

Fortgeschrittene Programmierung

Vorlesung

WS 09,10; SS 12–14, 16,17

Johannes Waldmann, HTWK Leipzig

2. April 2018

– Typeset by FoilTeX –

Einleitung

Programmierung im Studium bisher

- 1. Sem: Modellierung (formale Spezifikationen)
- 1./2. Sem Grundlagen der (AO) Programmierung
 - imperatives Progr. (Programm ist Folge von Anweisungen, bewirkt Zustandsänderung)
 - strukturiertes P. (genau ein Eingang/Ausgang je Teilp.)
 - objektorientiertes P. (Interface = abstrakter Datentyp, Klasse = konkreter Datentyp)
- 2. Sem: Algorithmen und Datenstrukturen (Spezifikation, Implementierung, Korrektheit, Komplexität)
- 3. Sem: Softwaretechnik (industrielle Softwareproduktion)
- 3./4. Sem: Softwarepraktikum

– Typeset by FoilTeX –

1

Worin besteht jetzt der Fortschritt?

- *deklarative* Programmierung (Programm *ist* ausführbare Spezifikation)
- insbesondere: *funktionale* Programmierung
Def: Programm berechnet *Funktion*
 $f : \text{Eingabe} \mapsto \text{Ausgabe}$,
(kein Zustand, keine Zustandsänderungen)
- – Daten (erster Ordnung) sind Bäume
 - Programm ist Gleichungssystem
 - Programme sind auch Daten (höherer Ordnung)
- ausdrucksstark, sicher, effizient, parallelisierbar

– Typeset by FoilTeX –

2

Formen der deklarativen Programmierung

- funktionale Programmierung: `foldr (+) 0 [1,2,3]`
`foldr f z l = case l of`
 `[] -> z ; (x:xs) -> f x (foldr f z xs)`
- logische Programmierung: `append (A,B, [1,2,3]) .`
`append ([], YS, YS) .`
`append ([X|XS], YS, [X|ZS]) :- append (XS, YS, ZS) .`
- Constraint-Programmierung
`(set-logic QF_LIA) (set-option :produce-models true`
`(declare-fun a () Int) (declare-fun b () Int)`
`(assert (and (>= a 5) (<= b 30) (= (+ a b) 20)))`
`(check-sat) (get-value (a b))`

– Typeset by FoilTeX –

3

Definition: Funktionale Programmierung

- Rechnen = Auswerten von Ausdrücken (Termbäumen)
- Dabei wird ein *Wert* bestimmt und es gibt keine (versteckte) *Wirkung*.
(engl.: side effect, dt.: Nebenwirkung)
- Werte können sein:
 - “klassische” Daten (Zahlen, Listen, Bäume...)
`True :: Bool, [3.5, 4.5] :: [Double]`
 - Funktionen (Sinus, ...)
`[sin, cos] :: [Double -> Double]`
 - Aktionen (Datei lesen, schreiben, ...)
`readFile "foo.text" :: IO String`

– Typeset by FoilTeX –

4

Softwaretechnische Vorteile

... der funktionalen Programmierung

- Beweisbarkeit: Rechnen mit Programmen wie in der Mathematik mit Termen
- Sicherheit: es gibt keine Nebenwirkungen und Wirkungen sieht man bereits am Typ
- Ausdrucksstärke, Wiederverwendbarkeit: durch Funktionen höherer Ordnung (sog. Entwurfsmuster)
- Effizienz: durch Programmtransformationen im Compiler,
- Parallelität: keine Nebenwirkungen \Rightarrow keine *data races*, fktl. Programme sind *automatisch parallelisierbar*

– Typeset by FoilTeX –

5

Beispiel Spezifikation/Test

```
import Test.LeanCheck

append :: forall t . [t] -> [t] -> [t]
append [] y = y
append (h : t) y = h : (append t y)

associative f =
  \ x y z -> f x (f y z) == f (f x y) z
commutative f = \ x y -> ...

test = check
  (associative (append :: [Bool] -> [Bool] -> [Bool])
  Übung: Kommutativität (formulieren und testen)
```

– Typeset by FoilTeX –

6

Beispiel Verifikation

```
app :: forall t . [t] -> [t] -> [t]
app [] y = y
app (h : t) y = h : (app t y)

Lemma: app x (app y z) == app (app x y) z

Proof by induction on List x
Case []
  To show: app [] (app y z) == app (app [] y) z
Case h:t
  To show: app (h:t) (app y z) == app (app (h:t) y) z
  IH: app t (app y z) == app (app t y) z
CYP https://github.com/noschin1/cyp,
ist vereinfachte Version
von Isabelle https://isabelle.in.tum.de/
```

– Typeset by FoilTeX –

7

Beispiel Parallelisierung (Haskell)

Klassische Implementierung von Mergesort

```
sort :: Ord a => [a] -> [a]
sort [] = [] ; sort [x] = [x]
sort xs = let ( left,right ) = split xs
            sleft = sort left
            sright = sort right
            in merge sleft sright
```

wird parallelisiert durch *Annotations*:

```
sleft = sort left
      `using` rpar `dot` spineList
sright = sort right `using` spineList
```

vgl. <http://thread.gmane.org/gmane.comp.lang.haskell.parallel/181/focus=202>

Beispiel Parallelisierung (C#, PLINQ)

- Die Anzahl der 1-Bits einer nichtnegativen Zahl:

```
Func<int,int>f =
    x=>{int s=0; while(x>0){s+=x%2;x/=2;}return s;}
```

- $\sum_{x=0}^{2^{26}-1} f(x)$ `Enumerable.Range(0,1<<26).Select(f).Sum()`

- automatische parallele Auswertung, Laufzeitvergleich:

```
Time(()=>Enumerable.Range(0,1<<26).Select(f).Sum())
Time(()=>Enumerable.Range(0,1<<26).AsParallel()
    .Select(f).Sum())
```

vgl. *Introduction to PLINQ* [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd997425\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd997425(v=vs.110).aspx)

Softwaretechnische Vorteile

... der statischen Typisierung

The language in which you write profoundly affects the design of programs written in that language.

For example, in the OO world, many people use UML to sketch a design. In Haskell or ML, one writes type signatures instead. Much of the initial design phase of a functional program consists of writing type definitions.

Unlike UML, though, all this design is incorporated in the final product, and is machine-checked throughout.

Simon Peyton Jones, in: *Masterminds of Programming*, 2009; <http://shop.oreilly.com/product/9780596515171.do>

Deklarative Programmierung in der Lehre

- funktionale Programmierung: diese Vorlesung
- logische Programmierung: in *Angew. Künstl. Intell.*
- Constraint-Programmierung: als Master-Wahlfach

Beziehungen zu weiteren LV: Voraussetzungen

- Bäume, Terme (Alg.+DS, Grundlagen Theor. Inf.)
- Logik (Grundlagen TI, Softwaretechnik)

Anwendungen:

- Softwarepraktikum
- weitere Sprachkonzepte in *Prinzipien v. Programmiersprachen*
- *Programmverifikation* (vorw. f. imperative Programme)

Konzepte und Sprachen

Funktionale Programmierung ist ein *Konzept*. Realisierungen:

- in prozeduralen Sprachen:
 - Unterprogramme als Argumente (in Pascal)
 - Funktionszeiger (in C)
- in OO-Sprachen: Befehlsobjekte
- Multi-Paradigmen-Sprachen:
 - Lambda-Ausdrücke in C#, Scala, Clojure
- funktionale Programmiersprachen (LISP, ML, Haskell)

Die Erkenntnisse sind sprachunabhängig.

- A good programmer can write LISP in any language.
- Learn Haskell and become a better Java programmer.

Gliederung der Vorlesung

- Terme, Termersetzungssysteme algebraische Datentypen, Pattern Matching, Persistenz
- Funktionen (polymorph, höherer Ordnung), Lambda-Kalkül, Rekursionsmuster
- Typklassen zur Steuerung der Polymorphie
- Bedarfsauswertung, unendl. Datenstrukturen (Iterator-Muster)
- weitere Entwurfsmuster
- Code-Qualität, Code-Smells, Refactoring

Softwaretechnische Aspekte

- algebraische Datentypen, Pattern Matching, Termersetzungssysteme
Scale: case class, Java: Entwurfsmuster Kompositum, immutable objects, das Datenmodell von Git
- Funktionen (höherer Ordnung), Lambda-Kalkül, Rekursionsmuster
Lambda-Ausdrücke in C#, Entwurfsmuster Besucher
Codequalität, code smells, Refaktorisierung
- Typklassen zur Steuerung der Polymorphie
Interfaces in Java/C# , automatische Testfallgenerierung
- Bedarfsauswertung, unendl. Datenstrukturen
Iteratoren, Ströme, LINQ

Organisation der LV

- jede Woche eine Vorlesung, eine Übung
- Hausaufgaben (teilw. autotool)
<https://autotool.imn.htwk-leipzig.de/new/vorlesung/238/aufgaben/aktuell>
Identifizierung und Authentifizierung über Shibboleth-IdP des HTWK-Rechenzentrums, wie bei OPAL
- Prüfungszulassung: regelmäßiges (d.h. innerhalb der jeweiligen Deadline) und erfolgreiches (insgesamt $\geq 50\%$ der Pflichtaufgaben) Bearbeiten von Übungsaufgaben.
- Prüfung: Klausur (ohne Hilfsmittel)

Literatur

- Skripte:
 - aktuelles Semester <http://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/lehre.html>
 - vorige Semester <http://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/lehre-alt.html>
- Entwurfsmuster: <http://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/draft/pub/hal4/emu/main.pdf>
- Maurice Naftalin und Phil Wadler: *Java Generics and Collections*, O'Reilly 2006
- <http://haskell.org/> (Sprache, Werkzeuge, Tutorials), <http://book.realworldhaskell.org/>

Alternative Quellen

- – Q: Aber in Wikipedia/Stackoverflow steht, daß ...
 - A: Na und.
- Es mag eine in Einzelfällen nützliche Übung sein, sich mit dem Halbwissen von Nichtfachleuten auseinanderzusetzen.
Beachte aber <https://xkcd.com/386/>
- In VL und Übung verwenden und diskutieren wir die durch Dozenten/Skript/Modulbeschreibung vorgegebenen Quellen (Lehrbücher, referierte Original-Artikel, Standards zu Sprachen und Bibliotheken)
- ... gilt entsprechend für Ihre Bachelor- und Master-Arbeit.

Übungen KW14

- Benutzung Rechnerpool, ghci aufrufen
<http://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/etc/pool/>
- Auf wieviele Nullen endet die Fakultät von 100?
 - Benutze `foldr` zum Berechnen der Fakultät.
 - Beachte polymorphe numerische Literale. (Auflösung der Polymorphie durch Typ-Annotation.) Warum ist 100 Fakultät als `Int` gleich 0?
 - Welches ist der Typ der Funktion ? Beispiel:

```
odd 3 ==> True ; odd 4 ==> False
takeWhile odd [3,1,4,1,5,9] ==> [3,1]
```
 - ersetze in der Lösung `takeWhile` durch andere Funktionen des gleichen Typs (suche diese mit

Hoogle), erkläre Semantik

- typische Eigenschaften dieses Beispiels (nachmachen!)
statische Typisierung, Schachtelung von Funktionsaufrufen, Funktion höherer Ordnung, Benutzung von Funktionen aus Standardbibliothek (anstatt selbstgeschriebener).
- schlechte Eigenschaften (vermeiden!)
Benutzung von Zahlen und Listen (anstatt anwendungsspezifischer Datentypen) vgl.
<http://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/etc/untutorial/list-or-not-list/>
- Haskell-Entwicklungswerkzeuge
 - ghci (Fehlermeldungen, Holes)
 - API-Suchmaschine <http://www.haskell.org/hoogle/>

- IDE? brauchen wir (in dieser VL) nicht.
Ansonsten `emacs/intero`, <http://xkcd.org/378/>
- Softwaretechnik im autotool: <http://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/etc/untutorial/se/>
- Commercial Uses of Functional Programming
<http://www.syslog.cl.cam.ac.uk/2013/09/22/liveblogging-cufp-2013/>

Daten

Wiederholung: Terme

- (Prädikatenlogik) *Signatur* Σ ist Menge von Funktionssymbolen mit Stelligkeiten
ein Term t in Signatur Σ ist
 - Funktionssymbol $f \in \Sigma$ der Stelligkeit k mit Argumenten (t_1, \dots, t_k) , die selbst Terme sind.
 $\text{Term}(\Sigma)$ = Menge der Terme über Signatur Σ
- (Graphentheorie) ein Term ist ein gerichteter, geordneter, markierter Baum
- (Datenstrukturen)
 - Funktionssymbol = Konstruktor, Term = Baum

Beispiele: Signatur, Terme

- Signatur: $\Sigma_1 = \{Z/0, S/1, f/2\}$
- Elemente von $\text{Term}(\Sigma_1)$:
 $Z(), S(S(Z())), f(S(S(Z))), Z()$
- Signatur: $\Sigma_2 = \{E/0, A/1, B/1\}$
- Elemente von $\text{Term}(\Sigma_2)$: ...

