

Heutige Themen

- **Teil 1:** Funktionen höherer Ordnung (*kurz:* Funktionale)
 - Funktionen als Argumente
 - Funktionen als Resultate
 - Spezialfall: Funktionale auf Listen
 - Anwendungen...und ihre Vorteile für die Programmierung.
- **Teil 2:** Ein- und Ausgabe
- **Teil 3:** Fehlerbehandlung

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

1

Teil 1: Funktionale

Funktionen, unter deren Argumenten oder Resultaten Funktionen sind, heißen *Funktionen höherer Ordnung* oder kurz *Funktionale*.

Mithin...

Funktionale sind spezielle Funktionen!

...also nichts Besonderes, oder?

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

2

Funktionale nichts Außergewöhnliches?

Im Grunde nicht...

Drei kanonische Beispiele aus Mathematik und Informatik:

- Mathematik: *Differential- und Integralrechnung*
 - $\frac{df(x)}{dx} \rightsquigarrow \text{diff } f \ a$
 - ...Ableitung von f an der Stelle a
 - $\int_a^b f(x)dx \rightsquigarrow \text{integral } f \ a \ b$
 - ...Integral von f zwischen a und b
- Informatik: *Semantik von Programmiersprachen*
 - Denotationelle Semantik der while-Schleife
 $S_{\text{while}} \llbracket \text{while } b \text{ do } s \text{ od} \rrbracket : \Sigma \rightarrow \Sigma$
 - ...kleinster Fixpunkt eines Funktionsals auf der Menge der Zustandstransformationen $[\Sigma \rightarrow \Sigma]$ über der Menge der Zustände Σ mit $\Sigma = \text{def}\{\sigma \mid \sigma \in [Var \rightarrow Data]\}$.
 - (Siehe z.B. VU 185.183 Theoretische Informatik 2)

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

4

Feststellung

Der systematische Umgang mit Funktionen höherer Ordnung... (Funktionen als "*first-class citizens*")

- ist charakteristisch für funktionale Programmierung
- hebt funktionale Programmierung von anderen Programmierparadigmen ab
- ist der Schlüssel zu extrem eleganten und ausdruckskräftigen Programmiermethoden

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

5

Ein Ausflug in die Philosophie...

Der Mensch wird erst durch Arbeit zum Menschen.

Georg W.F. Hegel (27.8.1770-14.11.1831)

Frei nach Hegel...

Funktionale Programmierung wird erst durch Funktionale zu funktionaler Programmierung!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

6

Des Pudels Kern

...bei Funktionalen:

Wiederverwendung!

...wie auch schon bei Funktionsabstraktion und Polymorphie.

Dies wollen wir in der Folge genauer herausarbeiten...

Funktionale — Motivation 1(6)

(siehe Fethi Rahn, Guy Lapalme, Algorithms - A Functional Approach, Addison-Wesley, 1999, S. 7f.)

Betrachte folgende Beispiele...

```
-- Fakultätsfunktion
fact n | n==0 = 1
      | n>0  = n * fact(n-1)

-- Aufsummieren der n ersten natürlichen Zahlen
sumNat n | n==0 = 0
        | n>0  = n + sumNat(n-1)

-- Aufsummieren der n ersten Quadratzahlen natürlicher Zahlen
sumSqNat n | n==0 = 0
          | n>0  = n*n + sumSqNat(n-1)
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

7

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

8

Funktionale – Motivation 2(6)

Beobachtung...

- Die Definitionen von `fact`, `sumNat` und `sumSquNat` folgen demselben *Rekursionschema*.
- Dieses zugrundeliegende gemeinsame Rekursionschema ist gekennzeichnet durch:
 - Triff eine Festlegung für den Wert der Funktion...
 - * ...im *Basisfall*
 - * ...im verbleibenden (rekursiven) Fall als *Kombination* des Argumentwerts `n` und des Funktionswerts für `n-1`

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 9

Funktionale – Motivation 3(6)

Diese Beobachtung legt nahe...

- Obiges Rekursionschema, gekennzeichnet durch *Basisfall* und *Funktion zur Kombination* von Werten, herauszuziehen (zu abstrahieren) und musterhaft zu realisieren.
- Wir erhalten...

- Realisierung des Rekursionschemas
- ```
rekPatr base comb n | n==0 = base
 | n>0 = comb n (rekPatr base comb (n-1))
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 10

## Funktionale – Motivation 4(6)

Unmittelbare Anwendung des Rekursionschemas...

```
fact n = rekPatr 1 (*) n
sumNat n = rekPatr 0 (+) n
sumSquNat n = rekPatr 0 (\x y -> x*x + y) n
```

...oder alternativ dazu in nichtargumenbehalteter Ausprägung:

```
fact = rekPatr 1 (*)
sumNat = rekPatr 0 (+)
sumSquNat = rekPatr 0 (\x y -> x*x + y)
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 11

## Funktionale – Motivation 5(6)

Unmittelbarer Vorteil obigen Vorgehens...

- Wiederverwendung* und dadurch...

– *knirzterer, verlässlicherer, wartungsfreundlicherer* Code

Erforderlich für erfolgreiches Gelingen...

- Funktionen höherer Ordnung* oder kürzer: *Funktionale*

*Intuition:* Funktionale sind (spezielle) Funktionen, die Funktionen als Argumente erwarten und/oder als Resultat zurückliefern.

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 12

## Funktionale – Motivation 6(6)

Illustriert am obigen Beispiel...

- Die Untersuchung des Typs von `rekPatr`...

