Reaktive Programmierung
Vorlesung 1 vom 19.04.2022
Was ist Reaktive Programmierung?

Christoph Lüth, Martin Ring

Universität Bremen

Sommersemester 2022

Organisatorisches

- Vorlesung: Di 12-14, MZH 1470
- Übung: Mi 12-14, MZH 1110 (nach Bedarf)
- Webseite: `www.informatik.uni-bremen.de/~cxl/lehre/rp.ss22`
- Scheinkriterien:
  - Voraussichtlich 6 Übungsblätter
  - Alle bearbeitet, insgesamt 40% (Notenspiegel PI3)
  - Übungsgruppen 2 – 4 Mitglieder
  - **Danach**: Fachgespräch **oder** Modulprüfung

Warum Reaktive Programmierung?

Herkömmliche Sprachen:
- PHP, JavaScript, Ruby, Python
- C, C++, Java

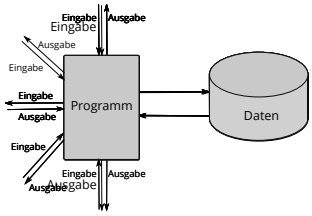
Eigenschaften:
- **Imperativ** und **prozedural**
- **Sequentiell**

Zugrundeliegendes Paradigma:

... aber die Welt ändert sich:

- Das **Netz** verbindet Rechner
- Selbst eingebettete Systeme sind vernetzt (Auto: ca. 130 Proz.)
- Mikroprozessoren sind **mehrkernig**
- Systeme sind **eingebettet**, **nebenläufig**, **reagieren** auf ihre Umwelt.

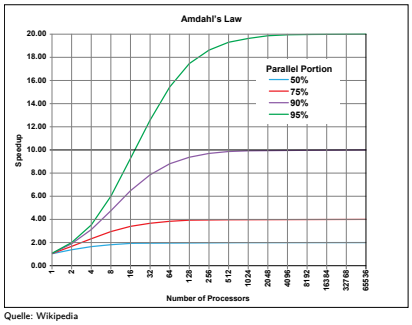
Probleme mit dem herkömmlichen Ansatz



- Problem: **Nebenläufigkeit**
- Nebenläufigkeit verursacht **Synchronisationsprobleme**
- Behandlung:
  - Callbacks (JavaScript, PHP)
  - Events (Java)
  - Global Locks (Python, Ruby)
  - Programmiersprachenkonstrukte: Locks, Semaphoren, Monitore

Amdahl's Law

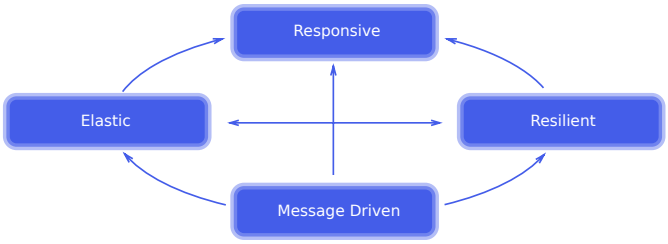
"The speedup of a program using multiple processors in parallel computing is limited by the sequential fraction of the program. For example, if 95% of the program can be parallelized, the theoretical maximum speedup using parallel computing would be 20× as shown in the diagram, no matter how many processors are used."



Quelle: Wikipedia

The Reactive Manifesto

- `http://www.reactivemanifesto.org/`

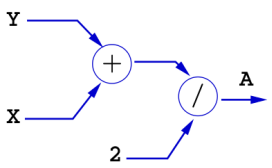


Was ist Reaktive Programmierung?

- Imperative Programmierung: Zustandsübergang
- Prozedural und OO: Verkapselter Zustand
- Funktionale Programmierung: Abbildung (mathematische Funktion)
- **Reaktive** Programmierung:
  1. **Datenabhängigkeit**
  2. **Reaktiv** = funktional + nebenläufig

Datenflusssprachen (data flow languages)

- Frühe Sprachen: VAL, SISAL, ID, LUCID (1980/1990)
- Heutige Sprachen: Esterel, Lustre (Gérard Berry, Verimag)
  - Keine **Zuweisungen**, sondern **Datenfluss**
  - **Synchron:** alle Aktionen ohne Zeitverzug
  - Verwendung in der Luftfahrtindustrie (Airbus)




```
node Average(X, Y : int)
returns (A : int);
let
   A = (X + Y) / 2 ;
tel
```

Struktur der VL

- **Kernkonzepte** in Scala und Haskell:
  - Nebenläufigkeit: Futures, Aktoren, Reaktive Ströme
  - FFP: Bidirektionale und Meta-Programmierung, FRP, sexy types
  - Robustheit: Eventual Consistency, Entwurfsmuster
- Bilingualer **Übungsbetrieb** und **Vorlesung**
  - Kein Scala-Programmierkurs
  - Erlernen von Scala ist nützlicher Seiteneffekt