Algebraische Datentypen

```
data Foo = Foo { bar :: Int, baz :: String }
    deriving Show
```

Bezeichnungen (benannte Notation)

- `data Foo` ist Typname
- `Foo { .. }` ist Konstruktor
- `bar, baz` sind Komponenten

```
x :: Foo
x = Foo { bar = 3, baz = "hal" }
```

Bezeichnungen (positionelle Notation)

```
data Foo = Foo Int String
y = Foo 3 "bar"
```

Datentyp mit mehreren Konstruktoren

Beispiel (selbst definiert)

```
data T = A { foo :: Int }
        | B { bar :: String, baz :: Bool }
    deriving Show
```

Beispiele (in Prelude vordefiniert)

```
data Bool = False | True
data Ordering = LT | EQ | GT
```

Mehrsortige Signaturen

- (bisher) einsortige Signatur
Abbildung von Funktionssymbol nach Stelligkeit
- (neu) mehrsortige Signatur
 - Menge von Sortensymbolen $S = \{S_1, \dots\}$
 - Abb. von F.-Symbol nach Typ
 - Typ ist Element aus $S^* \times S$
Folge der Argument-Sorten, Resultat-Sorte

Bsp.: $S = \{Z, B\}, \Sigma = \{0 \mapsto ([], Z), p \mapsto ([Z, Z], Z), e \mapsto ([Z, Z], B), a \mapsto ([B, B], B)\}$.

- $Term(\Sigma)$: konkrete Beispiele, allgemeine Definition?

Rekursive Datentypen

```
data Tree = Leaf {}
          | Branch { left :: Tree
                   , right :: Tree }
```

Übung: Objekte dieses Typs erzeugen
(benannte und positionelle Notation der Konstruktoren)

Daten mit Baum-Struktur

- mathematisches Modell: Term über Signatur
- programmiersprachliche Bezeichnung: *algebraischer Datentyp* (die Konstruktoren bilden eine Algebra)
- praktische Anwendungen:
 - Formel-Bäume (in Aussagen- und Prädikatenlogik)
 - Suchbäume (in VL Algorithmen und Datenstrukturen, in `java.util.TreeSet<E>`)
 - DOM (Document Object Model)
<https://www.w3.org/DOM/DOMTR>
 - JSON (Javascript Object Notation) z.B. für AJAX
<http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-404.htm>

Bezeichnungen für Teilterme

- *Position*: Folge von natürlichen Zahlen
(bezeichnet einen Pfad von der Wurzel zu einem Knoten)
Beispiel: für $t = S(f(S(S(Z))), Z)$
ist $[0, 1]$ eine Position in t .
 - $Pos(t)$ = die Menge der Positionen eines Terms t
Definition: wenn $t = f(t_1, \dots, t_k)$,
dann $Pos(t) = \{[]\} \cup \{[i-1] \# p \mid 1 \leq i \leq k \wedge p \in Pos(t_i)\}$.
- dabei bezeichnen:
- $[]$ die leere Folge,
 - $[i]$ die Folge der Länge 1 mit Element i ,
 - $\#$ den Verkettungsoperator für Folgen

Operationen mit (Teil)Termen

- $t[p]$ = der Teilterm von t an Position p
Beispiel: $S(f(S(S(Z))), Z)[0, 1] = \dots$
Definition (durch Induktion über die Länge von p): \dots
- $t[p := s]$: wie t , aber mit Term s an Position p
Beispiel: $S(f(S(S(Z))), Z)[0, 1 := S(Z)] = \dots$
Definition (durch Induktion über die Länge von p): \dots

Operationen mit Variablen in Termen

- $Term(\Sigma, V)$ = Menge der Terme über Signatur Σ mit Variablen aus V
Beispiel: $\Sigma = \{Z/0, S/1, f/2\}, V = \{y\}$,
 $f(Z(), y) \in Term(\Sigma, V)$.
- Substitution σ : partielle Abbildung $V \rightarrow Term(\Sigma)$
Beispiel: $\sigma_1 = \{(y, S(Z()))\}$
- eine Substitution auf einen Term anwenden: $t\sigma$
Intuition: wie t , aber statt v immer $\sigma(v)$
Beispiel: $f(Z(), y)\sigma_1 = f(Z(), S(Z()))$
Definition durch Induktion über t

Termersetzungssysteme

- Daten = Terme (ohne Variablen)
- Programm R = Menge von Regeln
Bsp: $R = \{(f(Z(), y), y), (f(S(x), y), S(f(x, y)))\}$
- Regel = Paar (l, r) von Termen mit Variablen
- Relation \rightarrow_R ist Menge aller Paare (t, t') mit
 - es existiert $(l, r) \in R$
 - es existiert Position p in t
 - es existiert Substitution $\sigma : (Var(l) \cup Var(r)) \rightarrow Term(\Sigma)$
 - so daß $t[p] = l\sigma$ und $t' = t[p := r\sigma]$.

Termersetzungssysteme als Programme

- \rightarrow_R beschreibt *einen* Schritt der Rechnung von R ,
- transitive und reflexive Hülle \rightarrow_R^* beschreibt *Folge* von Schritten.
- *Resultat* einer Rechnung ist Term in R -Normalform ($:=$ ohne \rightarrow_R -Nachfolger)

dieses Berechnungsmodell ist im allgemeinen

- *nichtdeterministisch* $R_1 = \{C(x, y) \rightarrow x, C(x, y) \rightarrow y\}$ (ein Term kann mehrere \rightarrow_R -Nachfolger haben, ein Term kann mehrere Normalformen erreichen)
- *nicht terminierend* $R_2 = \{p(x, y) \rightarrow p(y, x)\}$ (es gibt eine unendliche Folge von \rightarrow_R -Schritten, es kann Terme ohne Normalform geben)

Konstruktor-Systeme

Für TRS R über Signatur Σ : Symbol $s \in \Sigma$ heißt

- *definiert*, wenn $\exists(l, r) \in R : l[] = s(\dots)$ (das Symbol in der Wurzel ist s)
- sonst *Konstruktor*.

Das TRS R heißt *Konstruktor-TRS*, falls:

- definierte Symbole kommen links *nur* in den Wurzeln vor

Übung: diese Eigenschaft formal spezifizieren

Beispiele: $R_1 = \{a(b(x)) \rightarrow b(a(x))\}$ über $\Sigma_1 = \{a/1, b/1\}$,

$R_2 = \{f(f(x, y), z) \rightarrow f(x, f(y, z))\}$ über $\Sigma_2 = \{f/2\}$:

definierte Symbole? Konstruktoren? Konstruktor-System?

Funktionale Programme sind ähnlich zu Konstruktor-TRS.

Übung Terme, TRS

- Geben Sie die Signatur des Terms $\sqrt{a \cdot a + b \cdot b}$ an.
- Geben Sie ein Element $t \in \text{Term}(\{f/1, g/3, c/0\})$ an mit $t[1] = c()$.

mit ghci:

- `data T = F T | G T T T | C deriving Show`
erzeugen Sie o.g. Terme (durch Konstruktoraufrufe)

Die *Größe* eines Terms t ist definiert durch

$$|f(t_1, \dots, t_k)| = 1 + \sum_{i=1}^k |t_i|.$$

- Bestimmen Sie $|\sqrt{a \cdot a + b \cdot b}|$.
- Beweisen Sie $\forall \Sigma : \forall t \in \text{Term}(\Sigma) : |t| = |\text{Pos}(t)|$.

Vervollständigen Sie die Definition der *Tiefe* von Termen:

$$\text{depth}(f()) = 0$$

$$k > 0 \Rightarrow \text{depth}(f(t_1, \dots, t_k)) = \dots$$

- Bestimmen Sie $\text{depth}(\sqrt{a \cdot a + b \cdot b})$
- Beweisen Sie $\forall \Sigma : \forall t \in \text{Term}(\Sigma) : \text{depth}(t) < |t|$.

Für die Signatur $\Sigma = \{Z/0, S/1, f/2\}$:

- für welche Substitution σ gilt $f(x, Z)\sigma = f(S(Z), Z)$?
- für dieses σ : bestimmen Sie $f(x, S(x))\sigma$.

Notation für Termersetzungsregeln: anstatt (l, r) schreibe $l \rightarrow r$.

Abkürzung für Anwendung von 0-stelligen Symbolen: anstatt $Z()$ schreibe Z .

- Für $R = \{f(S(x), y) \rightarrow f(x, S(y)), f(Z, y) \rightarrow y\}$ bestimme alle R -Normalformen von $f(S(Z), S(Z))$.

- für $R_d = R \cup \{d(x) \rightarrow f(x, x)\}$ bestimme alle R_d -Normalformen von $d(d(S(Z)))$.

- Bestimme die Signatur Σ_d von R_d .
Bestimme die Menge der Terme aus $\text{Term}(\Sigma_d)$, die R_d -Normalformen sind.

- für die Signatur $\{A/2, D/0\}$:
definiere Terme $t_0 = D, t_{i+1} = A(t_i, D)$.

Zeichne t_3 . Bestimme $|t_i|$.

- für $S = \{A(A(D, x), y) \rightarrow A(x, A(x, y))\}$ bestimme S -Normalform(en), soweit existieren, der Terme t_2, t_3, t_4 . Zusatz: von t_i allgemein.

Abkürzung für mehrfache Anwendung eines einstelligen Symbols: $A(A(A(A(x)))) = A^4(x)$

- für $\{A(B(x)) \rightarrow B(A(x))\}$ über Signatur $\{A/1, B/1, E/0\}$:
bestimme Normalform von $A^k(B^k(E))$ für $k = 1, 2, 3$, allgemein.

- für $\{A(B(x)) \rightarrow B(B(A(x)))\}$

über Signatur $\{A/1, B/1, E/0\}$:
bestimme Normalform von $A^k(B(E))$
für $k = 1, 2, 3$, allgemein.

Programme

Funktionale Programme

... sind spezielle Term-Ersetzungssysteme. Beispiel:

Signatur: S einstellig, Z nullstellig, f zweistellig.

Ersetzungssystem $\{f(Z, y) \rightarrow y, f(S(x'), y) \rightarrow S(f(x', y))\}$.

Startterm $f(S(S(Z)), S(Z))$.

entsprechendes funktionales Programm:

```
data N = Z | S N
f :: N -> N -> N
f x y = case x of
  { Z -> y ; S x' -> S (f x' y) }
```

Aufruf: `f (S (S Z)) (S Z)`

Auswertung = Folge von Ersetzungsschritten \rightarrow_R^*
Resultat = Normalform (hat keine \rightarrow_R -Nachfolger)

Pattern Matching

```
data Tree = Leaf | Branch Tree Tree
size :: Tree -> Int
size t = case t of { ... ; Branch l r -> ... }
```

- **Syntax:** case <Diskriminante> of { <Muster> -> <Ausdruck> ; ... }
- <Muster> enthält Konstruktoren und Variablen, entspricht linker Seite einer Term-Ersetzungs-Regel, <Ausdruck> entspricht rechter Seite
- **statische Semantik:**
 - jedes <Muster> hat gleichen Typ wie <Diskrim.> ,
 - alle <Ausdruck> haben übereinstimmenden Typ.
- **dynamische Semantik:**
 - Def.: t paßt zum Muster l : es existiert σ mit $l\sigma = t$
 - für das erste passende Muster wird $r\sigma$ ausgewertet

Eigenschaften von Case-Ausdrücken

ein case-Ausdruck heißt

- *disjunkt*, wenn die Muster nicht überlappen (es gibt keinen Term, der zu mehr als 1 Muster paßt)
- *vollständig*, wenn die Muster den gesamten Datentyp abdecken (es gibt keinen Term, der zu keinem Muster paßt)

Bespiele (für $\text{data } N = F\ N\ N \mid S\ N \mid Z$)

-- nicht disjunkt:

```
case t of { F (S x) y -> .. ; F x (S y) -> .. }
```

-- nicht vollständig:

```
case t of { F x y -> .. ; Z -> .. }
```

data und case

typisches Vorgehen beim Verarbeiten algebraischer Daten vom Typ T :

- Für jeden Konstruktor des Datentyps

```
data T = C1 ...
       | C2 ...
```

- schreibe einen Zweig in der Fallunterscheidung

```
f x = case x of
      C1 ... -> ...
      C2 ... -> ...
```

- Argumente der Konstruktoren sind Variablen \Rightarrow Case-Ausdruck ist disjunkt und vollständig.

Peano-Zahlen

```
data N = Z | S N
```

```
plus :: N -> N -> N
```

```
plus x y = case x of
```

```
  Z -> y
```

```
  S x' -> S (plus x' y)
```

Aufgaben:

- implementiere Multiplikation, Potenz
- beweise die üblichen Eigenschaften (Addition, Multiplikation sind assoziativ, kommutativ, besitzen neutrales Element)

Pattern Matching in versch. Sprachen

- **Scala:** case classes <http://docs.scala-lang.org/tutorials/tour/case-classes.html>

- **C# (7):** <https://github.com/dotnet/roslyn/blob/features/patterns/docs/features/patterns.md>

- Javascript?

Nicht verwechseln mit *regular expression matching* zur String-Verarbeitung. Es geht um algebraische (d.h. baum-artige) Daten!

Übung Pattern Matching, Programme

- Für die Deklarationen

```
-- data Bool = False | True (aus Prelude)
data T = F T | G T T T | C
```

entscheide/bestimme für jeden der folgenden Ausdrücke:

- syntaktisch korrekt?
- statisch korrekt?
- Resultat (dynamische Semantik)
- disjunkt? vollständig?

```
1. case False of { True -> C }
```

```
2. case False of { C -> True }
```

```
3. case False of { False -> F F }
4. case G (F C) C (F C) of { G x y z -> F z }
5. case F C of { F (F x) -> False }
6. case F C of { F x -> False ; True -> Fal }
7. case True of { False -> C ; True -> F C }
8. case True of { False -> C ; False -> F C }
9. case C of { G x y z -> False; F x -> Fal }
```

- Operationen auf Wahrheitswerten:

```
import qualified Prelude
data Bool = False | True deriving Prelude.S
not :: Bool -> Bool -- Negation
not x = case x of
  ... -> ...
```

```
... -> ...
```

Syntax: wenn nach of kein { folgt:
implizite { ; } durch *Abseitsregel* (layout rule).