```
rekPatr :: Int -> (Int -> Int -> Int) -> Int
zeigt:
```

– Die Funktion `rekPatr` ist ein *Funktional*!

In der Anwendungssituation des Beispiels gilt weiter...

| fact      | Wert i. Basisf. (base) | Fkt. z. KP. v. W. (comb) |
|-----------|------------------------|--------------------------|
| fact      | 1                      | (*)                      |
| sumNat    | 0                      | (+)                      |
| sumSquNat | 0                      | \x y -> x*x + y          |

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 13

## Funktionale, Teil 1 ...Funktionen als Argumente (1)

Anstatt zweier spezialisierter Funktionen...

```
max :: Ord a => a -> a -> a
max x y
 | x > y = x
 | otherwise = y
```

```
min :: Ord a => a -> a -> a
```

```
min x y
 | x < y = x
 | otherwise = y
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 14

## Funktionale, Teil 1 ...Funktionen als Argumente (2)

...eine mit einem *Funktions-/Prädikatsargument parametrisierte Funktion*:

```
extreme :: Num a => (a -> a -> Bool) -> a -> a -> a
extreme p m n
 | p m n = m
 | otherwise = n
```

*Anwendungsbeispiele:*

```
extreme (>) 17 4 = 17
extreme (<) 17 4 = 4
```

Dadurch wird folgende alternative Definitionen von `max` und `min` möglich...

```
max x y = extreme (>) x y bzw. max = extreme (>)
min x y = extreme (<) x y bzw. min = extreme (<)
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 15

## Funktionen als Argumente: Weitere Bsp.

(Gleichförmige) Manipulation der Marken eines benannten Baums bzw. Herausfiltern der Marken mit einer bestimmten Eigenschaft...

```
data Tree a = Nil |
 Node a (Tree a) (Tree a)
valKandWerk :: (a -> a) -> Tree a -> Tree a
valKandWerk f Nil = Nil
valKandWerk f (Node elem t1 t2) =
 (Node (f elem) (valKandWerk f t1) (valKandWerk f t2))
filterTree :: (a -> Bool) -> Tree a -> [a]
filterTree p Nil = []
filterTree p (Node elem t1 t2) =
 [p elem = False] ++ (filterTree p t1) ++ (filterTree p t2)
 | otherwise = (filterTree p t1) ++ (filterTree p t2)
```

...mithilfe von Funktionalen, die in Manipulationsfunktion bzw. Prädikat parametrisiert sind.

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 16

## Zwischenresümee 1: Funktionen als Argumente...

- ...erhöhen die Ausdruckskraft erheblich und
- ...unterstützen Wiederverwendung.

Beispiel:

Vergleiche

```
zip :: [a] -> [b] -> [(a,b)]
zip (x:xs) (y:ys) = (x,y) : zip xs ys
zip _ _ = []

zipWith :: (a -> b -> c) -> [a] -> [b] -> [c]
zipWith f (x:xs) (y:ys) = f x y : zipWith f xs ys
zipWith f _ _ = []
```

mit

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

17

## Funktionale, Teil 2 ..Funktionen als Resultate (1)

Auch diese Situation ist bereits aus der Mathematik vertraut...  
Etwa in Gestalt der...

- Funktionskomposition (Komposition von Funktionen)

```
(.) :: (b -> c) -> (a -> b) -> (a -> c)
(f . g) x = f (g x)
```

Bsp.:

**Theorem** [...bekannt aus Analysis 1]

Die Komposition stetiger Funktionen ist wieder eine stetige Funktion.

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

18

## Funktionale, Teil 2 ...Funktionen als Resultate (2)

...ermöglichen Funktionsdefinitionen auf dem (Abstraktions-) Niveau von Funktionen statt von (elementaren) Werten.

Beispiel:

```
giveFourthElem :: [a] -> a
giveFourthElem = head . tripleTail

tripleTail :: [a] -> [a]
tripleTail = tail . tail . tail
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

19

## Funktionale, Teil 2 ...Funktionen als Resultate (3)

In komplexen Situationen einfacher zu verstehen und zu ändern als die argumentversehene Varianten...

Vergleiche folgende zwei argumentversehene Varianten der Funktion giveFourthElem :: [a] -> a ...

```
giveFourthElem 1s = (head . tripleTail) 1s -- Variante 1
giveFourthElem 1s = head (tripleTail 1s) -- Variante 2

...mit der argumentlosen Variante
giveFourthElem = head . tripleTail
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

20

## Funktionen als Resultate – Weitere Beispiele (1)

Iterierte Funktionsanwendung...

