

Praktische Informatik 3: Funktionale Programmierung
Vorlesung 12 vom 13.01.2015: Effizienzaspekte

Christoph Lüth

Universität Bremen

Wintersemester 2014/15

Fahrplan

- ▶ Teil I: Funktionale Programmierung im Kleinen
- ▶ Teil II: Funktionale Programmierung im Großen
- ▶ Teil III: Funktionale Programmierung im richtigen Leben
 - ▶ Aktionen und Zustände
 - ▶ Effizienzaspekte
 - ▶ Scala — Eine praktische Einführung
 - ▶ Rückblick & Ausblick

Organisatorisches

- ▶ Fachgespräche: 2/3. Februar oder 9/10. Februar?
- ▶ Zusatztermin: 27. Februar

Inhalt

- ▶ **Zeitbedarf:** Endrekursion — while in Haskell
- ▶ **Platzbedarf:** Speicherlecks
- ▶ “Unendliche” Datenstrukturen
- ▶ Verschiedene andere Performancefallen:
 - ▶ Überladene Funktionen, Listen

Inhalt

- ▶ **Zeitbedarf**: Endrekursion — while in Haskell
- ▶ **Platzbedarf**: Speicherlecks
- ▶ “Unendliche” Datenstrukturen
- ▶ Verschiedene andere Performancefallen:
 - ▶ Überladene Funktionen, Listen
- ▶ “Usual Disclaimers Apply”:
 - ▶ Erste Lösung: bessere **Algorithmen**
 - ▶ Zweite Lösung: **Büchereien** nutzen

Effizienz Aspekte

- ▶ Zur **Verbesserung** der Effizienz:
 - ▶ Analyse der **Auswertungsstrategie**
 - ▶ ... und des **Speichermanagement**
- ▶ Der ewige Konflikt: **Geschwindigkeit vs. Platz**

Effizienz Aspekte

- ▶ Zur **Verbesserung** der Effizienz:
 - ▶ Analyse der **Auswertungsstrategie**
 - ▶ ... und des **Speichermanagement**
- ▶ Der ewige Konflikt: **Geschwindigkeit** vs. **Platz**
- ▶ Effizienzverbesserungen durch
 - ▶ **Endrekursion**: Iteration in funktionalen Sprachen
 - ▶ **Striktheit**: **Speicherlecks** vermeiden (bei verzögerter Auswertung)
- ▶ Vorteil: Effizienz **muss nicht** im Vordergrund stehen

Endrekursion

Definition (Endrekursion)

Eine Funktion ist **endrekursiv**, wenn

- (i) es genau **einen** rekursiven Aufruf gibt,
- (ii) der **nicht** innerhalb eines **geschachtelten Ausdrucks** steht.

- ▶ D.h. darüber **nur Fallunterscheidungen**: **case** oder **if**
- ▶ Entspricht **goto** oder **while** in imperativen Sprachen.
- ▶ Wird in **Sprung** oder **Schleife** übersetzt.
- ▶ Braucht **keinen Platz** auf dem Stack.

Einfaches Beispiel

- ▶ In Haskell:

```
even x = if x < 1 then x == 0 else even (x-2)
```

- ▶ Übersetzt nach C:

```
int even (int x)
{ if (x < 1) return x == 0;
  else return (even (x-2)); }
```

- ▶ Äquivalente Formulierung:

```
int even (int x)
{ if (!(x < 1)) { x -= 2; return even(x); }
  else return x == 0; }
```

Einfaches Beispiel

- ▶ In Haskell:

```
even x = if x < 1 then x == 0 else even (x-2)
```

- ▶ Übersetzt nach C:

```
int even (int x)
{ if (x < 1) return x == 0;
  else return (even (x-2)); }
```

- ▶ Äquivalente Formulierung:

```
int even (int x)
{ if (!(x < 1)) { x -= 2; return even(x); }
  else return x == 0; }
```

Einfaches Beispiel

- ▶ In Haskell:

```
even x = if x < 1 then x == 0 else even (x-2)
```

- ▶ Übersetzt nach C:

```
int even (int x)
{ if (x < 1) return x == 0;
  else return (even (x-2)); }
```