- $(\&\&)$:: Bool -> Bool -> Bool
 $x \&\& y = \text{case } \dots \text{ of } \dots$

Syntax: Funktionsname

- beginnt mit Buchstabe: steht vor Argumenten,
- beginnt mit Zeichen: zwischen Argumenten (als Operator)

Operator als Funktion: $(\&\&)$ False True,
Funktion als Operator: True `f` False.

- Listen von Wahrheitswerten:

```
data List = Nil | Cons Bool List deriving E
```

```
and :: List -> Bool  
and l = case l of ...
```

entsprechend `or :: List -> Bool`

- (Wdhlg.) welche Signatur beschreibt binäre Bäume (jeder Knoten hat 2 oder 0 Kinder, die Bäume sind; es gibt keine Schlüssel)

- geben Sie die dazu äquivalente `data`-Deklaration an:
`data T = ...`

- implementieren Sie dafür die Funktionen

```
size :: T -> Prelude.Int
```

```
depth :: T -> Prelude.Int
```

benutze `Prelude.+` (das ist Operator),
`Prelude.min`, `Prelude.max`

- für Peano-Zahlen `data N = Z | S N` implementieren Sie *plus*, *mal*, *min*, *max*

Polymorphie

Definition, Motivation

- Beispiel: binäre Bäume mit Schlüssel vom Typ `e`

```
data Tree e = Leaf  
            | Branch (Tree e) e (Tree e)  
Branch Leaf True Leaf :: Tree Bool  
Branch Leaf 42 Leaf  :: Tree Int
```

- Definition:
ein polymorpher Datentyp ist ein *Typkonstruktor* (= eine Funktion, die Typen auf einen Typ abbildet)
- unterscheide: `Tree` ist der Typkonstruktor, `Branch` ist ein Datenkonstruktor

Beispiele f. Typkonstrukoren (I)

- Kreuzprodukt:

```
data Pair a b = Pair a b
```

- disjunkte Vereinigung:

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

- `data Maybe a = Nothing | Just a`

- Haskell-Notation für Produkte:

```
(1, True) :: (Int, Bool)
```

für 0, 2, 3, ... Komponenten

Beispiele f. Typkonstrukoren (II)

- binäre Bäume

```
data Bin a = Leaf  
           | Branch (Bin a) a (Bin a)
```

- Listen

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

- Bäume

```
data Tree a = Node a (List (Tree a))
```

Polymorphe Funktionen

Beispiele:

- Spiegeln einer Liste:

```
reverse :: forall e . List e -> List e
```

- Verketteten von Listen mit gleichem Elementtyp:

```
append :: forall e . List e -> List e  
        -> List e
```

Knotenreihenfolge eines Binärbaumes:

```
preorder :: forall e . Bin e -> List e
```

Def: der Typ einer polymorphen Funktion beginnt mit All-Quantoren für Typvariablen.

Bsp: Datenkonstrukoren polymorpher Typen.

Bezeichnungen f. Polymorphie

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

- `List` ist ein *Typkonstruktor*
- `List e` ist ein *polymorpher Typ* (ein Typ-Ausdruck mit *Typ-Variablen*)
- `List Bool` ist ein *monomorpher Typ* (entsteht durch *Instantiierung*: Substitution der Typ-Variablen durch Typen)
- polymorphe Funktion:
`reverse :: forall e . List e -> List e`
monomorphe Funktion: `xor :: List Bool -> Bool`
polymorphe Konstante: `Nil :: forall e . List e`

Operationen auf Listen (I)

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

- `append xs ys = case xs of`

```
Nil      ->  
Cons x xs' ->
```

- Übung: formuliere und beweise: `append` ist assoziativ.

- `reverse xs = case xs of`

```
Nil      ->  
Cons x xs' ->
```

- beweise:

```
forall xs . reverse (reverse xs) == xs
```

Operationen auf Listen (II)

Die vorige Implementierung von `reverse` ist (für einfach verkettete Listen) nicht effizient.

Besser ist:

```
reverse xs = rev_app xs Nil
```

mit Spezifikation

```
rev_app xs ys = append (reverse xs) ys
```

Übung: daraus die Implementierung von `rev_app` ableiten

```
rev_app xs ys = case xs of ...
```

Operationen auf Bäumen

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

```
data Bin e = Leaf | Branch (Bin e) e (Bin e)
```

Knotenreihenfolgen

```
• preorder :: forall e . Bin e -> List e  
preorder t = case t of ...
```

• entsprechend `inorder`, `postorder`

• und Rekonstruktionsaufgaben

Adressierung von Knoten (`False` = links, `True` = rechts)

```
• get :: Tree e -> List Bool -> Maybe e
```

```
• positions :: Tree e -> List (List Bool)
```

Übung Polymorphie

Geben Sie alle Elemente dieser Datentypen an:

- `Maybe ()`
- `Maybe (Bool, Maybe ())`
- `Either (Bool, Bool) (Maybe (Maybe Bool))`

Operationen auf Listen:

- `append`, `reverse`, `rev_app`

Operationen auf Bäumen:

- `preorder`, `inorder`, `postorder`, (Rekonstruktion)
- `get`, (`positions`)

Kochrezept: Objektkonstruktion

Aufgabe (Bsp):

```
x :: Either (Maybe ()) (Pair Bool ())
```

Lösung (Bsp):

- der Typ `Either a b` hat Konstruktoren `Left a` | `Right b`. Wähle `Right b`.

Die Substitution für die Typvariablen ist

```
a = Maybe (), b = Pair Bool ()
```

```
x = Right y mit y :: Pair Bool ()
```

- der Typ `Pair a b` hat Konstruktor `Pair a b`.

die Substitution für diese Typvariablen ist

```
a = Bool, b = ()
```

```
y = Pair p q mit p :: Bool, q :: ()
```

- der Typ `Bool` hat Konstruktoren `False` | `True`, wähle `p = False`. der Typ `()` hat Konstruktor `()`, also `q = ()`

Insgesamt `x = Right y = Right (Pair False ())`

Vorgehen (allgemein)

- bestimme den Typkonstruktor
- bestimme die Substitution für die Typvariablen
- wähle einen Datenkonstruktor
- bestimme Anzahl und Typ seiner Argumente
- wähle Werte für diese Argumente nach diesem Vorgehen.

Kochrezept: Typ-Bestimmung

Aufgabe (Bsp.) bestimme Typ von `x` (erstes Arg. von `get`):

```
at :: Position -> Tree a -> Maybe a
```

```
at p t = case t of
```

```
Node f ts -> case p of
```

```
Nil -> Just f
```

```
Cons x p' -> case get x ts of
```

```
Nothing -> Nothing
```

```
Just t' -> at p' t'
```

Lösung:

- bestimme das Muster, durch welches `x` deklariert wird.

Lösung: `Cons x p' ->`

- bestimme den Typ diese Musters

Lösung: ist gleich dem Typ der zugehörigen *Diskriminante* `p`

- bestimme das Muster, durch das `p` deklariert wird
Lösung: `at p t =`

- bestimme den Typ von `p`

Lösung: durch Vergleich mit Typdeklaration von `at` (`p` ist das erste Argument) `p :: Position`, also `Cons x p' :: Position = List N`, also `x :: N`.

Vorgehen zur Typbestimmung eines Namens:

- finde die Deklaration (Muster einer Fallunterscheidung oder einer Funktionsdefinition)
- bestimme den Typ des Musters (Fallunterscheidung: Typ der Diskriminante, Funktion: deklarierter Typ)

Statische Typisierung und Polymorphie

Def: dynamische Typisierung:

- die Daten (zur Laufzeit des Programms, im Hauptspeicher) haben einen Typ

Def: statische Typisierung:

- Bezeichner, Ausdrücke (im Quelltext) haben einen Type (zur Übersetzungszeit bestimmt).

- für *jede* Ausführung des Programms gilt: der statische Typ eines Ausdrucks ist gleich dem dynamischen Typ seines Wertes

Bsp. für Programm ohne statischen Typ (Javascript)

```
function f (x) {  
  if (x>0) { return function () { return 42;  
    else { return "foobar"; } }  
}
```

Dann: Auswertung von $f(1)()$ ergibt 42, Auswertung von $f(0)()$ ergibt Laufzeit-Typfehler.

entsprechendes Haskell-Programm ist statisch fehlerhaft

```
f x = case x > 0 of  
  True  -> \ () -> 42  
  False -> "foobar"
```

Nutzen der statischen Typisierung:

- beim Programmieren: Entwurfsfehler werden zu Typfehlern, diese werden zur Entwurfszeit automatisch erkannt \Rightarrow früher erkannte Fehler lassen sich leichter beheben
- beim Ausführen: es gibt keine Laufzeit-Typfehler \Rightarrow keine Typprüfung zur Laufzeit nötig, effiziente Ausführung

Nutzen der Polymorphie:

- Flexibilität, nachnutzbarer Code, z.B. Anwender einer Collection-Bibliothek legt Element-Typ fest (Entwickler der Bibliothek kennt den Element-Typ nicht)
- gleichzeitig bleibt statische Typsicherheit erhalten

Von der Spezifikation zur Implementierung (I)

Bsp: Addition von Peano-Zahlen $\text{data } N = Z \mid S N$

$\text{plus} :: N \rightarrow N \rightarrow N$

aus der Typdeklaration wird abgeleitet:

```
plus x y = case x of  
  Z      ->  
  S x'   ->
```

erster Zweig: $\text{plus } Z \ y = 0 + y = y$

zweiter Zweig: $\text{plus } (S \ x') \ y = (1 + x') + y =$

mit Assoziativität von $+$ gilt

$\dots = 1 + (x' + y) = S (\text{plus } x' \ y)$

Bsp. (Ü): Multiplikation. Hinweis: benutze Distributivgesetz.

Von der Spezifikation zur Implementierung (II)

Bsp: homogene Listen

$\text{data List } a = \text{Nil} \mid \text{Cons } a \ (\text{List } a)$

Aufgabe: implementiere $\text{maximum} :: \text{List } N \rightarrow N$

Spezifikation:

$\text{maximum } (\text{Cons } x1 \ \text{Nil}) = x1$

$\text{maximum } (\text{append } xs \ ys) = \max (\text{maximum } xs) \ (\text{maximum } ys)$

- substituiere $xs = \text{Nil}$, erhalte

```
maximum (append Nil ys) = maximum ys  
= max (maximum Nil) (maximum ys)
```

d.h. maximum Nil sollte das neutrale Element für \max (auf natürlichen Zahlen) sein, also 0 (geschrieben Z).

- substituiere $xs = \text{Cons } x1 \ \text{Nil}$, erhalte

```
maximum (append (Cons x1 Nil) ys)  
= maximum (Cons x1 ys)  
= max (maximum (Cons x1 Nil)) (maximum ys)  
= max x1 (maximum ys)
```

Damit kann der aus dem Typ abgeleitete Quelltext

```
maximum :: List N -> N  
maximum xs = case xs of  
  Nil      ->  
  Cons x xs' ->
```

ergänzt werden.

Vorsicht: für \min , minimum funktioniert das nicht so, denn \min hat für N kein neutrales Element.

Funktionen

Funktionen als Daten

- bisher: Programm ist Regel(menge), $f \ x = 2 * x + 5$
- jetzt: Programm ist Lambda-Term

```
f = \ x -> 2 * x + 5
```

λ -Terme: mit lokalen Namen

- Funktionsanwendung: Substitution
(der freien Vorkommen von x)
 $(\lambda x.B)A \rightarrow B[x := A]$

- λ -Kalkül: Alonzo Church 1936, Henk Barendregt 198*

Der Lambda-Kalkül

... als weiteres Berechnungsmodell,
(vgl. Termersetzungssysteme, Turingmaschine,
Random-Access-Maschine)

Syntax: die Menge der Lambda-Terme Λ ist

- jede Variable ist ein Term: $v \in V \Rightarrow v \in \Lambda$

- Funktionsanwendung (Applikation):

$F \in \Lambda, A \in \Lambda \Rightarrow (FA) \in \Lambda$

- Funktionsdefinition (Abstraktion):

$v \in V, B \in \Lambda \Rightarrow (\lambda v.B) \in \Lambda$

Semantik: eine Relation \rightarrow_β auf Λ

(vgl. \rightarrow_R für Termersetzungssystem R)

Freie und gebundene Variablen(vorkommen)

- Das Vorkommen von $v \in V$ an Position p in Term t heißt *frei*, wenn „darüber kein $\lambda v \dots$ steht“
- Def. $\text{fvar}(t) =$ Menge der in t frei vorkommenden Variablen (definiere durch strukturelle Induktion)

- Eine Variable x heißt in A *gebunden*, falls A einen Teilausdruck $\lambda x.B$ enthält.