```
iterate :: Int -> (a -> a) -> (a -> a)
iterate n f
 | n > 0 = f . iterate (n-1) f
 | otherwise = id

id :: a -> a
id a = a

-- Anwendungsbeispiel
(iterate 3 square) 2
=> (square . square . square . id) 2 => 256
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

21

## Funktionen als Resultate – Weitere Beispiele (2)

Anheben (engl. *lifting*) eines Wertes zu einer (konstanten) Funktion...

```
constFun :: a -> (b -> a)
constFun c = \x -> c
```

```
-- Anwendungsbeispiele
constFun 42 "Die Antwort auf alle Fragen" => 42
constFun iterate giveFourthElem => iterate
(constFun iterate (+) 3 (\x->x*x)) 2 => 256
```

Vertauschen von Argumenten...

```
flip :: (a -> b -> c) -> (b -> a -> c)
flip f x y = f y x
```

```
-- Anwendungsbeispiel und Eigenschaft von flip
flip . flip => id
```

## Funktionen als Resultate – Partielle Auswertung (1)

Insbesondere die Spezialfälle der sog. *operator sections*.

*Schlüssel*: ...partielle Auswertung / partiell ausgewertete Operatoren

- (\*2) ...die Funktion, die ihr Argument verdoppelt.
- (2\*) ...s.O.
- (42<) ...das Prädikat, das sein Argument daraufhin überprüft, größer 42 zu sein.
- (42:) ...die Funktion, die 42 an den Anfang einer typkompatiblen Liste setzt.
- ...

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

23

## Funktionen als Resultate – Partielle Auswertung (2)

Partiell ausgewertete Operatoren...

...besonders elegant und ausdruckskräftig in Kombination mit Funktionalen und Funktionskomposition.

Beispiel:

```
fancySelect :: [Int] -> [Int]
fancySelect = filter (42<) . map (*2)
```

...multipliziert jedes Element einer Liste mit 2 und entfernt anschließend alle Elemente, die kleiner oder gleich 42 sind.

```
reverse :: [a] -> [a]
reverse = foldl (flip (:)) []
```

...kehrt eine Liste um.

*Bem.*: map, filter, foldl und flip werden im Verlauf der heutigen Vorlesung noch genauer besprochen.

## Anm. zur Funktionskomposition

Beachte:

Funktionskomposition...

- ist assoziativ, d.h.  $f \cdot (g \cdot h) = (f \cdot g) \cdot h = f \cdot g \cdot h$
- erfordert aufgrund der Bindungsstärke explizite Klammerung. (Bsp.: `head . tripleTail 1s` in Variante 1 von Folie 20 führt zu Typfehler.)
- sollte auf keinen Fall mit Funktionsapplikation verwechselt werden:  $f \cdot g$  (*Komposition*) ist verschieden von  $f$   $g$  (*Applikation*)!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

25

## Zwischenresümee 2: Funktionen als Resultate...

...von Funktionen (gleichberechtigt zu elementaren Werten) zuzulassen...

- ...ist der Schlüssel, Funktionen miteinander zu verknüpfen und in Programme einzubringen
  - ...unterscheidet funktionale Programmierung signifikant von anderen Programmierparadigmen
  - ...ist maßgeblich für die Eleganz und Ausdruckskraft und Prägnanz funktionaler Programmierung.
- Damit bleibt (möglicherweise) die Frage...
- Wie erhält man funktionale Ergebnisse?

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

26

## Einige Standardtechniken zur Entwicklung...

...von Funktionen mit funktionalen Ergebnissen:

- Explizit (Bsp.: `extreme`, `iterate`,...)
- Partielle Auswertung (curryfiziert vorliegender Funktionen) (Bsp.: `curriedAdd 4711 :: Int->Int`, `iterate 5 :: (a->a)->(a->a),...`)
  - Spezialfall: operator sections (Bsp.: `(*)2`, `(<2)`,...)
- Funktionskomposition (Bsp.: `tail . tail . tail :: [a]->[a],...`)
- $\lambda$ -Lifting (Bsp.: `constFun :: a -> (b -> a),...`)

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

27

## Spezialfall: Funktionale auf Listen

Typische Problemstellungen...

- Behandlung aller Elemente einer Liste in bestimmter Weise
- Herausfiltern aller Elemente einer Liste mit bestimmter Eigenschaft
- Aggregation aller Elemente einer Liste mittels eines bestimmten Operators
- ...

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

28

## Standardfunktionale auf Listen

...werden in Fkt. Programmiersprachen in großer Zahl offeriert, auch in Haskell.

Drei in der Praxis besonders häufig verwendete Funktionale auf Listen sind die Funktionale...

- `map`
- `filter`
- `fold`

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

29

## Das Standardfunktional `map (1)`

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

-- Implementierung mittels Listenkomprehension (Variante 1)
map f l = [f l | l <- l]

-- Implementierung mittels (expliziter) primitiver
-- Rekursion (Variante 2)
map f [] = []
map f (1:ls) = f 1 : map f ls

-- Anwendungsbeispiel
map square [2,4,..10] = [4,16,36,64,100]
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

30

## Das Standardfunktional `map (2)`

Einige Eigenschaften von `map`...