- ▶ Äquivalente Formulierung:

```
int even (int x)
{ if (!(x < 1)) { x -= 2; return even(x); }
  else return x == 0; }
```

- ▶ Iterative Variante mit Schleife:

```
int even (int x)
{ while (!(x < 1)) x -= 2;
  return x == 0; }
```

Beispiel: Fakultät

- ▶ `fac1` **nicht** endrekursiv:

```
fac1 :: Integer → Integer
```

```
fac1 n = if n == 0 then 1 else n * fac1 (n-1)
```

Beispiel: Fakultät

- ▶ fac1 **nicht** endrekursiv:

```
fac1 :: Integer → Integer
fac1 n = if n == 0 then 1 else n * fac1 (n-1)
```

- ▶ fac2 endrekursiv:

```
fac2 :: Integer → Integer
fac2 n = fac' n 1 where
  fac' :: Integer → Integer → Integer
  fac' n acc = if n == 0 then acc
              else fac' (n-1) (n*acc)
```

- ▶ fac1 verbraucht Stack, fac2 nicht.
- ▶ Ist **nicht** merklich schneller?!

Beispiel: Listen umdrehen

- ▶ Liste umdrehen, **nicht** endrekursiv:

```
rev' :: [a] → [a]
rev' []      = []
rev' (x:xs) = rev' xs ++ [x]
```

- ▶ Hängt auch noch **hinten** an — $O(n^2)$!

Beispiel: Listen umdrehen

- ▶ Liste umdrehen, **nicht** endrekursiv:

```
rev' :: [a] → [a]
rev' [] = []
rev' (x:xs) = rev' xs ++ [x]
```

- ▶ Hängt auch noch **hinten** an — $O(n^2)$!
- ▶ Liste umdrehen, **endrekursiv** und $O(n)$:

```
rev :: [a] → [a]
rev xs = rev0 xs [] where
  rev0 [] ys = ys
  rev0 (x:xs) ys = rev0 xs (x:ys)
```

- ▶ Beispiel: last (rev [1..10000])
- ▶ **Schneller** — warum?

Verzögerte Auswertung und Speicherlecks

- ▶ **Garbage collection** gibt **unbenutzten** Speicher wieder frei.
 - ▶ **Unbenutzt**: Bezeichner nicht mehr im **erreichbar**
- ▶ Verzögerte Auswertung **effizient**, weil nur bei **Bedarf** ausgewertet wird
 - ▶ Aber Achtung: **Speicherlecks!**

Verzögerte Auswertung und Speicherlecks

- ▶ **Garbage collection** gibt **unbenutzten** Speicher wieder frei.
 - ▶ **Unbenutzt**: Bezeichner nicht mehr im **erreichbar**
- ▶ Verzögerte Auswertung **effizient**, weil nur bei **Bedarf** ausgewertet wird
 - ▶ Aber Achtung: **Speicherlecks!**
- ▶ Eine Funktion hat ein **Speicherleck**, wenn Speicher **unnötig** lange im Zugriff bleibt.
 - ▶ “Echte” Speicherlecks wie in C/C++ **nicht möglich**.
- ▶ Beispiel: `fac2`
 - ▶ Zwischenergebnisse werden **nicht ausgewertet**.
 - ▶ Insbesondere ärgerlich bei **nicht-terminierenden Funktionen**.

Striktheit

- ▶ **Strikte Argumente** erlauben Auswertung **vor** Aufruf
 - ▶ Dadurch **konstanter** Platz bei **Endrekursion**.
- ▶ **Erzwungene Striktheit**: $\text{seq} :: \alpha \rightarrow \beta \rightarrow \beta$

\perp 'seq' b = \perp

a 'seq' b = b

- ▶ seq vordefiniert (nicht in Haskell definierbar)
- ▶ $(\$!) :: (a \rightarrow b) \rightarrow a \rightarrow b$ strikte Funktionsanwendung

```
f $! x = x 'seq' f x
```