- Def. $\text{bvar}(t) =$ Menge der in t gebundenen Variablen

Bsp: $\text{fvar}(x(\lambda x.\lambda y.x)) = \{x\}$, $\text{bvar}(x(\lambda x.\lambda y.x)) = \{x, y\}$,

Semantik des Lambda-Kalküls: Reduktion \rightarrow_β

Relation \rightarrow_β auf Λ (ein Reduktionsschritt)

Es gilt $t \rightarrow_\beta t'$, falls

- $\exists p \in \text{Pos}(t)$, so daß
- $t[p] = (\lambda x. B)A$ mit $\text{bvar}(B) \cap \text{fvar}(A) = \emptyset$
- $t' = t[p := B[x := A]]$

dabei bezeichnet $B[x := A]$ ein Kopie von B , bei der jedes freie Vorkommen von x durch A ersetzt ist

Ein (Teil-)Ausdruck der Form $(\lambda x. B)A$ heißt *Redex*.

(Dort kann weitergerechnet werden.)

Ein Term ohne Redex heißt *Normalform*.

(Normalformen sind Resultate von Rechnungen.)

Semantik ... : gebundene Umbenennung \rightarrow_α

- Relation \rightarrow_α auf Λ , beschreibt *gebundene Umbenennung* einer lokalen Variablen.

- Beispiel $\lambda x. f x z \rightarrow_\alpha \lambda y. f y z$.

(f und z sind frei, können nicht umbenannt werden)

- Definition $t \rightarrow_\alpha t'$:

- $\exists p \in \text{Pos}(t)$, so daß $t[p] = (\lambda x. B)$
- $y \notin \text{bvar}(B) \cup \text{fvar}(B)$
- $t' = t[p := \lambda y. B[x := y]]$

- wird angewendet, um $\text{bvar}(B) \cap \text{fvar}(A) = \emptyset$ in Regel für \rightarrow_β zu erfüllen.

Bsp: betrachte den unterstrichenen Redex in

$(\lambda x. ((\lambda f. (\lambda x. (x + f 8))) (\lambda y. (x + y)))) 3$

Umbenennung von lokalen Variablen

```
int x = 3;
int f(int y) { return x + y; }
int g(int x) { return (x + f(8)); }
// g(5) => 16
```

Darf $f(8)$ ersetzt werden durch $f[y := 8]$? - Nein:

```
int x = 3;
int g(int x) { return (x + (x+8)); }
// g(5) => 18
```

Das freie x in $(x + y)$ wird fälschlich gebunden.

Lösung: lokal umbenennen

```
int g(int z) { return (z + f(8)); }
dann ist Ersetzung erlaubt
int x = 3;
int g(int z) { return (z + (x+8)); }
// g(5) => 16
```

Lambda-Terme: verkürzte Notation

- Applikation ist links-assoziativ, Klammern weglassen:

$$(\dots ((F A_1) A_2) \dots A_n) \sim F A_1 A_2 \dots A_n$$

Beispiel: $((xz)(yz)) \sim xz(yz)$

Wirkt auch hinter dem Punkt:

$(\lambda x. xx)$ bedeutet $(\lambda x. (xx))$ — und nicht $((\lambda x. x)x)$

- geschachtelte Abstraktionen unter ein Lambda schreiben:

$$(\lambda x_1. (\lambda x_2. \dots (\lambda x_n. B) \dots)) \sim \lambda x_1 x_2 \dots x_n. B$$

Beispiel: $\lambda x. \lambda y. \lambda z. B \sim \lambda x y z. B$

Ein- und mehrstellige Funktionen

eine einstellige Funktion zweiter Ordnung:

```
f = \ x -> ( \ y -> ( x*x + y*y ) )
```

Anwendung dieser Funktion:

```
(f 3) 4 = ...
```

Kurzschreibweisen (Klammern weglassen):

```
f = \ x y -> x * x + y * y ; f 3 4
```

Übung:

gegeben $t = \lambda f x \rightarrow f (f x)$

bestimme $t \text{ succ } 0, t t \text{ succ } 0,$

$t t t \text{ succ } 0, t t t t \text{ succ } 0, \dots$

Typen

für nicht polymorphe Typen: tatsächlicher Argumenttyp muß mit deklariertem Argumenttyp übereinstimmen:

wenn $f :: A \rightarrow B$ und $x :: A$, dann $(fx) :: B$.

bei polymorphen Typen können der Typ von $f :: A \rightarrow B$ und der Typ von $x :: A'$ Typvariablen enthalten.

Beispiel: $\lambda x. x :: \forall t. t \rightarrow t$.

Dann müssen A und A' nicht übereinstimmen, sondern nur *unifizierbar* sein (eine gemeinsame Instanz besitzen).

Beispiel: $(\lambda x. x) \text{True}$

benutze Typ-Substitution $\sigma = \{(t, \text{Bool})\}$.

Bestimme allgemeinsten Typ von $t = \lambda f x. f(fx)$, von (tt) .

Beispiel für Typ-Bestimmung

Aufgabe: bestimme den allgemeinsten Typ von $\lambda f x. f(fx)$

- Ansatz mit Typvariablen $f :: t_1, x :: t_2$
- betrachte (fx) : der Typ von f muß ein Funktionstyp sein, also $t_1 = (t_{11} \rightarrow t_{12})$ mit neuen Variablen t_{11}, t_{12} .
Dann gilt $t_{11} = t_2$ und $(fx) :: t_{12}$.
- betrachte $f(fx)$. Wir haben $f :: t_{11} \rightarrow t_{12}$ und $(fx) :: t_{12}$, also folgt $t_{11} = t_{12}$. Dann $f(fx) :: t_{12}$.
- betrachte $\lambda x. f(fx)$.
Aus $x :: t_{12}$ und $f(fx) :: t_{12}$ folgt $\lambda x. f(fx) :: t_{12} \rightarrow t_{12}$.
- betrachte $\lambda f. (\lambda x. f(fx))$.
Aus $f :: t_{12} \rightarrow t_{12}$ und $\lambda x. f(fx) :: t_{12} \rightarrow t_{12}$ folgt $\lambda f x. f(fx) :: (t_{12} \rightarrow t_{12}) \rightarrow (t_{12} \rightarrow t_{12})$

Verkürzte Notation für Typen

- Der Typ-Pfeil ist *rechts-assoziativ*:

$T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow \dots \rightarrow T_n \rightarrow T$ bedeutet
 $(T_1 \rightarrow (T_2 \rightarrow \dots \rightarrow (T_n \rightarrow T) \dots))$

- das paßt zu den Abkürzungen für mehrstellige Funktionen:

$\lambda(x :: T_1). \lambda(x :: T_2). (B :: T)$

hat den Typ $(T_1 \rightarrow (T_2 \rightarrow B))$,

mit o.g. Abkürzung $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T$.

Lambda-Ausdrücke in C#

- Beispiel (Fkt. 1. Ordnung)

```
Func<int,int> f = (int x) => x*x;  
f (7);
```

- Übung (Fkt. 2. Ordnung) — ergänze alle Typen:

```
??? t = (??? g) => (??? x) => g (g (x));  
t (f) (3);
```

- Anwendungen bei Streams, später mehr

```
(new int[]{3,1,4,1,5,9}).Select(x => x * 2);  
(new int[]{3,1,4,1,5,9}).Where(x => x > 3);
```

- Übung: Diskutiere statische/dynamische Semantik von

```
(new int[]{3,1,4,1,5,9}).Select(x => x > 3);  
(new int[]{3,1,4,1,5,9}).Where(x => x * 2);
```

Lambda-Ausdrücke in Java(8)

funktionales Interface (FI): hat genau eine Methode
Lambda-Ausdruck („burger arrow“) erzeugt Objekt einer
anonymen Klasse, die FI implementiert.

```
interface I { int foo (int x); }  
I f = (x)-> x+1;  
System.out.println (f.foo(8));
```

vordefinierte FIs:

```
import java.util.function.*;
```

```
Function<Integer,Integer> g = (x)-> x*2;
```

```
System.out.println (g.apply(8));
```

```
Predicate<Integer> p = (x)-> x > 3;
```

```
if (p.test(4)) { System.out.println ("foo
```

Lambda-Ausdrücke in Javascript

```
$ node
```

```
> let f = function (x){return x+3;}  
undefined
```

```
> f(4)  
7
```

```
> ((x) => (y) => x+y) (3) (4)  
7
```

```
> ((f) => (x) => f(f(x))) ((x) => x+1) (0)  
2
```

Beispiele Fkt. höherer Ord.

- Haskell-Notation für Listen:

```
data List a = Nil | Cons a (List a)  
data [a] = [] | a : [a]
```

- Verarbeitung von Listen:

```
filter :: (a -> Bool) -> [a] -> [a]  
takeWhile :: (a -> Bool) -> [a] -> [a]  
partition :: (a -> Bool) -> [a] -> ([a],[a])
```

- Vergleichen, Ordnen:

```
nubBy :: (a -> a -> Bool) -> [a] -> [a]  
data Ordering = LT | EQ | GT  
minimumBy  
  :: (a -> a -> Ordering) -> [a] -> a
```

Übung Lambda-Kalkül

- Wiederholung: konkrete Syntax, abstrakte Syntax, Semantik

- $S = \lambda xyz.xz(yz)$, $K = \lambda ab.a$, Normalform von $SKKc$

- (mit $\text{data } N=Z \mid S \mid N$) bestimme Normalform von $ttSZ$ für $t = \lambda fx.f(fx)$,

- definiere Λ als algebraischen Datentyp $\text{data } L = \dots$ (3 Konstruktoren)

```
implementiere size :: L -> Int,  
depth :: L -> Int.
```

```
implementiere bvar :: L -> S.Set String,
```

```
fvar :: L -> S.Set String,
```

siehe Folie mit Definitionen und dort angegebene
Testfälle

benutze `import qualified Data.Set as S`,
API-Dokumentation: <https://hackage.haskell.org/package/containers/docs/Data-Set.html>

- autotool-Aufgaben Lambda-Kalkül

Übung Fkt. höherer Ordnung

- Typisierung, Beispiele in Haskell, C#, Java, Javascript

```
compose ::  
compose = \ f g -> \ x -> f (g x)
```

- Implementierung von `takeWhile`, `dropWhile`

Rekursionsmuster

Rekursion über Bäume (Beispiele)

```
data Tree a = Leaf  
            | Branch (Tree a) a (Tree a)
```

```
summe :: Tree Int -> Int
```

```
summe t = case t of
```

```
  Leaf -> 0
```

```
  Branch l k r -> summe l + k + summe r
```

```
preorder :: Tree a -> List a
```

```
preorder t = case t of
```

```
  Leaf -> Nil
```

```
  Branch l k r ->
```

```
    Cons k (append (preorder l) (preorder r))
```

Rekursion über Bäume (Schema)

```
f :: Tree a -> b
f t = case t of
  Leaf -> ...
  Branch l k r -> ... (f l) k (f r)
dieses Schema ist eine Funktion höherer Ordnung:
fold :: ( ... ) -> ( ... ) -> ( Tree a -> b
fold leaf branch = \ t -> case t of
  Leaf -> leaf
  Branch l k r ->
    branch (fold leaf branch l)
      k (fold leaf branch r)
summe = fold 0 ( \ l k r -> l + k + r )
```

Rekursion über Listen

```
and :: List Bool -> Bool
and xs = case xs of
  Nil -> True ; Cons x xs' -> x && and xs'
length :: List a -> N
length xs = case xs of
  Nil -> Z ; Cons x xs' -> S (length xs')
fold :: b -> ( a -> b -> b ) -> List a -> b
fold nil cons xs = case xs of
  Nil -> nil
  Cons x xs' -> cons x ( fold nil cons xs'
and = fold True (&&)
length = fold Z ( \ x y -> S y)
```

Rekursionsmuster (Prinzip)

```
data List a = Nil | Cons a (List a)
fold ( nil :: b ) ( cons :: a -> b -> b )
  :: List a -> b
```

Rekursionsmuster anwenden

= jeden Konstruktor durch eine passende Funktion ersetzen

= (Konstruktor-)Symbole *interpretieren* (durch Funktionen)

= eine *Algebra* angeben.

```
length = fold Z ( \ _ l -> S l )
reverse = fold Nil ( \ x ys ->          )
```

Rekursionsmuster (Merksätze)

aus dem Prinzip *ein Rekursionsmuster anwenden* = *jeden Konstruktor durch eine passende Funktion ersetzen* folgt:

- Anzahl der Muster-Argumente = Anzahl der Konstruktoren (plus eins für das Datenargument)
- Stelligkeit eines Muster-Argumentes = Stelligkeit des entsprechenden Konstruktors
- Rekursion im Typ \Rightarrow Rekursion im Muster (Bsp: zweites Argument von Cons)
- zu jedem rekursiven Datentyp gibt es *genau ein* passendes Rekursionsmuster

Rekursion über Listen (Übung)

das vordefinierte Rekursionsschema über Listen ist:

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

```
length = foldr ( \ x y -> 1 + y ) 0
```

Beachte:

- Argument-Reihenfolge (erst cons, dann nil)
- foldr nicht mit foldl verwechseln (foldr ist das „richtige“)

Aufgaben:

- append, reverse, concat, inits, tails mit foldr (d. h., ohne Rekursion)

Weitere Beispiele für Folds

```
data Tree a = Leaf a | Branch (Tree a) (Tree a)
```

```
fold :: ...
```

- Anzahl der Blätter
- Anzahl der Verzweigungsknoten
- Summe der Schlüssel
- die Tiefe des Baumes
- der größte Schlüssel

Rekursionsmuster (Peano-Zahlen)

```
data N = Z | S N
fold :: ...
fold z s n = case n of
  Z ->
  S n' ->
plus = fold ...
times = fold ...
```

Übung Rekursionsmuster

- Rekursionsmuster foldr für Listen benutzen (filter, takeWhile, append, reverse, concat, inits, tails)
- Rekursionsmuster für Peano-Zahlen hinschreiben und benutzen (plus, mal, hoch, Nachfolger, Vorgänger, minus)
- Rekursionsmuster für binäre Bäume mit Schlüsseln *nur in den Blättern* hinschreiben und benutzen
- Rekursionsmuster für binäre Bäume mit Schlüsseln *nur in den Verzweigungsknoten* benutzen für rekursionslose Programme für:
 - Anzahl der Branch-Knoten ist ungerade (nicht zählen!)
 - Baum (Tree a) erfüllt die AVL-Bedingung

Hinweis: als Projektion auf die erste Komponente eines `fold`, das Paar von `Bool` (ist AVL-Baum) und `Int` (Höhe) berechnet.

