”
- Modell passt dann eigentlich nicht mehr

Beispiel: readFile

readFile: Liest den Dateiinhalt aus

– explizit mit **Handles** (= erweiterte Dateizeiger)

```
-- openFile :: FilePath -> IOMode -> IO Handle
```

```
-- hGetChar :: Handle -> IO Char
```

```
readFile :: FilePath -> IO String
```

```
readFile path =
```

```
  do
```

```
    handle <- openFile path ReadMode
```

```
    inhalt <- leseHandleAus handle
```

```
    return inhalt
```

Beispiel: readFile (2)

Handle auslesen: Erster Versuch

```
leseHandleAus handle =
  do
    ende <- hIsEOF handle
    if ende then hClose handle >> return []
    else
      do
        c <- hGetChar handle
        cs <- leseHandleAus handle
        return (c:cs)
```

Beispiel: readFile (2)

Handle auslesen: Erster Versuch

```
leseHandleAus handle =
  do
    ende <- hIsEOF handle
    if ende then hClose handle >> return []
    else
      do
        c <- hGetChar handle
        cs <- leseHandleAus handle
        return (c:cs)
```

Ineffizient: **Komplette** Datei wird gelesen, **bevor** etwas zurück gegeben wird.

Beispiel: readFile (2)

Handle auslesen: Erster Versuch

```
leseHandleAus handle =  
  do  
    ende <- hIsEOF handle  
    if ende then hClose handle >> return []  
    else  
      do  
        c <- hGetChar handle  
        cs <- leseHandleAus handle  
        return (c:cs)
```

Ineffizient: **Komplette** Datei wird gelesen, **bevor** etwas zurück gegeben wird.

```
*Main> readFile "LargeFile" >>= print . head  
'1'  
7.09 secs, 263542820 bytes
```

`unsafeInterleaveIO :: IO a -> IO a`

- bricht strenge Sequentialisierung auf
- gibt sofort etwas zurück **ohne** die Aktion auszuführen
- Aktion wird “by-need” ausgeführt: erst wenn die Ausgabe vom Typ `a` in `IO a` benötigt wird.
- nicht vereinbar mit “Welt”-Modell!

Handle auslesen: verzögert

```
leseHandleAus handle =  
  do  
    ende <- hIsEOF handle  
    if ende then hClose handle >> return []  
    else  
      do  
        c <- hGetChar handle  
        cs <- unsafeInterleaveIO (leseHandleAus handle)  
        return (c:cs)
```

Handle auslesen: verzögert

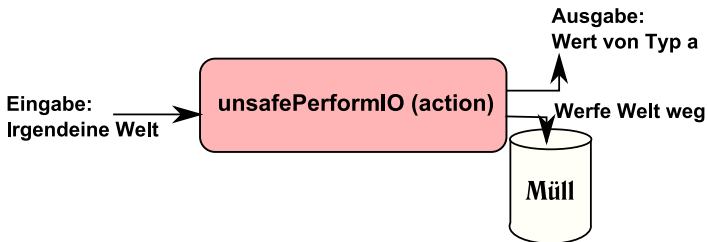
```
leseHandleAus handle =
  do
    ende <- hIsEOF handle
    if ende then hClose handle >> return []
    else
      do
        c <- hGetChar handle
        cs <- unsafeInterleaveIO (leseHandleAus handle)
        return (c:cs)
```

Test:

```
*Main> readFile1 "LargeFile" >>= print . head
'1'
(0.00 secs, 0 bytes)
```

UnsafePerformIO

- `unsafePerformIO :: IO a -> a`
- “knackt” die Monade



Implementierung von unsafeInterleaveIO

```
unsafeInterleaveIO :: IO a -> IO a  
unsafeInterleaveIO a = return (unsafePerformIO a)
```

- Führt Aktion direkt mit neuer Welt aus
- Neue Welt wird verworfen
- Das Ganze wird mit `return` wieder in die IO-Monade verpackt

Nützliche Kombinatoren für monadisches IO

(Die Typen der Funktionen in aktuellem Haskell sind allgemeiner)

`sequence :: [IO a] -> IO [a]`

führt Liste von IO-Aktionen nacheinander aus, liefert Liste der Ergebnisse

`sequence_ :: [IO a] -> IO ()`

führt Liste von IO-Aktionen nacheinander aus, verwirft Ergebnisse

`mapM :: (a -> IO b) -> [a] -> IO [b]`

`mapM f xs = sequence (map f xs)`

`mapM_ :: (a -> IO b) -> [a] -> IO ()`

`mapM_ f xs = sequence_ (map f xs)`

Veränderliche Speicherplätze

```
data IORef a -- Abstrakter Typ

newIORef    :: a -> IO (IORef a)
readIORef   :: IORef a -> IO a
writeIORef  :: IORef a -> a -> IO ()
```


Veränderliche Speicherplätze

```
data IORef a -- Abstrakter Typ

newIORef    :: a -> IO (IORef a)
readIORef   :: IORef a -> IO a
writeIORef  :: IORef a -> a -> IO ()
```

Imperativ (z.B. C):

```
int x := 0
x := x+1
```

Veränderliche Speicherplätze

```
data IORef a -- Abstrakter Typ

newIORef    :: a -> IO (IORef a)
readIORef   :: IORef a -> IO a
writeIORef  :: IORef a -> a -> IO ()
```

Imperativ (z.B. C): **In Haskell mit IORefs**

```
int x := 0           do
x := x+1             x <- newIORef 0
                    y <- readIORef x
                    writeIORef x (y+1)
```