- ▶ ghc macht **Striktheitsanalyse**
- ▶ Fakultät in konstantem Platzaufwand

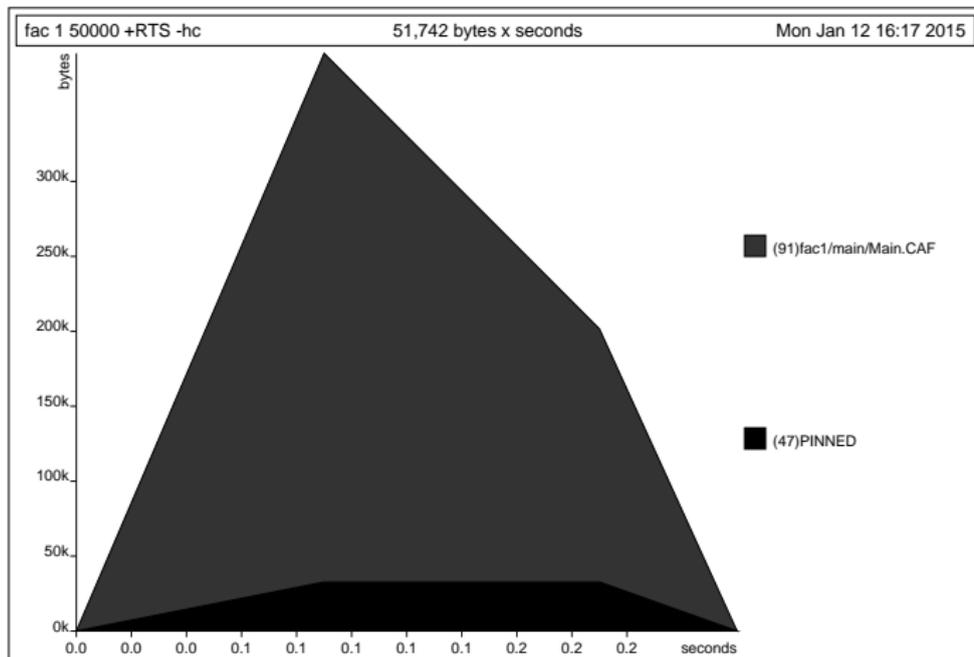
```
fac3 :: Integer → Integer
```

```
fac3 n = fac' n 1 where
```

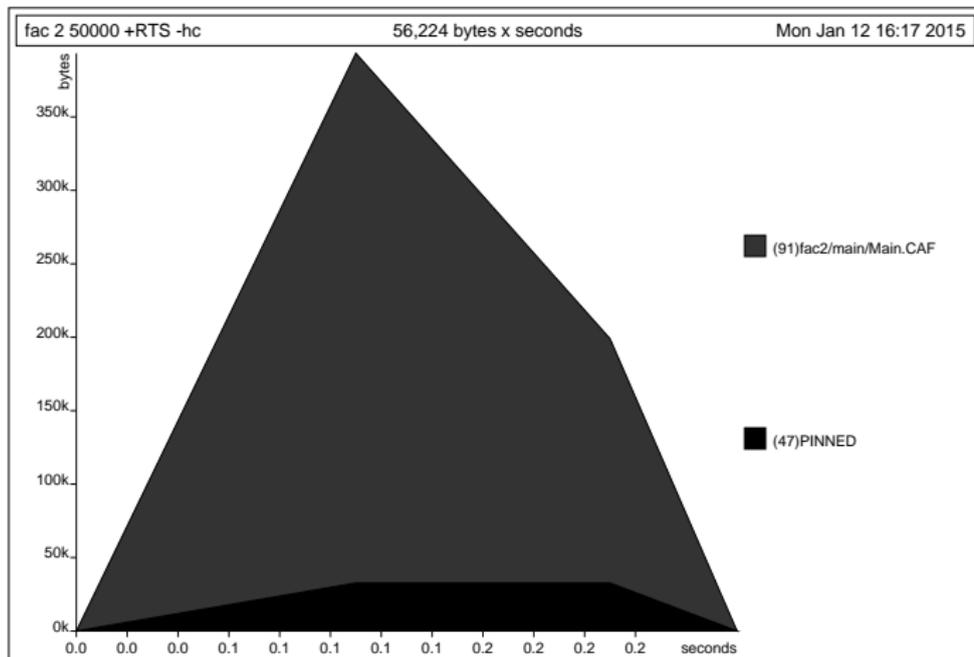
```
  fac' n acc = seq acc $ if n == 0 then acc
```

```
                else fac' (n-1) (n*acc)
```