• Allgemein:

```
map (\x -> x) = \x -> x
map (f . g) = map f . map g
map f . tail = tail . map f
map f . reverse = reverse . map f
map f . concat = concat . map (map f)
map f (xs ++ ys) = map f xs ++ map f ys
```

- (Nur) für strikte `f`:  
`f . head = head . (map f)`

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

31

## Das Standardfunktional `filter`

```
-- Signatur
filter :: (a -> Bool) -> [a] -> [a]

-- Implementierung mittels Listenkomprehension
filter p ls = [l | l <- ls, p l]

-- Implementierung mittels (expliziter) primitiver Rekursion
filter p [] = []
filter p (1:ls)
 | p 1 = 1 : filter p ls
 | otherwise = filter p ls

-- Anwendungsbeispiel
filter isPowerOfTwo [2,4,..100] = [2,4,8,16,32,64]
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

32

## Das Standardfunktional fold (1)

```
"Falten" von rechts: foldr
-- Signatur ("folding from the right")
foldr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> b

-- Implementierung mittels (expliziter) primitiver Rekursion
foldr f e [] = e
foldr f e (1:1s) = f 1 (foldr f e 1s)

-- Anwendungsbeispiel
foldr (+) 0 [2,4..10] = (+ 2 (+ 4 (+ 6 (+ 8 (+ 10 0))))))
 = (2 + (4 + (6 + (8 + (10 + 0)))))) = 30
foldr (+) 0 [] = 0

In obiger Definition bedeuten:
f...binäre Funktion, e...Startwert, und
(1:1s) ...Liste der zu aggregierenden Werte.
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

33

## Das Standardfunktional fold (2)

```
Anwendungen von foldr zur Definition einiger Standardfunktionen von Haskell...

concat :: [[a]] -> [a]
concat 1s = foldr (++) [] 1s

and :: [Bool] -> Bool
and bs = foldr (&&) True bs
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

34

## Das Standardfunktional fold (3)

```
"Falten" von links: foldl
-- Signatur ("folding from the left")
foldl :: (a -> b -> a) -> a -> [b] -> a

-- Mittels (expliziter) primitiver Rekursion
foldl f e [] = e
foldl f e (1:1s) = foldl f (f e 1) 1s

-- Anwendungsbeispiel
foldl (+) 0 [2,4..10] = (+ (+ (+ (+ (+ 0 2) 4) 6) 8) 10)
 = (((((0 + 2) + 4) + 6) + 8) + 10) = 30
foldl (+) 0 [] = 0

In obiger Definition bedeuten:
f...binäre Funktion, e...Startwert und
(1:1s) ...Liste der zu aggregierenden Werte.
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

35

## Das Standardfunktional fold (4)

```
foldr vs. foldl – ein Vergleich:

-- Signatur ("folding from the right")
foldr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> b
foldr f e [] = e
foldr f e (1:1s) = f 1 (foldr f e 1s)

foldr f e [a1,a2,...,an]
=> a1 'f' (a2 'f' ... 'f' (an-1 'f' (an 'f' e))...)

-- Signatur ("folding from the left")
foldl :: (a -> b -> a) -> a -> [b] -> a
foldl f e [] = e
foldl f e (1:1s) = foldl f (f e 1) 1s

foldl f e [b1,b2,...,bn]
=> (...((e 'f' b1) 'f' b2) 'f' ... 'f' bn-1) 'f' bn
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

36

## Der Vollständigkeit halber

Das vordefinierte Funktional flip:

```
flip :: (a -> b -> c) -> (b -> a -> c)
flip f x y = f y x
```

Anwendungsbeispiel: Listenreversion

```
reverse :: [a] -> [a]
reverse = foldl (flip (:)) []

reverse [1,2,3] => [3,2,1]
```

Zur Übung empfohlen: Nachvollziehen, dass reverse wie oben das Gewünschte leistet!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

37

## Zwischenresümee 3

Typisch für funktionale Programmiersprachen ist...

- Elemente (Werte/Objekte) aller (Daten-) Typen sind Objekte erster Klasse (engl. *first-class citizens*).
- Das heißt: Jedes Datenobjekt kann...
- Argument und Wert einer Funktion sein
  - in einer Deklaration benannt sein
  - Teil eines strukturierten Objekts sein

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

38

## Folgendes Beispiel...

...illustriert dies sehr kompakt:

```
magicType = let
 pair x y z = z x y
 f y = pair y y
 g y = f (f y)
 h y = g (g y)
 in h (\x->x)
```

Preisfragen:

- Welchen Typ hat magicType?
- Wie ist es Hugs möglich, diesen Typ zu bestimmen?

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

39

## Zwischenresümee 4: Rechnen mit Funktionen...

Im wesentlichen folgende Quellen, Funktionen in Programme einzuführen...

- Explizite Definition im (Haskell-) Skript
- Ergebnis anderer Funktionen/Funktionsanwendungen
  - Explizit mit funktionalem Ergebnis
  - Partielle Auswertung
- \* Spezialfall: Operator sections
  - Funktionskomposition
  - $\lambda$ -Lifting

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

40

## Vorteile der Programmierung mit Funktionalen...

- Kürzere und i.a. einfacher zu verstehende Programme  
...wenn man die Semantik (insbesondere) der grundlegenden Funktionen und Funktionale (map, filter,...) verinnerlicht hat.
- Einfachere Herleitung und Beweis von Programmeigenschaften (Stichwort: Programmverifikation )  
...da man sich auf die Eigenschaften der zugrundeliegenden Funktionen abstützen kann.
- ...
- Wiederverwendung von Programmcode  
...und dadurch Unterstützung des *Programmierens im Großen*.

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

41

## Stichwort Wiederverwendung

Wesentliche Quellen für Wiederverwendung in fkt. Programmiersprachen sind...

- Polymorphie (auf Funktionen und Datentypen)
- Funktionale

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

42

## Stärken funktionaler Programmierung

...resultieren aus wenigen Konzepten

- sowohl bei Funktionen
- als auch bei Datentypen

Die Ausdruckskraft ergibt sich in beiden Fällen durch die Kombination der Einzelstücke.

~> ...*das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile!*

Für eine detaillierte Diskussion: siehe Peter Pepper [4]

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

43

## Teil 2: Ein- und Ausgabe

Die Behandlung von...

- Ein- / Ausgabe in Haskell  
~> Einstieg in das *Monadenkonzept* von Haskell

...wird uns an die Schnittstelle von *funktionaler und imperativer* Programmierung führen!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

44

## Hello World!

```
helloWorld :: IO ()
helloWorld = putStrLn "Hello World!"
```

Hello World...

- ...gewöhnlich eines der ersten Beispielprogramme in einer neuen Programmiersprache
- ...in dieser LVA erst im letzten Drittel!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

45

## Ungewöhnlich?

Zum Vergleich...

Ein-/Ausgabe-Behandlung in...

- S. Thompson [3]: ...in Kapitel 18 (von 20)
- P. Pepper [4]: ...in Kapitel 21&22 (von 23)
- R. Bird [2]: ...in Kapitel 10 (von 12)
- A. J. T. Davie, "An Introduction to *Functional Programming Systems Using Haskell*", Cambridge, 1992. ...in Kapitel 7 (von 11)
- M. M. T. Chakravarty, G. C. Keller, "*Einführung in die Programmierung mit Haskell*", Pearson Studium, 2004. ...in Kapitel 7 (von 13)

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

46

## Zufall!

...Oder ist Ein-/Ausgabe möglicherweise

- ...weniger wichtig in funktionaler Programmierung?
  - ...oder in besonderer Weise problembehaftet?
- Tendenziell letzteres...

- Ein-/Ausgabe... führt uns an den Berührungspunkt von *funktionaler* und *imperativer* Programmierung!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

47

## Rückblick...

Unsere bisherige Sicht fkt. Programmierung...

```

Eingabe ----> | Fkt. Programm | --> Ausgabe

```

In anderen Worten...

Unsere bisherige Sicht fkt. Programmierung ist...

- *stapelverarbeitungsfokussiert*
- *nicht dialog- und interaktionorientiert*

...wie es heutigen Anforderungen und heutiger Programmierrealität entspricht.

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

48

## Erinnerung

Im Vergleich zu anderen Paradigmen...

- Das funktionale Paradigma betont das "was" (Ergebnisse) zugunsten des "wie" (Art der Berechnung der Ergebnisse)

Von zentraler Bedeutung dafür...

- Der Wert eines Ausdrucks hängt nur von den Werten seiner Teilausdrücke ab
  - *Stichwort(e)*: ...Kompositionalität (ref. Transparenz)
    - ↳ erleichtert Programmentwicklung und Korrektheitsüberlegungen
- Auswertungsabhängigkeiten, nicht aber Auswertungsreihenfolgen dezidiert festgelegt
  - *Stichwort(e)*: ...Flexibilität (Church-Rosser-Eigenschaft)
    - ↳ erleichtert Implementierung einschl. Parallelisierung
- ...

## Knackpunkt 1: Kompositionalität (1)

Vergleiche...

```
val :: Float
val = 3.14
```

```
valDiff :: Float
valDiff = val - val
```

mit...

```
readDiff :: Float
readDiff = READFL - READFL
```

und der Anwendung in...

```
constFunOrNot :: Float
constFunOrNot = valDiff + readDiff
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

51

## Angenommen...

...wir hätten Konstrukte der Art (*Achtung*: Kein Haskell!)

```
PRINT :: String -> a -> a
PRINT message value =
 << << gib "message" am Bildschirm aus und liefere >>
 value
```

```
READFL :: Float
```

```
READFL = << lies Gleitkommazahl und liefere diese als Ergebnis >>
```

*Mithin*:

...Hinzunahme von Ein-/Ausgabe mittels seiteneffektbehafteter Funktionen!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

50

## Knackpunkt 1: Kompositionalität (2)

*Beachte*: ...der Wert von Ausdrücken hänge nicht länger nur von seinen Teilausdrücken ab (sondern auch von der Position im Programm)

↳ ...Verlust von *Kompositionalität*

(...und der damit einhergehenden positiven Eigenschaften).