- Baum (`Tree Int`) ist Suchbaum (ohne `inorder`)
Hinweis: als Projektion. Bestimme geeignete Hilfsdaten.

- Wende die Vorschrift zur Konstruktion des Rekursionsmusters an auf den Typ

- `Bool`
- `Maybe a`

Jeweils:

- Typ und Implementierung
- Testfälle
- gibt es diese Funktion bereits? Suche nach dem Typ mit

<https://www.stackage.org/lts-5.17/hoogle>

Stelligkeit von Funktionen

- ist `fold` in `double` richtig benutzt? Ja!

```
fold :: r -> (r -> r) -> N -> r
double :: N -> N
double = fold Z (\ x -> S (S x))
double (S (S Z)) :: N
```

- beachte Unterschied zwischen:

- Term-Ersetzung: Funktionssymbol \rightarrow Stelligkeit
abstrakter Syntaxbaum: Funktionss. über Argumenten
- Lambda-Kalkül: nur einstellige Funktionen
AST: Applikationsknoten, Funkt.-Symb. links unten.
Simulation mehrstelliger Funktionen wegen
Isomorphie zwischen $(A \times B) \rightarrow C$ und $A \rightarrow (B \rightarrow C)$

- `case`: Diskriminante u. Muster müssen `data`-Typ haben

Nützliche Funktionen höherer Ordnung

- `compose :: (b -> c) -> (a -> b) -> a -> c`
aus dem Typ folgt schon die Implementierung!

```
compose f g x = ...
```

diese Funktion in der Standard-Bibliothek:
der Operator `.` (Punkt)

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

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

das ist der Operator `$` (Dollar) ... ist *rechts-assoziativ*

- `flip :: ...`

```
flip f x y = f y x
```

wie lautet der (allgemeinste) Typ?

Argumente für Rekursionsmuster finden

Vorgehen zur Lösung der Aufgabe:

„Schreiben Sie Funktion $f : T \rightarrow R$ als `fold`“

- eine Beispiel-Eingabe ($t \in T$) notieren (Baum zeichnen)

- für jeden Teilbaum s von t , der den Typ T hat:

den Wert von $f(s)$ in (neben) Wurzel von s schreiben

- daraus Testfälle für die Funktionen ableiten,
die Argumente des Rekursionsmusters sind.

Beispiel: `data N = Z | S N,`

$f : N \rightarrow \text{Bool}$, $f(x) = \text{„}x \text{ ist ungerade“}$

Nicht durch Rekursionmuster darstellbare Fkt.

- Beispiel: `data N = Z | S N,`

$f : N \rightarrow \text{Bool}$, $f(x) = \text{„}x \text{ ist durch 3 teilbar“}$

- wende eben beschriebenes Vorgehen an,

- stelle fest, daß die durch Testfälle gegebene Spezifikation nicht erfüllbar ist

- Beispiel: binäre Bäume mit Schlüssel in
Verzweigungsknoten,

$f : \text{Tree } k \rightarrow \text{Bool}$,

$f(t) = \text{„}t \text{ ist höhen-balanciert (erfüllt die AVL-Bedingung)“}$

Darstellung als `fold` mit Hilfswerten

- $f : \text{Tree } k \rightarrow \text{Bool}$,

$f(t) = \text{„}t \text{ ist höhen-balanciert (erfüllt die AVL-Bedingung)“}$

ist nicht als `fold` darstellbar

- $g : \text{Tree } k \rightarrow \text{Pair Bool Int}$

$g(t) = (f(t), \text{height}(t))$

ist als `fold` darstellbar

Spezialfälle des `fold`

- jeder Konstruktor durch sich selbst ersetzt, mit
unveränderten Argumenten: *identische* Abbildung

```
data List a = Nil | Cons a (List a)
fold :: r -> (a -> r -> r) -> List a -> r
fold Nil Cons (Cons 3 (Cons 5 Nil))
```

- jeder Konstruktor durch sich,
mit transformierten Argumenten:

```
fold Nil (\x y -> Cons (not x) y)
      (Cons True (Cons False Nil))
```

struktur-erhaltende Abbildung. Diese heißt *map*.

Weitere Übungsaufgaben zu Fold

- `data List a = Nil | Cons a (List a)`
`fold :: r -> (a -> r -> r) -> List a -> r`
- schreibe mittels `fold` (ggf. verwende `map`)
 - `inits, tails :: List a -> List (List a)`
`inits [1,2,3] = [[], [1], [1,2], [1,2,3]]`
`tails [1,2,3] = [[1,2,3], [2,3], [3], []]`
 - `filter :: (a -> Bool) -> List a -> List a`
`filter odd [1,8,2,7,3] = [1,7,3]`
 - `partition :: (a -> Bool) -> List a -> Pair (List a) (List a)`
`partition odd [1,8,2,7,3]`
`= Pair [1,7,3] [8,2]`

– Typeset by FoilTeX –

104

Objektorientierte Entwurfsmuster

Definition, Geschichte

- Ziel: flexibel wiederverwendbarer sicherer Quelltext
- Lösung: *Funktionen höherer Ordnung*
- Simulation davon im OO-Paradigma: *Entwurfsmuster*
wir wollen: Funktion als Datum (z.B. Lambda-Ausdruck),
wir konstruieren: Objekt, das zu einer (anonymen) Klasse gehört, die diese Funktion als Methode enthält.
- Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, John Vlissides: *Entwurfsmuster (design patterns)* — Elemente wiederverwendbarer objektorientierter Software, Addison-Wesley 1996.

– Typeset by FoilTeX –

105

Beispiel Strategie-Muster

- Aufgabe: Sortieren einer Liste bzgl. wählbarer Ordnung auf Elementen.
- Lösung (in `Data.List`)

```
data Ordering = LT | EQ | GT
sortBy :: (a -> a -> Ordering) -> List a -> List a
```

(Ü: implementiere durch unbalancierten Suchbaum)

- Simulation (in `java.util.*`)

```
interface Comparator<T> { int compare(T x, T y); }
static <T> void sort(List<T> list, Comparator<T> c);
```

hier ist `c` ein *Strategie-Objekt*

– Typeset by FoilTeX –

106

Algebraische Datentypen in OOP

Kompositum: Motivation

- Bsp: Gestaltung von zusammengesetzten Layouts. Modell als algebraischer Datentyp:

```
data Component = JButton { ... }
                | Container (List Component)
```

- Simulation durch Entwurfsmuster *Kompositum*:
 - `abstract class Component`
 - `class JButton extends Component`
 - `class Container extends Component`
 - `{ void add (Component c); }`

– Typeset by FoilTeX –

107

Kompositum: Beispiel

```
public class Composite {
    public static void main(String[] args) {
        JFrame f = new JFrame ("Composite");
        f.setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE);
        Container c = new JPanel (new BorderLayout());
        c.add (new JButton ("foo"), BorderLayout.CENTER);
        f.getContentPane().add(c);
        f.pack(); f.setVisible(true);
    }
}
```

Übung: geschachtelte Layouts bauen, vgl.

<http://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/edu/ws06/informatik/manage/>

– Typeset by FoilTeX –

108

Kompositum: Definition

- Definition: *Kompositum* = algebraischer Datentyp (ADT)
- ADT `data T = .. | C .. T ..`
als Kompositum:
 - Typ `T` \Rightarrow gemeinsame Basisklasse (interface)
 - jeder Konstruktor `C` \Rightarrow implementierende Klasse
 - jedes Argument des Konstruktors \Rightarrow Attribut der Klasse
 - diese Argumente können `T` benutzen (rekursiver Typ)

(Vorsicht: Begriff und Abkürzung nicht verwechseln mit *abstrakter* Datentyp = ein Typ, dessen Datenkonstruktoren wir *nicht* sehen)

– Typeset by FoilTeX –

109

Binäre Bäume als Komposita

- Knoten sind *innere* (Verzweigung) und *äußere* (Blatt).
 - Die richtige Realisierung ist Kompositum
- ```
interface Tree<K>;
class Branch<K> implements Tree<K>;
class Leaf<K> implements Tree<K>;
```
- Schlüssel: in allen Knoten, nur innen, nur außen.

der entsprechende algebraische Datentyp ist:

```
data Tree k = Leaf { ... }
 | Branch { left :: Tree k , ...
 , right :: Tree k }
```

Übung: Anzahl aller Blätter, Summe aller Schlüssel (Typ?), der größte Schlüssel (Typ?)

– Typeset by FoilTeX –

110

## Kompositum-Vermeidung

Wenn Blätter keine Schlüssel haben, geht es musterfrei?

```
class Tree<K> {
 Tree<K> left; K key; Tree<K> right;
}
```

Der entsprechende algebraische Datentyp ist

```
data Tree k =
 Tree { left :: Maybe (Tree k)
 , key :: k
 , right :: Maybe (Tree k)
 }
```

erzeugt in Java das Problem, daß ...

Übung: betrachte Implementierung in `java.util.Map<K,V>`

– Typeset by FoilTeX –

111

## Maybe = Nullable

Algebraischer Datentyp (Haskell):

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

http:

```
//hackage.haskell.org/packages/archive/
base/latest/doc/html/Prelude.html#t:Maybe
```

In Sprachen mit Verweisen (auf Objekte vom Typ  $O$ ) gibt es häufig auch „Verweis auf kein Objekt“ — auch vom Typ  $O$ .  
Deswegen *null pointer exceptions*.

Ursache ist Verwechslung von `Maybe a` mit `a`.

Trennung in C#: `Nullable<T>` (für primitive Typen  $T$ )

```
http://msdn.microsoft.com/en-us/library/
2cf62fcy.aspx
```

## Alg. DT und Pattern Matching in Scala

<http://scala-lang.org>

algebraische Datentypen:

```
abstract class Tree[A]
case class Leaf[A](key: A) extends Tree[A]
case class Branch[A]
 (left: Tree[A], right: Tree[A])
 extends Tree[A]
```

pattern matching:

```
def size[A](t: Tree[A]): Int = t match {
 case Leaf(k) => 1
 case Branch(l, r) => size(l) + size(r)
}
```

beachte: Typparameter in eckigen Klammern

## Objektorientierte Rekursionsmuster

### Plan

- algebraischer Datentyp = Kompositum  
(Typ  $\Rightarrow$  Interface, Konstruktor  $\Rightarrow$  Klasse)

- Rekursionsschema = Besucher (Visitor)  
(Realisierung der Fallunterscheidung)

(Zum Vergleich von Java- und Haskell-Programmierung)  
sagte bereits Albert Einstein: *Das Holzhacken ist deswegen so beliebt, weil man den Erfolg sofort sieht.*

## Kompositum und Visitor

Definition eines Besucher-Objektes

(für Rekursionsmuster mit Resultattyp  $R$  über `Tree<A>`)

entspricht einem Tupel von Funktionen

```
interface Visitor<A,R> {
 R leaf(A k);
 R branch(R x, R y); }
```

Empfangen eines Besuchers:

durch jeden Teilnehmer des Kompositums

```
interface Tree<A> { ..
 <R> R receive (Visitor<A,R> v); }
```

- Implementierung
- Anwendung (Blätter zählen, Tiefe, Spiegelbild)

## Aufgabe: Besucher für Listen

Schreibe das Kompositum für

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

und den passenden Besucher. Benutze für

- Summe, Produkt für `List<Integer>`
- Und, Oder für `List<Boolean>`
- Wert als gespiegelte Binärzahl (LSB ist links)  
Bsp: `[1,1,0,1] ==> 11`

Quellentexte aus Vorlesung (Eclipse-Projekt)

Repository: <https://gitlab.imn.htwk-leipzig.de/waldmann/fop-ss17>, Pfad im Repository: `java`.

## Polymorphie

### Arten der Polymorphie

- generische Polymorphie: erkennbar an Typvariablen  
zur *Übersetzungszeit* werden Typvariablen durch konkrete Typen substituiert,
- dynamische Polymorphie ( $\approx$  Objektorientierung)  
erkennbar an `implements` zw. Klasse und Schnittstelle  
zur *Laufzeit* wird Methodenimplementierung ausgewählt

moderne OO-Sprachen (u.a. Java, C#) bieten *beide* Formen der Polymorphie

*mit* statischer Sicherheit (d.h. statische Garantie, daß zur Laufzeit keine Methoden fehlen)

## Java-Notation f. generische Polymorphie

generischer *Typ* (Typkonstruktor):

- Deklaration der Typparameter: `class C<S,T> {..}`
- bei Benutzung Angabe der Typargumente (Pflicht):  

```
{ C<Boolean,Integer> x = ... }
```

statische generische *Methode*:

- Deklaration: `class C { static <T> int f(T x) }`
- Benutzung: `C.<Integer>f (3)`

Typargumente können auch inferiert werden.