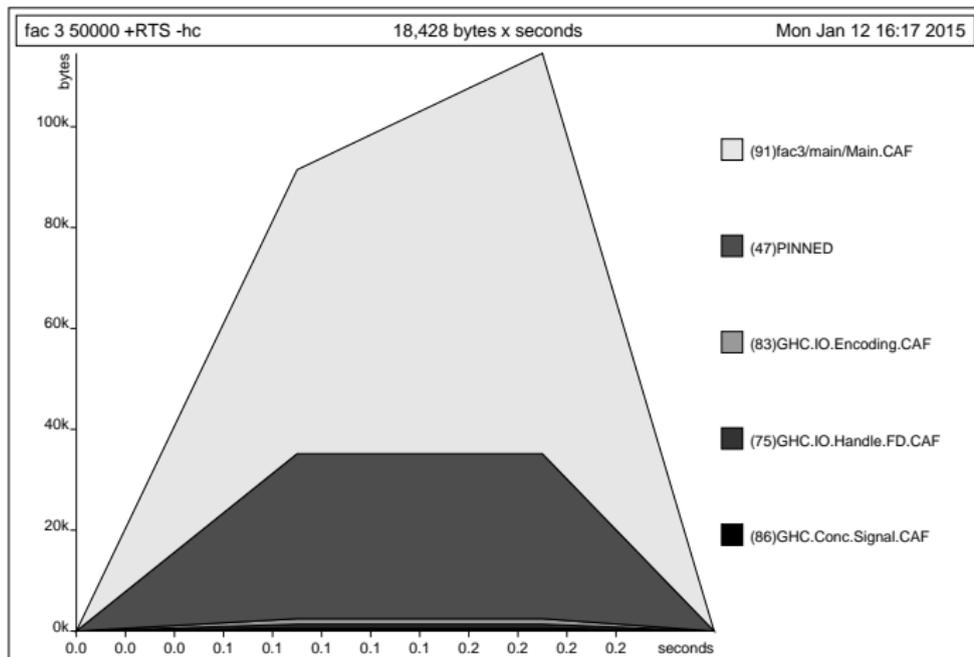
Speicherprofil: fac1 50000, nicht optimiert



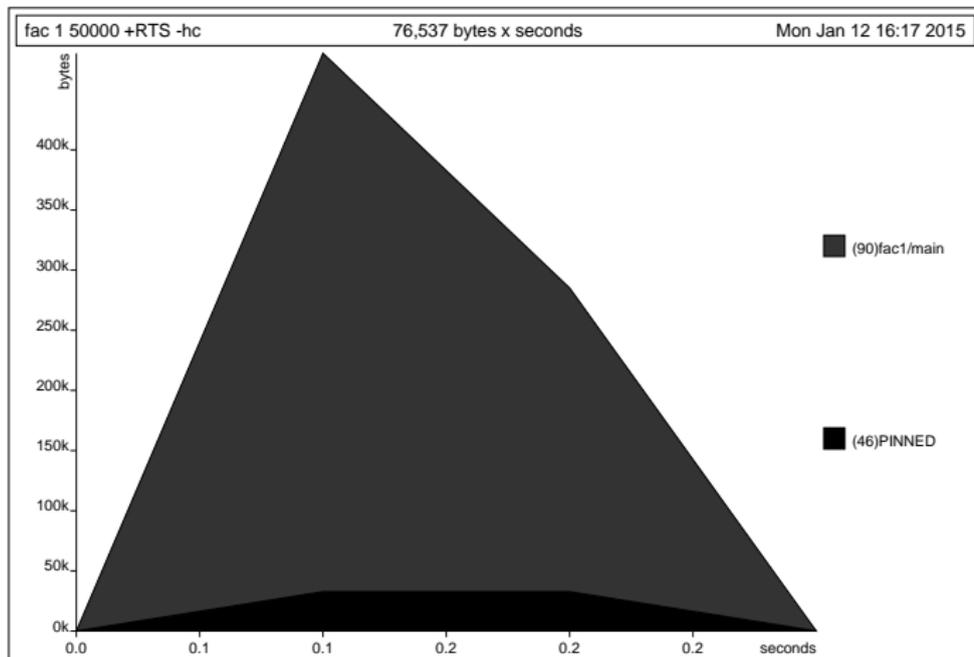
Speicherprofil: fac2 50000, nicht optimiert