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

52

## Knackpunkt 2: Flexibilität (2)

...zum "Knackpunkt" (*Achtung*: Kein Haskell!):

```
knackpunkt r =
 Let
 myP1 = PRINT "Constant Value" 3.14
 u = PRINT "Erstgelesener Wert" dummy
 c = READFL
 x = r * c
 v = r * c
 d = READFL
 y = r + d
 z = r * r
 In (x,y,z)
```

↳ ...Verlust der *Auswertungsreihenfolgenunabhängigkeit*

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

54

## Knackpunkt 2: Flexibilität (1)

...oder der Verlust der Unabhängigkeit von der Auswertungsreihenfolge

Vom "Punkt" ...

```
punkt r =
 Let
 myP1 = 3.14
 x = r * myP1
 y = r + 17.4
 z = r * r
 In (x,y,z)
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

53

## Ergo...

Konzentration auf die Essenz der Programmierung wie im funktionalen Paradigma ("was" statt "wie") ist wichtig und richtig, aber...

- Kommunikation mit dem Benutzer (bzw. der Außenwelt) muss die zeitliche Abfolge von Aktivitäten auszudrücken gestatten.

In den Worten von P. Pepper [4]:

- ...*"der Benutzer lebt in der Zeit und kann nicht anders als zeitabhängig sein Programm beobachten"*.

*Konsequenz* ...man (bzw. ein jedes Paradigma) darf von der Arbeitsweise des Rechners, nicht aber von der des Benutzers abstrahieren!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

55

## Haskells Ansatz zur Behandlung von Ein- und Ausgabe

Zentral...

- Elementare Ein-/Ausgabeoperationen (Kommandos) auf speziellen Typen (IO-Typen) sowie
- (Kompositions-) Operatoren, um Anweisungssequenzen (Kommandosequenzen) auszudrücken

Damit...

- Trennung von
  - funktionalem Kern und
  - imperativähnlicher Ein-/Ausgabe

...somit gelangen wir an die Schnittstelle von funktionaler und imperativer Welt!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

56

## (Ausgewählte) elementare Ein-/Ausgabeoperationen

```
-- Eingabe
getChar :: IO Char
getLine :: IO String

-- Ausgabe
putChar :: Char -> IO ()
putLine :: String -> IO ()
putStr :: String -> IO ()
```

### Bemerkung:

- () : ...spezieller einelementiger Haskell-Typ, dessen einziges Element (ebenfalls) mit () bezeichnet wird.
- IO a : ...spezieller Haskell-Typ "*I/O Aktion* (*Kommando*) vom Typ a". IO: ...Typkonstruktor (ähnlich wie [a] für Listen oder -> für Funktionstypen)

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 61

## Kompositionsooperatoren

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

### Intuitiv:

- (>>) : Wenn p und q Kommandos sind, dann ist p >> q das Kommando, das zunächst p ausführt, den Rückgabewert (x vom Typ a) ignoriert, und anschließend q ausführt.
- (>>=) : Wenn p und q Kommandos sind, dann ist p >>= q das Kommando, das zunächst p ausführt, dabei den Rückgabewert x vom Typ a liefert, und daran anschließend q x ausführt und dabei den Rückgabewert y vom Typ b liefert.

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 58

## Einfache Anwendungsbeispiele

```
-- Schreiben mit Zeilenvorschub (Standardoperation in Haskell)
putStrLn :: String -> IO ()
putStrLn = putStr . (++ "\n")

-- Lesen einer Zeile und Ausgeben der gelesenen Zeile
echo :: IO ()
echo = getLine >>= putStrLn
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 59

## Weitere Ein- /Ausgabeoperationen

```
-- Schreiben und Lesen von Werten unterschiedlicher Typen
print :: Show a => a -> IO ()
print = putStrLn . show

read :: Read a => String -> a

-- Rückgabewerterzeugung ohne Ein-/Ausgabe (Aktion)
return :: a -> IO a

Erinnerung:
show :: Show a => a -> String
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 60

## Die do-Notation: Bequemere (Kommando-) Sequenzenbildung

Komfortabler als (>>) und (>>=) ist Haskell's do-Notation...