(Übung: Angabe der Typargumente für polymorphe nicht statische Methode)

## Beispiel f. dynamische Polymorphie

```
interface I { int m (); }
class A implements I
 { int m () { return 0; } }
class B implements I
 { int m () { return 1; } }
I x = // statischer Typ von x ist I
 new A(); // dynamischer Typ ist hier A
System.out.println (x.m());
x = new B(); // dynamischer Typ ist jetzt B
System.out.println (x.m());
```

- statischer Typ: eines Bezeichners im Programmtext
- dynamischer Typ: einer Stelle im Speicher

## Klassen, Schnittstellen und Entwurfsmuster

- FP-Sichtweise: Entwurfsmuster = Fkt. höherer Ordnung
- OO-Sichtweise: E.M. = nützliche Beziehung zw. Klassen  
... die durch Schnittstellen ausgedrückt wird.  
⇒ Verwendung von konkreten Typen (Klassen) *ist ein Code Smell*, es sollen soweit möglich abstrakte Typen (Schnittstellen) sein. (Ü: diskutiere IEnumerableable)
- insbesondere: in Java (ab 8):  
*funktionales Interface* = hat genau eine Methode  
eine implementierende anonyme Klasse kann als Lambda-Ausdruck geschrieben werden

## Erzwingen von Abstraktionen

- `interface I { .. }`  
`class C implements I { .. } ;`  
Wie kann `C x = new C()` verhindert werden,  
und `I x = new C()` erzwungen?
- Ansatz: `class C { private C() { } }`  
aber dann ist auch `I x = new C()` verboten.
- Lösung: Fabrik-Methode  
`class C { ..`  
`static I make () { return new C (); } }`

## Das Fabrik-Muster

```
interface I { }
class A implements I { A (int x) { .. } }
class B implements I { B (int x) { .. } }
die Gemeinsamkeit der Konstruktoren kann nicht in I
ausgedrückt werden.
interface F // abstrakte Fabrik
{ I construct (int x); }
class FA implements F // konkrete Fabrik
{ I construct (int x) { return new A(x); } }
class FB implements F { .. }
main () {
 F f = Eingabe ? new FA() : new FB();
 I o1=f.construct(3); I o2=f.construct(4);
}
```

## Typklassen in Haskell: Überblick

- in einfachen Anwendungsfällen:  
Typklasse in Haskell ~ Schnittstelle in OO:  
beschreibt Gemeinsamkeit von konkreten Typen
- – Bsp. der Typ hat eine totale Ordnung  
Haskell: `class Ord a`, Java:  
`interface Comparable<E>`  
– Bsp. der Typ besitzt Abbildung nach String  
Haskell `class Show a`, Java?
- unterschiedliche Benutzung und Implementierung  
Haskell - statisch, OO - dynamisch

## Beispiel

```
sortBy :: (a -> a -> Ordering) -> [a] -> [a]
sortBy (\ x y -> ...) [False, True, False]
Kann mit Typklassen so formuliert werden:
class Ord a where
 compare :: a -> a -> Ordering
sort :: Ord a => [a] -> [a]
instance Ord Bool where compare x y = ...
sort [False, True, False]
• sort hat eingeschränkt polymorphen Typ
• die Einschränkung (das Constraint Ord a) wird in ein
zusätzliches Argument (eine Funktion) übersetzt.
Entspricht OO-Methodentabelle, liegt aber statisch fest.
```

## Unterschiede Typklasse/Interface (Bsp)

- Typklasse/Schnittstelle  
`class Show a where show :: a -> String`  
`interface Show { String show (); }`
- Instanzen/Implementierungen  
`data A = .. ; instance Show A where ..`  
`class A implements Show { .. } entspr. für B`
- in Java ist Show ein Typ:  
`static String showList(List<Show> xs) { ..`  
`showList (Arrays.asList (new A(),new B()))`  
in Haskell ist Show ein Typconstraint und kein Typ:  
`showList :: Show a => List a -> String`  
`showList [A,B] ist Typfehler`

## Typklassen können mehr als Interfaces

in Java, C#, ... kann Schnittstelle (interface) in Deklarationen wie Typ (class) benutzt werden, das ist 1. praktisch, aber nur 2. soweit es eben geht

- (?) Fkt. mit > 1 Argument, Bsp. `compareTo`,  
`static <T extends Comparable<? super T>>`  
`void sort(List<T> list)`
- (–) Beziehungen zwischen mehreren Typen,  
`class Autotool problem solution`
- (–) Typkonstruktorklassen,  
`class Foldable c where toList :: c a -> [a]`  
`data Tree a = ..; instance Foldable Tree`  
(wichtig für fortgeschrittene Haskell-Programmierung)

## Grundwissen Typklassen

- Typklasse schränkt statische Polymorphie ein  
(Typvariable darf nicht beliebig substituiert werden)
- Einschränkung realisiert durch *Wörterbuch*-Argument  
(W.B. = Methodentabelle, Record von Funktionen)
- durch Instanz-Deklaration wird Wörterbuch erzeugt
- bei Benutzung einer eingeschränkt polymorphen Funktion: passendes Wörterbuch wird statisch bestimmt
- nützliche, häufige Typklassen: Show, Read, Eq, Ord.  
(`Test.SmallCheck.Serial`, `Foldable`, `Monad`, ...)
- Instanzen automatisch erzeugen mit `deriving`

## Übung Polymorphie

- Deklarationen von `compare` (Haskell), `compareTo` (Java), `(==)` (Haskell), `equals` (Java)

- Unterschiede feststellen und begründen

```
new Integer(3).compareTo(new Boolean(true))
compare (3 :: Integer) (True :: Bool)
new Integer(3).equals(new Boolean(true))
(3 :: Integer) == (True :: Bool)
```

- `data C = D | E deriving (Eq, Show)`  
`instance Ord C where compare x y = ...`

- nach Java übersetzen:

```
data Pair a b = Pair { first :: a, second :: b }
```

Testfall für Konstruktor-Aufruf und Zugriff auf Komponenten

- implementiere `equals` als die mathematische Gleichheit von Paaren
- implementiere

```
swap :: Pair a b -> Pair b a
p :: Pair Int Bool ; p = Pair 3 False ; q =
```

Testfälle: z.B.

```
p.swap().swap().equals(p)
```

- implementiere `compareTo` als die lexikografische Ordnung von Paaren

## Verzögerte Auswertung (lazy evaluation)

### Motivation: Datenströme

Folge von Daten:

- erzeugen (producer)
- transformieren
- verarbeiten (consumer)

aus softwaretechnischen Gründen diese drei Aspekte im Programmtext trennen,  
aus Effizienzgründen in der Ausführung verschränken  
(bedarfsgesteuerte Transformation/Erzeugung)

## Bedarfs-Auswertung, Beispiele

- Unix: Prozesskopplung durch Pipes

```
cat foo.text | tr ' ' '\n' | wc -l
```

Betriebssystem (Scheduler) simuliert Nebenläufigkeit

- OO: Iterator-Muster

```
Enumerable.Range(0,10).Select(n=>n*n).Sum()
```

ersetze Daten durch Unterprogr., die Daten produzieren

- FP: lazy evaluation (verzögerte Auswertung)

```
let nats = nf 0 where nf n = n : nf (n + 1)
sum $ map (\ n -> n * n) $ take 10 nats
```

Realisierung: Termersetzung  $\Rightarrow$  Graphersetzung,

## Beispiel Bedarfsauswertung

```
data Stream a = Cons a (Stream a)
nats :: Stream Int ; nf :: Int -> Stream Int
nats = nf 0 ; nf n = Cons n (nf (n+1))
head (Cons x xs) = x ; tail (Cons x xs) = xs
```

Obwohl `nats` unendlich ist, kann Wert von `head (tail (tail nats))` bestimmt werden:

```
= head (tail (tail (nf 0)))
= head (tail (tail (Cons 0 (nf 1))))
= head (tail (nf 1))
= head (tail (Cons 1 (nf 2)))
= head (nf 2) = head (Cons 2 (nf 3)) = 2
```

es wird immer ein *äußerer* Redex reduziert  
(Bsp: `nf 3` ist ein *innerer* Redex)

## Strictness

zu jedem Typ  $T$  betrachte  $T_{\perp} = \{\perp\} \cup T$   
dabei ist  $\perp$  ein „Nicht-Resultat vom Typ  $T$ “

- Exception `undefined :: T`
- oder Nicht-Termination `let { x = x } in x`

Def.: Funktion  $f$  heißt *strikt*, wenn  $f(\perp) = \perp$ .

Fkt.  $f$  mit  $n$  Arg. heißt *strikt in  $i$* ,

falls  $\forall x_1 \dots x_n : (x_i = \perp) \Rightarrow f(x_1, \dots, x_n) = \perp$

verzögerte Auswertung eines Arguments

$\Rightarrow$  Funktion ist dort nicht strikt

einfachste Beispiele in Haskell:

- Konstruktoren (`Cons, ...`) sind nicht strikt,
- Destruktoren (`head, tail, ...`) sind strikt.

## Beispiele Striktheit

- `length :: [a] -> Int` ist strikt:

```
length undefined ==> exception
```

- `(:)` ::  $a \rightarrow [a] \rightarrow [a]$  ist nicht strikt im 1. Argument:

```
length (undefined : [2,3]) ==> 3
```

d.h. `(undefined : [2,3])` ist nicht  $\perp$

- `(&&)` ist strikt im 1. Arg, nicht strikt im 2. Arg.

```
undefined && True ==> (exception)
False && undefined ==> False
```

## Implementierung der verzögerten Auswertung

Begriffe:

- *nicht strikt*: nicht zu früh auswerten
- verzögert (*lazy*): höchstens einmal auswerten (ist Spezialfall von *nicht strikt*)

bei jedem Konstruktor- und Funktionsaufruf:

- kehrt *sofort* zurück
- Resultat ist *thunk* (Paar von Funktion und Argument)
- thunk wird erst bei Bedarf ausgewertet
- Bedarf entsteht durch Pattern Matching
- nach Auswertung: thunk durch Resultat überschreiben (das ist der Graph-Ersetzungs-Schritt)
- bei weiterem Bedarf: wird Resultat nachgenutzt

## Bedarfsauswertung in Scala

```
def F (x : Int) : Int = {
 println ("F", x) ; x*x
}
lazy val a = F(3);
println (a);
println (a);
http://www.scala-lang.org/
```

## Diskussion

- John Hughes: *Why Functional Programming Matters*, 1984 <http://www.cse.chalmers.se/~rjmh/Papers/whyfp.html>
- Bob Harper 2011 <http://existentialtype.wordpress.com/2011/04/24/the-real-point-of-laziness/>
- Lennart Augustsson 2011 <http://augustss.blogspot.de/2011/05/more-points-for-lazy-evaluation-in.html>

## Anwendungen der verzögerten Auswertg. (I)

Abstraktionen über den Programm-Ablauf

- Nicht-Beispiel (warum funktioniert das nicht in Java?) (mit jshell ausprobieren)

```
<R> R wenn (boolean b, R x, R y)
 { if (b) return x; else return y; }
int f (int x)
 { return wenn(x<=0,1,x*f(x-1)); }
f (3);
```

- in Haskell geht das (direkt in ghci)

```
let wenn b x y = if b then x else y
let f x = wenn (x<= 0) 1 (x * f (x-1))
f 3
```

## Anwendungen der verzögerten Auswertg. (II)

unendliche Datenstrukturen

- Modell:

```
data Stream e = Cons e (Stream e)
```

- man benutzt meist den eingebauten Typ 

```
data [a] = [] | a : [a]
```
- alle anderen Anwendungen des Typs `[a]` sind *falsch* (z.B. als Arrays, Strings, endliche Mengen) mehr dazu: <https://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/etc/untutorial/list-or-not-list/>

## Primzahlen

```
primes :: [Int]
primes = sieve (enumFrom 2)
```

```
enumFrom :: Int -> [Int]
enumFrom n = n : enumFrom (n+1)
```

```
sieve :: [Int] -> [Int]
sieve (x : xs) = x : ys
```

wobei `ys` = die nicht durch `x` teilbaren Elemente von `xs` (Das ist (sinngemäß) das Code-Beispiel auf <https://www.haskell.org/>)

## Aufgaben zu Striktheit

- Beispiel 1: untersuche Striktheit der Funktion

```
f :: Bool -> Bool -> Bool
f x y = case y of { False -> x ; True -> y }
```

Antwort:

- `f` ist nicht strikt im 1. Argument, denn `f undefined True = True`
- `f` ist strikt im 2. Argument, denn dieses Argument (`y`) ist die Diskriminante der obersten Fallunterscheidung.

- Beispiel 2: untersuche Striktheit der Funktion

```
g :: Bool -> Bool -> Bool -> Bool
g x y z =
 case (case y of False -> x ; True -> z) of
 False -> x
 True -> False
```

Antwort (teilweise)

- ist strikt im 2. Argument, denn die Diskriminante (`case y of ..`) der obersten Fallunterscheidung verlangt eine Auswertung der inneren Diskriminante `y`.

- Aufgabe: strikt in welchen Argumenten?

```
f x y z = case y && z of
 False -> case x || y of
```

```
False -> z
True -> False
True -> y
```

## Übung: Rekursive Stream-Definitionen

Bestimmen Sie jeweils die ersten Elemente dieser Folgen (1. auf Papier durch Umformen, 2. mit ghci).