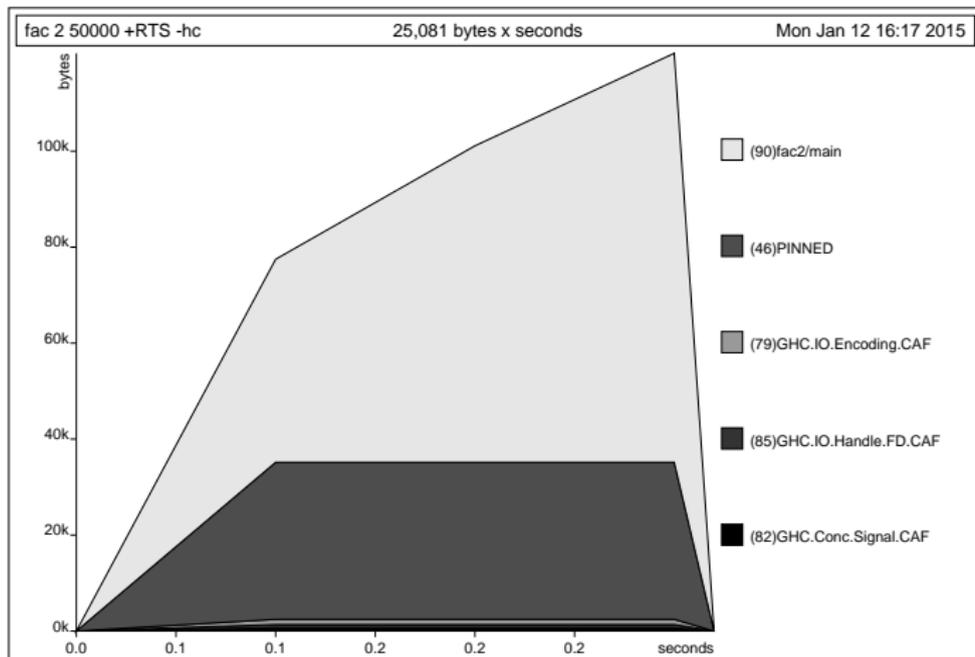
Speicherprofil: fac3 50000, nicht optimiert