```
putStrLn :: String -> IO ()
putStrLn str = do putStr str
 putStrLn "\n"

putTwice :: String -> IO ()
putTwice str = do putStrLn str
 putStrLn str

putNtimes :: Int -> String -> IO ()
putNtimes n str = if n <= 1
 then putStrLn str
 else do putStrLn str
 putNtimes (n-1) str
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 61

## Weitere Beispiele zur do-Notation

```
putTwice = putNtimes 2

read2lines :: IO ()
read2lines = do getLine
 putStrLn "Two lines read."

echo2times :: IO ()
echo2times = do line <- getLine
 putStrLn line
 putStrLn line

getInt :: IO Int
getInt = do line <- getLine
 return (read line :: Int)
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 62

## "Single vs. updatable Assignment" (1)

Durch das Konstrukt

```
var <- ...
```

wird stets eine *frische* Variable eingeführt.

*Sprechweise:*

...Unterstützung des Konzepts des

- "single assignment", nicht das des
- "updatable assignment" (destruktive Zuweisung wie aus imperativen Programmiersprachen bekannt)

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 63

## "Single vs. updatable Assignment" (2)

...zur Illustration des Unterschieds betrachte:

```
goHntilEmpty :: IO ()
goHntilEmpty = do line <- getLine
 while (return (line /= []))
 (do putStrLn line
 line <- getLine
 return ())

wobel while :: IO Bool -> IO () -> IO ()
```

*Abhilfe:* ...Rekursion statt Iteration!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007) 64

## “Single vs. updatable Assignment” (3)

...z.B. auf folgende in S. Thompson [3] auf S. 393 vorgeschlagene Weise:

```
goHttlEmpty :: IO ()
goHttlEmpty =
 do line <- getLine
 if (line == [])
 then return ()
 else (do putStrLn line
 goHttlEmpty)
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

65

## Stichwort: Iteration

```
while :: IO Bool -> IO () -> IO ()
while test action
 = do res <- test
 if res then do action
 while test action
 else return () -- "null I/O-action"
```

*Erinnerung:*

```
-- Rueckgabewerterzeugung ohne Ein-/Ausgabe (Aktion)
return :: a -> IO a
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

66

## Ein-/Ausgabe von und auf Dateien

...auch hierfür vordefinierte Standardoperatoren.

```
readFile :: FilePath -> IO String
writeFile :: FilePath -> String -> IO ()
appendFile :: FilePath -> String -> IO ()
```

where

```
type FilePath = String -- implementationsabhaengig

-- Anwendungsbeispiel: Bestimmung der Laenge einer Datei
size :: IO Int
size = do putLine "Dateiname = "
 name <- getLine
 text <- readFile name
 return (length(text))
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

67

## Zusammenhang do-Konstrukt und (>>), (>>=)-Operatoren

...illustriert anhand eines Beispiels:

Mittels do...

```
incrementInt :: IO ()
incrementInt = do line <- getLine
 putStrLn (show (1 + read line :: Int))
```

Äquivalent dazu...

```
incrementInt = getLine >> \line ->
 putStrLn (show (1 + read line :: Int))
```

Intuitiv...

```
"do = (>>=) plus anonyme lambda-Abstraktion"
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

68

## Konvention in Haskell

- Hauptdefinition (übersetzter) Haskell-Programme ist (per Konvention) eine Definition main vom Typ IO a.

*Beispiel:*

```
main :: IO ()
main = do c <- getChar
 putchar c
```

...main ist Startpunkt eines (übersetzten) Haskell-Programms. (Intuitiv gilt somit: "Programm = Ein-/Ausgabekommando")

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

69

## Fazit über Ein- und Ausgabe

Es gilt...

- Ein-/Ausgabe grundsätzlich unterschiedlich in funktionaler und imperativer Programmierung  
Am augenfälligsten:
  - *Imperativ:* Ein-/Ausgabe prinzipiell an jeder Programmstelle möglich
  - *Funktional:* Ein-/Ausgabe an bestimmten Programmstellen konzentriert

Häufige Beobachtung...

- ...die vermeintliche Einschränkung erweist sich oft als Stärke bei der Programmierung im Großen!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

70

## Ausblick

Das allgemeinere Konzept der

- Monaden in Haskell

und ihr Zusammenhang mit der Realisierung von

- Ein-/Ausgabe in Haskell

...nächstes Mal!

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

71

## Teil 3: Fehlerbehandlung

... in Haskell!

- Bislang von uns nur rudimentär behandelt.

Typische Formulierung aus den Aufgabenstellungen:

...so hat die *Funktion als Ergebnis den aktualisierten Stimmzettel; ansonsten ist das Ergebnis die Zeichenreihe Ungültige Eingabe.*

- In der Folge Wege zu einem systematischeren Umgang mit unerwarteten Programmsituationen und Fehlern

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

72

## Typische Fehlersituationen

- Division durch 0
  - Zugriff auf das erste Element einer leeren Liste
  - ...
- In der Folge...
- 3 Varianten zum Umgang mit solchen Situationen

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

73

## Variante 1: Panikmodus (1)

- *Berechnung anhalten und Fehlerursache melden.*
- Hilfsmittel: Die Funktion `error`...
- ```
error :: String -> a
```
- Aufruf von...
- ```
error "Unbehebbarer Fehler aufgetreten..."
```
- liefert Ausgabe...
- ```
Program error: Unbehebbarer Fehler aufgetreten...
```
- und Programmausführung stoppt.

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

74

Variante 1 (2)

Vor- und Nachteile von Variante 1:

- Schnell und einfach
- *Aber*: Die Berechnung stoppt unwiderruflich. Jegliche (auch) sinnvolle Information über den Programmablauf ist verloren.

Ziel: Kein *Panikmodus*. Programmablauf nicht gänzlich abbrechen.

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

75

Variante 2: Dummy-Werte (1)

- *Verwendung von dummy-Werten im Fehlerfall.*

Statist...