Für die Hilfsfunktionen (map, zipWith, concat):

1. Typ feststellen, 2. Testfälle für endliche Listen

1.  $f = 0 : 1 : f$
2.  $n = 0 : \text{map } (\backslash x \rightarrow 1 + x) n$
3.  $xs = 1 : \text{map } (\backslash x \rightarrow 2 * x) xs$
4.  $ys = \text{False}$   
    : tail (concat (map (\y -> [y, not y]) ys))
5.  $zs = 0 : 1 : \text{zipWith } (+) zs (\text{tail } zs)$

siehe auch <https://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/etc/stream/>

## OO-Simulation v. Bedarfsauswertung

### Motivation (Wdhlg.)

Unix:

```
cat stream.tex | tr -c -d aeuiio | wc -m
```

Haskell:

```
sum $ take 10 $ map (\ x -> x^3) $ natural
```

C#:

```
Enumerable.Range(0,10).Select(x=>x*x*x).Sum()
```

- logische Trennung:  
  Produzent → Transformator(en) → Konsument
- wegen Speichereffizienz: verschränkte Auswertung.
- gibt es bei *lazy* Datenstrukturen geschenkt, wird ansonsten durch Iterator (Enumerator) simuliert.

## Iterator (Java)

```
interface Iterator<E> {
 boolean hasNext(); // liefert Status
 E next(); // schaltet weiter
}
interface Iterable<E> {
 Iterator<E> iterator();
}
```

typische Verwendung:

```
Iterator<E> it = c.iterator();
while (it.hasNext()) {
 E x = it.next (); ...
}
```

Abkürzung: for (E x : c) { ... }

## Beispiele Iterator

- ein Iterator (bzw. Iterable), der/das die Folge der Quadrate natürlicher Zahlen liefert
- Transformation eines Iterators (map)
- Zusammenfügen zweier Iteratoren (merge)
- Anwendungen: Hamming-Folge, Mergesort

## Beispiel Iterator Java

```
Iterable<Integer> nats = new Iterable<Integer>() {
 public Iterator<Integer> iterator() {
 return new Iterator<Integer>() {
 private int state = 0;
 public Integer next() {
 int result = this.state;
 this.state++; return res;
 }
 public boolean hasNext() { return true; }
 };
 }
};
for (int x : nats) { System.out.println(x); }
```

Aufgabe: implementiere eine Methode

```
static Iterable<Integer> range(int start, int count)
```

soll count Zahlen ab start liefern.

Testfälle dafür:

```
• @Test
public void t1() {
 assertEquals (new Integer(3), Main.range(0, 3));
}
@Test
public void t2() {
 assertEquals (5, StreamSupport.stream(Mai
})
```

## Enumerator (C#)

```
interface IEnumerator<E> {
 E Current; // Status
 bool MoveNext (); // Nebenwirkung
}
interface IEnumerable<E> {
 IEnumerator<E> GetEnumerator ();
}
```

Ü: typische Benutzung (schreibe die Schleife, vgl. mit Java-Programm)

Abkürzung: foreach (E x in c) { ... }

## Zusammenfassung Iterator

- Absicht: bedarfsweise Erzeugung von Elementen eines Datenstroms
- Realisierung: Iterator hat Zustand und Schnittstelle mit Operationen:
  - (1) Test (ob Erzeugung schon abgeschlossen)
  - (2) Ausliefern eines Elementes
  - (3) Zustandsänderung
- Java: 1 : hasNext (), 2 und 3: next ()
- C#: 3 und 1: MoveNext (), 2: Current

## Iteratoren mit yield

- der Zustand des Iterators ist die Position im Programm
- MoveNext ():
  - bis zum nächsten yield weiterrechnen,
  - falls das yield return ist: Resultat true
  - falls yield break: Resultat false
- benutzt das (uralte) Konzept *Co-Routine*

```
using System.Collections.Generic;
IEnumerable<int> Range (int lo, int hi) {
 for (int x = lo; x < hi ; x++) {
 yield return x;
 }
 yield break; }

```

## Aufgaben Iterator C#

```
IEnumerable<int> Nats () {
 for (int s = 0; true; s++) {
 yield return s;
 }
}

```

Implementiere „das merge aus mergesort“ (Spezifikation?)

```
static IEnumerable<E> Merge<E>
 (IEnumerable<E> xs, IEnumerable<E> ys)
 where E : IComparable<E>

```

zunächst für unendliche Ströme, Test:

```
Merge (Nats () .Select (x=>x*x), Nats () .Select (x=
(benötigt using System.Linq und Assembly
System.Core)

```

Dann auch für endliche Ströme, Test:

```
Merge (new int [] {1,3,4}, new int [] {2,7,8})

```

Dann Mergesort

```
static IEnumerable<E> Sort<E> (IEnumerable<E> xs)
 where E : IComparable<E> {
 if (xs.Count () <= 1) {
 return xs;
 } else { // zwei Zeilen folgen
 ...
 }
}

```

Test: Sort (new int [] { 3,1,4,1,5,9})

## Streams in C#: funktional, Linq

Funktional

```
IEnumerable.Range (0,10).Select (x => x^3).Sum

```

Typ von Select? Implementierung?

Linq-Schreibweise:

```
(from x in new Range (0,10) select x*x*x).Sum

```

Beachte: SQL-select „vom Kopf auf die Füße gestellt“.

## Fkt. höherer Ord. für Streams

### Motivation

- Verarbeitung von Datenströmen,
- durch modulare Programme, zusammengesetzt aus elementaren Strom-Operationen
- angenehme Nebenwirkung (1): (einige) elementare Operationen sind parallelisierbar
- angenehme Nebenwirkung (2): externe Datenbank als Datenquelle, Verarbeitung mit Syntax und Semantik (Typsystem) der Gastsprache

## Strom-Operationen

- erzeugen (produzieren):
  - Enumerable.Range (int start, int count)
  - eigene Instanzen von IEnumerable
- transformieren:
  - elementweise: Select
  - gesamt: Take, Skip, Where
- verbrauchen (konsumieren):
  - Aggregate
  - Spezialfälle: All, Any, Sum, Count

## Strom-Transformationen (1)

elementweise (unter Beibehaltung der Struktur)

Vorbild:

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

```

Realisierung in C#:

```
IEnumerable Select<A,B>
 (this IEnumerable<A> source,
 Func<A,B> selector);

```

Rechenregeln für map:

```
map f [] = ...

```

```
map f (x : xs) = ...

```

```
map f (map g xs) = ...

```

## Strom-Transformationen (2)

Änderung der Struktur, Beibehaltung der Elemente  
Vorbild:

```
take :: Int -> [a] -> [a]
drop :: Int -> [a] -> [a]
filter :: (a -> Bool) -> [a] -> [a]
```

Realisierung: Take, Drop, Where

Übung: takeWhile, dropWhile, ...

- ausprobieren (Haskell, C#)
- implementieren  
Haskell: 1. mit expliziter Rekursion, 2. mit fold  
C# (Enumerator): 1. mit Current, MoveNext, 2. yield

## Strom-Transformationen (3)

neue Struktur, neue Elemente

Vorbild:

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

Realisierung:

SelectMany

Rechenregel (Beispiel):

```
map f xs = xs >>= ...
```

Übung:

Definition des Operators >=> durch

```
(s >=> t) = \ x -> (s x >>= t)
```

Typ von >=>? Assoziativität? neutrale Elemente?

## Strom-Verbraucher

„Vernichtung“ der Struktur

(d. h. kann danach zur Garbage Collection, wenn keine weiteren Verweise existieren)

Vorbild:

```
fold :: r -> (e -> r -> r) -> [e] -> r
```

in der Version „von links“

```
foldl :: (r -> e -> r) -> r -> [e] -> r
```

Realisierung (Ü: ergänze die Typen)

R Aggregate<E, R>

```
(this IEnumerable<E> source,
 ... seed, ... func)
```

(Beachte this. Das ist eine *extension method*)

## Zusammenfassung: Ströme

... und ihre Verarbeitung

| C# (Linq)      | Haskell    |
|----------------|------------|
| IEnumerable<E> | [e]        |
| Select         | map        |
| SelectMany     | >>= (bind) |
| Where          | filter     |
| Aggregate      | foldl      |

- mehr zu Linq: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/system.linq\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/system.linq(v=vs.110).aspx)
- Ü: ergänze die Tabelle um die Spalte für Streams in Java-8 <http://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/java/util/stream/package-summary.html>

## Bsp: die Spezifikation von TakeWhile

[https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb534804\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb534804(v=vs.110).aspx)

zeigt Nachteile natürlichsprachlicher Spezifikationen:

- *ungenau*: “Return Value: ... An IEnumerable<T> that contains the elements from the input sequence that occur before ...”  
aber in welcher Reihenfolge? Da steht nur “contains”. Also ist als Wert von  
`(new int [] {1,2,3,4}).TakeWhile(x => x<3)`  
auch {2,1} möglich. Oder {1,2,1}? Oder {1,5,2,7}? Alle enthalten 1 und 2.
- *unvollständig*: “... occur before the element at which the

test no longer passes”

```
(new int [] {1,2,3,4}).TakeWhile(x => x<8)
```

Hier gibt es kein solches Element. Was nun — die Spezifikation verbietet diesen Aufruf, d.h. wenn man es doch tut, erhält man eine Exception? Oder sie gestattet ihn und erlaubt ein beliebiges Resultat?

Es wäre schon gegangen, man hätte nur wollen müssen: “*w*.TakeWhile(*p*) ist der *maximale Präfix* von *w*, dessen Elemente sämtlich die Bedingung *p* erfüllen.”

(Notation  $u \sqsubseteq w$  für *u* ist *Präfix* von *w*, Def.:  $\exists v : u \cdot v = w$ )  
korrekte Spezifikation:  $w.\text{TakeWhile}(p) = u$  iff

- $u \sqsubseteq w$  und  $\forall y \in u : p(y)$
- und  $\forall u' : (u' \sqsubseteq w \wedge (\forall y \in u' : p(y))) \Rightarrow u' \sqsubseteq u$

## Arbeiten mit Collections in Haskell

Bsp: Data.Set und Data.Map aus <https://hackage.haskell.org/package/containers>

Beispiel-Funktionen mit typischen Eigenschaften:

```
unionWith
 :: Ord k => (v->v->v)->Map k v->Map k v->Map k v
fromListWith
 :: Ord k => (v->v->v) -> [(k, v)] -> Map k v
```

- polymorpher Typ, eingeschränkt durch Ord k
- Funktion höherer Ordnung (siehe 1. Argument)
- Konversion von/nach Listen, Tupeln

Anwendungen:

- bestimme Vielfachheit der Elemente einer Liste
- invertiere eine Map k v (Resultat-Typ?)

## Linq-Syntax (type-safe SQL)

```
var stream = from c in cars
 where c.colour == Colour.Red
 select c.wheels;
```

wird vom Compiler übersetzt in

```
var stream = cars
 .Where (c => c.colour == Colour.Red)
 .Select (c.wheels);
```

Beachte:

- das Schlüsselwort ist from
- Typinferenz (mit var)

Übung: Ausdrücke mit mehreren from, mit group .. by ..

## Linq-Syntax (type-safe SQL) (II)

```
var stream =
 from x in Enumerable.Range(0,10)
 from y in Enumerable.Range(0,x) select y
wird vom Compiler übersetzt in
var stream = Enumerable.Range(0,10)
 .SelectMany(x=>Enumerable.Range(0,x))
```

- aus diesem Grund ist `SelectMany` wichtig
- ... und die entsprechende Funktion `>>=` (bind) in Haskell
- deren allgemeinsten Typ ist

```
class Monad m where
 (>>=) :: m a -> (a -> m b) -> m b
https://wiki.haskell.org/All_About_Monads
```

## Linq und Parallelität

... das ist ganz einfach: anstatt

```
var s = Enumerable.Range(1, 20000)
 .Select(f).Sum();
```

schreibe

```
var s = Enumerable.Range(1, 20000)
 .AsParallel()
 .Select(f).Sum();
```

Dadurch werden

- Elemente parallel verarbeitet (`.Select(f)`)
- Resultate parallel zusammengefaßt (`.Sum()`)

vgl. <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd460688.aspx>

## Übung Stream-Operationen

- die Funktion `reverse :: [a] -> [a]` als `foldl`
- die Funktion `fromBits :: [Bool] -> Integer`,  
Beispiel  
`fromBits [True,False,False,True,False]=18`  
... als `foldr` oder als `foldl` ?
- die Regel vervollständigen und ausprobieren:  
  
`foldl f a (map g xs) = foldl ? ?`  
  
das `map` verschwindet dabei  $\Rightarrow$  *stream fusion* (Coutts, Leshchinsky, Stewart, 2007)

<http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.104.7401>

- die Regel ergänzen (autotool)  
  
`foldr f a xs = foldl ? ? (reverse xs)`
- `map` durch `>>=` implementieren (entspr. `Select` durch `SelectMany`)
- `filter` durch `foldr` implementieren (autotool)

## Bsp: nicht durch fold darstellbare Funktion

`filter`, `takeWhile`, `dropWhile :: (a -> Bool)`  
die ersten beiden lassen sich durch `fold` darstellen, aber `dropWhile` nicht. Beweis (indirekt):  
Falls doch `dropWhile p xs = fold n c xs`, dann entsteht folgender Widerspruch:

```
[False,True]
== dropWhile id [False,True]
== fold n c [False,True]
== c False (fold n c [True])
== c False (dropWhile id [True])
== c False []
== c False (dropWhile id [])
== c False (fold n c [])
```

```
== fold n c [False]
== dropWhile id [False]
== [False]
Ü: läßt sich dropWhile als foldl schreiben?
```

## Fold-Left: Eigenschaften

- Beispiel: `foldl f s [x1, x2, x3] = f(f(f s x1) x2) x3`  
vgl. `foldr f s [x1, x2, x3] = f x1 (f x2 (f x3 s))`
- Eigenschaft:  
`foldl f s [x1, ..., xn] = f (foldl f s [x1, ..., xn-1]) xn`  
vgl. `foldr f s [x1, ..., xn] = f x1 (foldr f s [x2, ..., xn])`
- Anwend.: bestimme `f, s` mit `reverse = foldl f s`  
`[3,2,1]=reverse [1,2,3] = foldl f s [1,2,3]`  
`= f (foldl f s [1,2]) 3`  
`= f (reverse [1,2]) 3 = f [2,1] 3`  
  
also `f [2,1] 3 = [3,2,1]`, d.h., `f x y = y : x`

## Fold-Left: Implementierung

- Eigenschaft (vorige Folie) sollte nicht als Implementierung benutzt werden, denn `[x1, ..., xn-1]` ist teuer (erfordert Kopie)
- `foldl :: (b -> a -> b) -> b -> [a] -> b`  
`foldl f s xs = case xs of`  
`[] -> s`  
`x : xs' -> foldl f (f s x) xs'`  
zum Vergleich  
  
`foldr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> b`  
`foldr f s xs = case xs of`  
`[] -> s`  
`x : xs' -> f x (foldl f s xs')`

## Fold-Left: allgemeiner Typ

- der Typ von `Prelude.foldl` ist tatsächlich  

```
Foldable t => (b->a->b) -> b -> t a -> b
```
- hierbei ist `Foldable` eine (Typ)Konstruktor-Klasse mit der einzigen (konzeptuell) wesentlichen Methode  

```
class Foldable t where toList :: t a -> [a]
```

und Instanzen für viele generische Container-Typen
- weitere Methoden aus Effizienzgründen
- [https://www.reddit.com/r/haskell/comments/3okick/foldable\\_for\\_nohaskellers\\_haskells\\_controversial/](https://www.reddit.com/r/haskell/comments/3okick/foldable_for_nohaskellers_haskells_controversial/)

## Organisatorisches

### KW 26 und KW 27

- KW 26 (diese Woche)
  - VL: Bsp. fortgeschrittene Anwendung der fktl. Prog.
  - Ü: weitere Aufgaben zu Streams (`foldr`, `foldl`)
  - dazu auch autotool-Aufgabe (ab Mo. abend)
- KW 27 (letzte VL-Woche)
  - VL:
    - \* Zusammenfassung
    - \* Preisverleihung autotool-Highscore
  - Ü: Hörsaal-Übung (Hr. Wenzel).  
Fragen vorher per Mail an ihn.

## Funktional-Reactive Programmierung

### Motivation

- nebenläufige, interaktive Systeme
- imperatives Modell:
  - Komponenten haben Zustand, dieser ist veränderlich
  - Komponenten reagieren auf Zustandsänderungen in anderen Komponenten (d.h. ändern eigenen Zustand)
  - in OO ausgedrückt durch das *Beobachter*-Muster
- funktionales Modell (FRP):
  - Zustand als Funktion der Zeit
  - Ereignis  $\approx$  stückweise konstanter Zustand

### Verhaltensmuster: Beobachter

- Subjekt: class `Observable`
  - anmelden: `void addObserver (Observer o)`
  - abmelden: `void deleteObserver (Observer o)`
  - Zustandsänderung: `void setChanged ()`
  - Benachrichtigung: `void notifyObservers (...)`
- Beobachter: interface `Observer`
  - aktualisiere: `void update (...)`
- Vorteil: Objektbeziehungen sind konfigurierbar.
- Nachteil: Spaghetti-Programmierung (impliziter globaler Zustand, unübersichtliche Änderungen)
- (FRP: Komposition ohne Nebenwirkungen, Modularität)

### Beobachter: Beispiel

```
public class Counter extends Observable {
 private int count = 0;
 public void step () { this.count ++;
 this.setChanged();
 this.notifyObservers(); } }
public class Watcher implements Observer {
 private final int threshold;
 public void update(Observable o, Object arg) {
 if (((Counter)o).getCount() >= this.threshold)
 System.out.println ("alarm"); } }
public static void main(String[] args) {
 Counter c = new Counter ();
 Watcher w = new Watcher (3);
 c.addObserver(w); c.step(); c.step (); c.step (); }
```

### Funktional-Reaktive Programmierung

- Verhalten (Behaviour) und Ereignisse (Events) als Funktionen der Zeit, repräsentiert durch Streams
- Conal Elliot, Paul Hudak: *Functional Reactive Animation*, ICFP 1997, <http://conal.net/papers/icfp97/> 2007 als „most influential paper“ ausgezeichnet
- Stephen Blackheath: FRP <https://www.manning.com/books/functional-reactive-programming-2016> Kapitel 1 des Buches heißt *Stop Listening!*
- React? <http://reactivex.io/?Jain>. Das grundsätzliche Modell von FRP benutzt reelle Zeit.

### FRP-Beispiel

```
dollar <- UI.input ; euro <- UI.input
getBody window #+ [
 column [grid [[string "Dollar:", element dollar]
 , [string "Euro:" , element euro]]
]]
euroIn <- stepper "0" $ UI.valueChange euro
dollarIn <- stepper "0" $ UI.valueChange dollar
let rate = 0.7 :: Double
withString f = maybe "-" (printf "%.2f") . fmap f
dollarOut = withString (/ rate) <$> euroIn
euroOut = withString (* rate) <$> dollarIn
element euro # sink value euroOut
element dollar # sink value dollarOut
https://github.com/HeinrichApfelmus/threepenny-gui/tree/master/samples
```

## Anwendungen von Typklassen

### Testdaten für *property based testing*

- `smallCheck 3 $ \ (xs::[Int]) -> sum xs == sum (reverse xs) |`
- Koen Classen, John Hughes: QuickCheck, ICFP 2000 (most influential paper award 2010)
- Colin Runciman et al. (2008), Rudy Matela (2017)  
<https://www.cs.york.ac.uk/fp/smallcheck/>  
<https://hackage.haskell.org/package/leancheck>

## Typklassen für small/lean-check

- `check :: Testable a => a -> IO ()`  

```
class Testable a where
 results :: a -> [[String],Bool]]
instance Testable Bool where
 results p = [[],p]]
instance (Listable a, Testable b)
 => Testable (a -> b) where ...
```
- `class Listable a where tiers :: [[a]]`  

```
instance Listable Int where
 tiers = [0] : map (\x->[negate x,x]) [1..]
```
- Compiler beweist Aussage mittels o.g. Regeln  

```
instance Testable (Int -> (Int -> Bool))
```

– Typeset by FoilTeX –

184

## (Data) dependent types

- Motivation: `statt m :: List (List Int)`  
besser wäre `m :: List 2 (List 2 Int)`  
z.B. statische Sicherheit bei Matrix-Add., -Mult.
- geht aber nicht, denn 2 ist Datum (`Int` ist Typ)  
der Typ von `m` ist daten-abhängig.
- Programmierspachen mit *dependent types*:  
Cayenne (Augustsson 1998); Agda (Norell, 2008–)  
<http://wiki.portal.chalmers.se/agda/>; Idris (Brady, 2005–) <https://www.idris-lang.org/>  
Bei der Typ-Prüfung wird ggf. auch mit Daten gerechnet.  
Ist aufwendiger, aber gibt mehr statische Sicherheit

– Typeset by FoilTeX –

185

## Simulation v. dependent types d. Typklassen

- benutzt *generalized algebraic data types* (GADT)  
(eingeschränkte Polymorphie f. Konstruktoren)
- Rechnung auf Daten zur Laufzeit  $\Rightarrow$  Rechnung auf Typen  
mittels Typklassen zur Übersetzungszeit
- `List 2 a  $\Rightarrow$  List (Succ (Succ Zero)) a`  

```
class Nat a ; data Zero; instance Nat Zero
data Succ n ; instance Nat n => Nat (Succ n)
data List n a where
 Nil :: List Zero a
 Cons :: a -> List n a -> List (Succ n) a
tail :: Nat n => List (Succ n) a -> List n a
tail (Cons x xs) = xs
```
- Bsp: `tail Nil` ist dann ein Typfehler

– Typeset by FoilTeX –

186

## Zusammenfassung, Ausblick

### Themen

- Terme, algebraische Datentypen (OO: Kompositum)
- Muster, Regeln, Term-Ersetzung (Progr. 1. Ordnung)
- Polymorphie, Typvariablen, Typkonstruktoren
- Funktionen, Lambda-Kalkül (Progr. höherer Ord.)
- Rekursionsmuster (fold) (OO: Visitor)
- Eingeschränkte Polymorphie (Typklassen, Interfaces)
- Streams, Bedarfsauswertung (OO: Iterator)
- Stream-Verarbeitung mit `foldl`, `map`, `filter`, `LINQ`
- Funktional-Reaktive Progr. (OO: Beobachter)

– Typeset by FoilTeX –

187

## Aussagen

- statische Typisierung  $\Rightarrow$ 
    - findet Fehler zur Entwicklungszeit (statt Laufzeit)
    - effizienter Code (keine Laufzeittypprüfungen)
  - generische Polymorphie: flexibler *und* sicherer Code
  - Funktionen als Daten, F. höherer Ordnung  $\Rightarrow$ 
    - ausdrucksstarker, modularer, flexibler Code
- Programmierer(in) sollte
- die abstrakten Konzepte kennen
  - sowie ihre Realisierung (oder Simulation) in konkreten Sprachen (er)kennen und anwenden.

– Typeset by FoilTeX –

188

## Eigenschaften und Grenzen von Typsystemen

- Ziel: vollständige statische Sicherheit, d.h.
  - vollständige Spezifikation = Typ
  - Implementierung erfüllt Spezifikation  
 $\iff$  Implementierung ist korrekt typisiert
- Schwierigkeit: es ist nicht entscheidbar, ob die Implementierung die Spezifikation erfüllt  
(denn das ist äquivalent zu Halteproblem)
- Lösung: Programmierer schreibt Programm *und* Korrektheitsbeweis
- ... mit Werkzeugunterstützung  
zur Automatisierung trivialer Beweisschritte

– Typeset by FoilTeX –

189

## Software-Verifikation (Beispiele)

- Sprachen mit *dependent types*, z.B.  
<http://wiki.portal.chalmers.se/agda/>
- (interaktive) Beweis-Systeme, z.B.  
<http://isabelle.in.tum.de/>,  
<https://coq.inria.fr/>
- verifizierter C-Compiler  
<http://compcert.inria.fr/>
- Research in Software Engineering (Spezifikations-Sprache FORMULA, Constraint-Solver Z3)  
<http://research.microsoft.com/rise>

– Typeset by FoilTeX –

190

## CYP — check your proofs

- <https://github.com/noschin1/cyp#readme>  
„... verifies proofs about Haskell-like programs“
- Lemma: `length (xs ++ ys) .= length xs + length ys`  
Proof by induction on List xs  
Case []  
To show: `length ([] ++ ys) .= length [] + length ys`  
Proof  
`(by def ++)` `length ([] ++ ys)` `.= length ys`  
`length [] + length ys`  
`(by def length)` `.= 0 + length ys`  
`(by arith)` `.= length ys`  
QED  
Case `x:xs`  
To show: `length (x : xs) ++ ys) .= length (x : xs) + length ys`  
IH: `length (xs ++ ys) .= length xs + length ys`

– Typeset by FoilTeX –

191

## Anwendungen der funktionalen Progr.

Beispiel: Framework Yesod

<http://www.yesodweb.com/>

- “Turn runtime bugs into compile-time errors”
- “Asynchronous made easy”
- domainspezifische, statisch typisierte Sprachen für
  - Routes (mit Parametern)
  - Datenbank-Anbindung
  - HTML-Generierung

Anwendung: <https://gitlab.imn.htwk-leipzig.de/autotool/all10/tree/master/yesod>

## Industrielle Anwendg. d funkt. Progr.

siehe Workshops *Commercial users of functional programming* <http://cufp.org/2015/>

- siehe Adressen/Arbeitgeber der Redner der Konferenz

Diskussion:

- Amanda Laucher: An Enterprise Software Consultant's view of FP <http://cufp.org/2015/amanda-laucher-keynote.html>
- Paul Graham: Beating the Averages <http://www.paulgraham.com/avg.html>
- Joel Spolsky: <http://www.joelonsoftware.com/articles/ThePerilsofJavaSchools.html>

## Anwendungen v. Konzepten der fktl. Prog.

- <https://www.rust-lang.org/> Rust is a systems programming language that runs blazingly fast, prevents segfaults, and guarantees thread safety.
- <https://developer.apple.com/swift/>  
... Functional programming patterns, e.g., map and filter, ... designed for safety.
- <https://github.com/dotnet/roslyn/blob/features/patterns/docs/features/patterns.md> enable many of the benefits of algebraic data types and pattern matching from functional languages

## Ein weiterer Vorzug der Fktl. Prog.

- <https://jobsquery.it/stats/language/group>  
(1. Juli 2017)