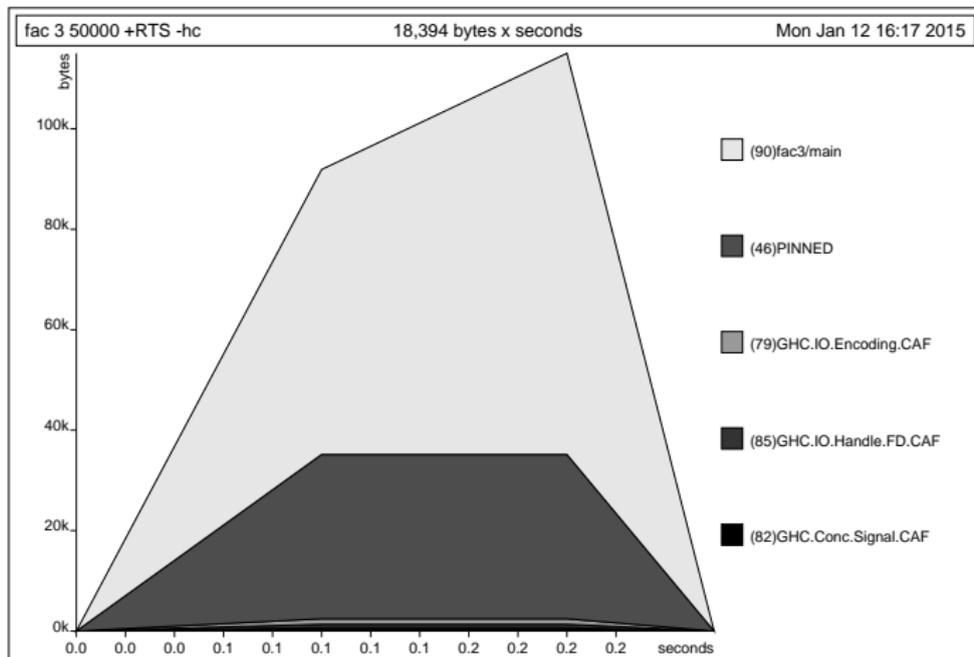
Speicherprofil: fac1 50000, optimiert



Speicherprofil: fac2 50000, optimiert



Speicherprofil: fac3 50000, optimiert



Fazit Speicherprofile

- ▶ Endrekursion **nur** bei **strikten Funktionen** schneller
- ▶ Optimierung des *ghc*
 - ▶ Meist **ausreichend** für **Striktheitsanalyse**
 - ▶ Aber **nicht** für Endrekursion
- ▶ Deshalb:
 - ▶ **Manuelle** Überführung in Endrekursion **sinnvoll**
 - ▶ **Compiler-Optimierung** für Striktheit nutzen

Überführung in Endrekursion

- ▶ Gegeben Funktion

$$f' : S \rightarrow T$$

$$f' x = \text{if } B x \text{ then } H x \\ \text{else } \phi (f' (K x)) (E x)$$

- ▶ Mit $K : S \rightarrow S$, $\phi : T \rightarrow T \rightarrow T$, $E : S \rightarrow T$, $H : S \rightarrow T$.

- ▶ **Voraussetzung:** ϕ assoziativ, $e : T$ neutrales Element

- ▶ Dann ist **endrekursive** Form:

$$f : S \rightarrow T$$

$$f x = g x e \text{ where}$$

$$g x y = \text{if } B x \text{ then } \phi (H x) y \\ \text{else } g (K x) (\phi (E x) y)$$

Beispiel

- ▶ Länge einer Liste (nicht-endrekursiv)

```
length' :: [a] → Int
length' xs = if null xs then 0
             else 1 + length' (tail xs)
```

- ▶ Zuordnung der Variablen:

$K(x)$	\mapsto	$\text{tail } x$	$B(x)$	\mapsto	$\text{null } x$
$E(x)$	\mapsto	1	$H(x)$	\mapsto	0
$\phi(x, y)$	\mapsto	$x + y$	e	\mapsto	0

- ▶ Es gilt: $\phi(x, e) = x + 0 = x$ (0 neutrales Element)

Beispiel

- ▶ Damit **endrekursive** Variante:

```
length :: [a] → Int
length xs = len xs 0 where
  len xs y = if null xs then y — was: y+ 0
             else len (tail xs) (1+ y)
```

- ▶ Allgemeines **Muster**:
 - ▶ Monoid (ϕ, e) : ϕ assoziativ, e neutrales Element.
 - ▶ Zusätzlicher Parameter **akkumuliert** Resultat.