```
tail :: [a] -> [a]
tail (_,xs) = xs
tail []      = error '“Prelude.list.tail: empty list”'
```

benutze zum Beispiel...

```
t1 :: [a] -> [a]
t1 (_,xs) = xs
t1 []     = []
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

76

Variante 2 (2)

Vor- und Nachteile von Variante 2:

- Programmablauf wird nicht abgebrochen
- *Aber*: Ein geeigneter Default-Wert ist nicht immer offensichtlich.

Betrachte z.B.:

```
hd :: [a] -> a
hd (x:_) = x
hd []    = ????????????
```

Möglicher Ausweg:

- ...jeweils gewünschten Wert als Parameter mitgeben.

Im obigen Beispiel etwa:

```
hd' :: a -> [a] -> a
hd' y (x:_) = x
hd' y []    = y
```

Variante 3: Spezielle Fehlerwerte und -typen (1)

- *Fehlerwerte und -typen statt schlichter dummy-Werte*

```
data Maybe a = Nothing | Just a
  deriving (Eq, Ord, Read, Show)
```

...i.w. der Typ `a` mit dem Zusatzwert `Nothing`.

Damit...

```
fErr x
| cond      = Nothing
| otherwise = Just (f x)
```

...und anhand eines konkreten Beispiels:

```
errDiv :: Int -> Int -> Maybe Int
errDiv n m
| (m == 0) = Nothing
| otherwise = Just (n `div` m)
```

Variante 2 (3)

Generelles Muster:

Ersetze übliche Implementierung einer (einstelligen) Funktion

```
f...
f x = ...
```

durch...

```
fErr y x
| cond      = y
| otherwise = f x
```

mit `cond` Charakterisierung der Fehlerituation.

Vor- und Nachteile:

- Generell, stets anwendbar
- Auftreten des Fehlerfalls nicht beobachtbar: `y` mag auch als gewöhnliches Ergebnis auftreten

Variante 3 (2)

Vor- und Nachteile von Variante 3:

- Geänderte Funktionalität: statt `a`, jetzt `Maybe a`

- *Aber*:

– Fehlerursachen können durch einen Funktionsaufruf "hindurchgereicht" werden (der Effekt der Funktion `mapMaybe...`)

– Fehler können "gefangen" werden (die Rolle von der Funktion `maybe...`)

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

80

Variante 3 (3)

Die Funktionen `mapMaybe` und `maybe`:

```
mapMaybe :: (a -> b) -> Maybe a -> Maybe b
mapMaybe g Nothing = Nothing
mapMaybe g (Just x) = Just (g x)

maybe :: b -> (a -> b) -> Maybe a -> b
maybe n f Nothing = n
maybe n f (Just x) = f x
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

81

Variante 3 (4)

Anwendungsbeispiel(e):

Der Fehler wird "(auf-) gefangen":

```
maybe 42 (+1) (mapMaybe (*3) errDiv 9 0))
=> maybe 42 (+1) (mapMaybe (*3) Nothing)
=> maybe 42 (+1) Nothing
=> 42
```

Kein Fehlerfall, "alles geht gut":

```
maybe 42 (+1) (mapMaybe (*3) errDiv 9 1))
=> maybe 42 (+1) (mapMaybe (*3) (Just 9))
=> maybe 42 (+1) (Just 27)
=> 1 + 27
=> 28
```

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

82

Variante 3 (5)

Wesentlicher Vorteil der letzten Variante:

- Systementwicklung ohne explizite Fehlerbehandlung möglich.
- Fehlerbehandlung kann am Ende mithilfe der Funktionen `mapMaybe` und `maybe` ergänzt werden.
- ...für weitere Details siehe S. Thompson [3], Kapitel 14.3.

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

83

Vorschau auf die kommenden Aufgabenblätter...

Ausgabe des...

- achten Aufgabenblatts: Di, den 27.11.2007
...Abgabetermine: Di, den 04.12.2007, und Di, den 11.12.2007,
jeweils 15:00 Uhr
- neunten Aufgabenblatts: Di, den 04.12.2007
...Abgabetermine: Di, den 11.12.2007, und Di, den 08.01.2008,
jeweils 15:00 Uhr

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

84

Vorschau auf die nächsten Vorlesungstermine...

- Do, 29.11.2007, Vorlesung von 16:30 Uhr bis 18:00 Uhr im Radlinger-Hörsaal
- Do, 06.12.2007, Vorlesung von 16:30 Uhr bis 18:00 Uhr im Radlinger-Hörsaal
- Do, 13.12.2007, Vorlesung von 16:30 Uhr bis 18:00 Uhr im Radlinger-Hörsaal

Funktionale Programmierung (WS 2006/2007) / 7. Teil (27.&29.11.2007)

85