Weiteres Beispiel: foldr vs. foldl

- ▶ foldr ist **nicht endrekursiv**:

```
foldr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> b
foldr f z []      = z
foldr f z (x:xs) = f x (foldr f z xs)
```

- ▶ foldl ist **endrekursiv**:

```
foldl :: (a -> b -> a) -> a -> [b] -> a
foldl f z []      = z
foldl f z (x:xs) = foldl f (f z x) xs
```

Weiteres Beispiel: foldr vs. foldl

- ▶ foldr ist **nicht endrekursiv**:

```
foldr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> b
foldr f z []      = z
foldr f z (x:xs) = f x (foldr f z xs)
```

- ▶ foldl ist **endrekursiv**:

```
foldl :: (a -> b -> a) -> a -> [b] -> a
foldl f z []      = z
foldl f z (x:xs) = foldl f (f z x) xs
```

- ▶ foldl' ist **strikt** und **endrekursiv**:

```
foldl' :: (a -> b -> a) -> a -> [b] -> a
foldl' f a []      = a
foldl' f a (x:xs) =
  let a' = f a x in a' 'seq' foldl' f a' xs
```

- ▶ Für Monoid (ϕ, e) gilt: $\text{foldr } \phi \ e \ l = \text{foldl } (\text{flip } \phi) \ e \ l$

Wann welches fold?

- ▶ `foldl` endrekursiv, aber traversiert immer die **ganze** Liste.
 - ▶ `foldl` ' ferner strikt und konstanter Platzaufwand
- ▶ Wann welches fold?
- ▶ Strikte Funktionen mit `foldl` ' falten:

```
rev2 :: [a] → [a]
rev2 = foldl' (flip (:)) []
```

- ▶ Wenn nicht die ganze Liste benötigt wird, mit `foldr` falten:

```
all :: (a → Bool) → [a] → Bool
all p = foldr ((&&) ∘ p) True
```

- ▶ Potenziell **unendliche** Listen **immer** mit `foldr` falten.

Endrekursive Aktionen

▶ Nicht endrekursiv:

```
getLines' :: IO String
getLines' = do str ← getLine
              if null str then return ""
              else do rest ← getLines'
                      return (str ++ rest)
```

▶ Endrekursiv:

```
getLines :: IO String
getLines = getit "" where
  getit res = do str ← getLine
                if null str then return res
                else getit (res ++ str)
```

Fortgeschrittene Endrekursion

- ▶ **Akkumulation** von Ergebniswerten durch partiell applizierte Funktionen
 - ▶ Sonderfall von **Continuations**: es wird nicht das Ergebnis zurückgegeben, sondern eine Funktion, welche das Ergebnis erhält
- ▶ Beispiel: die Klasse `Show`
- ▶ Nur Methode `show` wäre zu langsam ($O(n^2)$):

```
class Show a where  
  show :: a → String
```

Fortgeschrittene Endrekursion

- ▶ **Akkumulation** von Ergebniswerten durch partiell applizierte Funktionen
 - ▶ Sonderfall von **Continuations**: es wird nicht das Ergebnis zurückgegeben, sondern eine Funktion, welche das Ergebnis erhält

- ▶ Beispiel: die Klasse Show

- ▶ Nur Methode show wäre zu langsam ($O(n^2)$):

```
class Show a where
  show :: a → String
```

- ▶ Deshalb zusätzlich

```
showsPrec :: Int → a → String → String
show x = showsPrec 0 x ""
```

- ▶ String wird erst aufgebaut, wenn er ausgewertet wird ($O(n)$).

Beispiel: Mengen als Listen

```
data Set a = Set [a]
```

Zu langsam wäre

```
instance Show a ⇒ Show (Set a) where  
  show (Set elems) =  
    "{" ++ intercalate "," (map show elems) ++ "}"
```

Deshalb besser

```
instance Show a ⇒ Show (Set a) where  
  showsPrec i (Set elems) = showElems elems where  
    showElems []      = ("{}") ++  
    showElems (x:xs) = ('{' :) ◦ shows x ◦ showl xs  
    where showl []      = ('}' :)  
          showl (x:xs) = (',' :) ◦ shows x ◦ showl xs
```

Effizienz durch “unendliche” Datenstrukturen

- ▶ Listen müssen nicht endlich repräsentierbar sein:
 - ▶ Nützlich für Listen mit unbekannter Länge
 - ▶ Allerdings Induktion nur für endliche Listen gültig.
- ▶ Beispiel: Fibonacci-Zahlen
 - ▶ Aus der Kaninchenzucht.
 - ▶ Sollte jeder Informatiker kennen.

```
fib' :: Int → Integer
fib' 0 = 1
fib' 1 = 1
fib' n = fib' (n-1) + fib' (n-2)
```

- ▶ Problem: baumartige Rekursion, exponentieller Aufwand.

Fibonacci-Zahlen als Strom

- ▶ Lösung: zuvor berechnete Teilergebnisse wiederverwenden.
- ▶ Sei `fibs :: [Integer]` Strom aller Fibonaccizahlen:

```
fibs 1 1 2 3 5 8 13 21 34 55
tail fibs 1 2 3 5 8 13 21 34 55
tail (tail fibs) 2 3 5 8 13 21 34 55
```

- ▶ Damit ergibt sich:

```
fibs :: [Integer]
fibs = 1 : 1 : zipWith (+) fibs (tail fibs)
```

- ▶ n-te Fibonaccizahl mit `fibs !! n`
- ▶ Aufwand: **linear**, da `fibs` nur einmal ausgewertet wird.

Implementation und Repräsentation von Datenstrukturen

- ▶ Datenstrukturen werden intern durch **Objekte** in einem **Heap** repräsentiert
- ▶ Bezeichner werden an **Referenzen** in diesen Heap gebunden
- ▶ Unendliche Datenstrukturen haben zyklische Verweise
 - ▶ Kopf wird nur **einmal** ausgewertet.

```
cycle (trace "Foo!" [5])
```

- ▶ **Anmerkung:** unendlich Datenstrukturen nur sinnvoll für **nicht-strikte** Funktionen

Überladene Funktionen sind langsam.

- ▶ Typklassen sind elegant aber **langsam**.
- ▶ Implementierung von Typklassen: **Verzeichnis** (dictionary) von Klassenfunktionen.
- ▶ Überladung wird zur **Laufzeit** aufgelöst

Überladene Funktionen sind langsam.

- ▶ Typklassen sind elegant aber **langsam**.
 - ▶ Implementierung von Typklassen: **Verzeichnis** (dictionary) von Klassenfunktionen.
 - ▶ Überladung wird zur **Laufzeit** aufgelöst
- ▶ Bei kritischen Funktionen: **Spezialisierung erzwingen** durch Angabe der Signatur
- ▶ NB: **Zahlen** (numerische Literale) sind in Haskell **überladen**!
- ▶ Bsp: `facts` hat den Typ `Num a => a -> a`

```
facts n = if n == 0 then 1 else n * facts (n-1)
```

Listen als Performance-Falle

- ▶ Listen sind **keine** Felder oder endliche Abbildungen
- ▶ Listen:
 - ▶ Beliebig lang
 - ▶ Zugriff auf n -tes Element in **linearer** Zeit ($O(n)$)
 - ▶ Abstrakt: frei erzeugter Datentyp aus Kopf und Rest
- ▶ **Felder** `Array ix a` (Modul `Data.Array` aus der Standardbibliothek)
 - ▶ **Feste** Größe (Untermenge von ix)
 - ▶ Zugriff auf n -tes Element in **konstanter** Zeit ($O(1)$)
 - ▶ Abstrakt: Abbildung Index auf Daten
- ▶ **Endliche Abbildung** `Map k v` (Modul `Data.Map`)
 - ▶ Beliebige Größe
 - ▶ Zugriff auf n -tes Element in **sublinearer** Zeit ($O(\log n)$)
 - ▶ Abstrakt: Abbildung Schlüsselbereich k auf Wertebereich v
 - ▶ Sonderfall: `Set k ≡ Map k Bool`

Zusammenfassung

- ▶ **Endrekursion**: while für Haskell.
 - ▶ Überführung in Endrekursion meist möglich.
 - ▶ Noch besser sind strikte Funktionen.
- ▶ **Speicherlecks** vermeiden: Striktheit und Endrekursion
- ▶ Compileroptimierung nutzen
- ▶ Datenstrukturen müssen nicht endlich repräsentierbar sein
- ▶ Überladene Funktionen sind langsam.
- ▶ Listen sind keine Felder oder endliche Abbildungen.