Fahrplan

- Einführung
- Monaden und Monadentransformer
- Nebenläufigkeit: Futures and Promises
- Aktoren: Grundlagen & Implementierung
- Bidirektionale Programmierung
- Meta-Programmierung
- Reaktive Ströme I
- Reaktive Ströme II
- Funktional-Reaktive Programmierung
- Software Transactional Memory
- Eventual Consistency
- CRDTs
- Robustheit, Entwurfsmuster und Theorie der Nebenläufigkeit, Abschluss
- Reaktive Programmierung in der Praxis

I. Rückblick Haskell

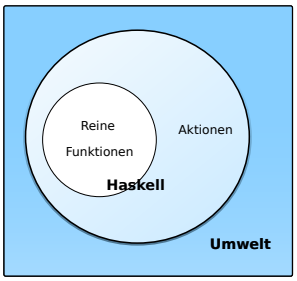
Rückblick Haskell

- Definition von Funktionen:
  - lokale Definitionen mit `let` und `where`
  - Fallunterscheidung und guarded equations
  - Abseitsregel
  - Funktionen höherer Ordnung
- Typen:
  - Basisdatentypen: `Int`, `Integer`, `Rational`, `Double`, `Char`, `Bool`
  - Strukturierte Datentypen: $[\alpha]$, (α, β)
  - Algebraische Datentypen: `data Maybe` α `= Just` α `| Nothing`

Rückblick Haskell

- Nichtstriktheit und verzögerte Auswertung
- Strukturierung:
  - Abstrakte Datentypen
  - Module
  - Typklassen

Ein- und Ausgabe in Haskell



Problem:

- Funktionen mit Seiteneffekten nicht referentiell transparent.
- `readString :: ...→String` ??

Lösung:

- Seiteneffekte am Typ erkennbar
- Aktionen können nur mit Aktionen komponiert werden
- „einmal Aktion, immer Aktion“

Aktionen als abstrakter Datentyp

- ADT mit Operationen Komposition und Lifting
- Signatur:

```
type IO α

(>>=)  :: IO α → (α→ IO β) → IO β

return :: α→ IO α
```

- Plus **elementare** Operationen (lesen, schreiben etc)

Elementare Aktionen

- Zeile von `stdin` lesen:

```
getLine  :: IO String
```

- Zeichenkette auf `stdout` ausgeben:

```
putStr   :: String→ IO ()
```

- Zeichenkette mit Zeilenvorschub ausgeben:

```
putStrLn :: String→ IO ()
```

Die do-Notation

- Syntaktischer Zucker für IO:

```
echo =
  getLine
  >>= λs-> putStrLn s
  >> echo
```

$\Longleftrightarrow$

```
echo = do
  s<- getLine
  putStrLn s
  echo
```

  - Rechts sind >>=, >> implizit.
- Es gilt die **Abseitsregel**.
  - Einrückung der ersten Anweisung nach do bestimmt Abseits.

II. Zustandsabhängige Berechnungen

Funktionen mit Zustand

- Idee: Seiteneffekt **explizit** machen
- Funktion $f : A \to B$ mit Seiteneffekt in **Zustand** S:

$$f : A \times S \to B \times S$$
$$\cong$$
$$f : A \to S \to B \times S$$

- Datentyp: $S \to B \times S$
- Komposition: Funktionskomposition und uncurry

```
curry   :: ((α, β) -> γ)-> α-> β-> γ
uncurry :: (α-> β-> γ)-> (α, β) -> γ
```


In Haskell: Zustände explizit

- **Zustandstransformer:** Berechnung mit Seiteneffekt in Typ σ (polymorph über α)

```
type State σ α = σ-> (α, σ)
```

- Komposition zweier solcher Berechnungen:

```
comp :: State σ α-> (α-> State σ β)-> State σ β
comp f g = uncurry g ∘ f
```

- Trivialer Zustand:

```
lift :: α-> State σ α
lift = curry id
```

- Lifting von Funktionen:

```
map :: (α-> β)-> State σ α-> State σ β
map f g = (λ(a, s)-> (f a, s)) ∘ g
```


Zugriff auf den Zustand

- Zustand lesen:

```
get :: (σ-> α)-> State σ α
get f s = (f s, s)
```

- Zustand setzen:

```
set :: (σ-> σ)-> State σ ()
set g s = ((), g s)
```


Einfaches Beispiel

- Zähler als Zustand:

```
type WithCounter α = State Int α
```

- Beispiel: Funktion, die in Kleinbuchstaben konvertiert und **zählt**

```
cntToL :: String-> WithCounter String
cntToL [] = lift ""
cntToL (x:xs)
  | isUpper x =  cntToL xs `comp`
                 λys-> set (+1) `comp`
                 λ()-> lift (toLower x: ys)
  | otherwise = cntToL xs `comp` λys-> lift (x: ys)
```

- Hauptfunktion (verkapselt State):

```
cntToLower :: String-> (String, Int)
cntToLower s = cntToL s 0
```


III. Monaden

Monaden als Berechnungsmuster

- In cntToL werden zustandsabhängige Berechnungen verkettet.
- So ähnlich wie bei Aktionen!

State:

```
type State σ α
```

```
comp :: State σ α ->
        (α-> State  σ β)->
        State σ β
```

```
lift :: α-> State σ α
```

```
map  :: (α-> β)-> State σ α->
        State σ β
```

Aktionen:

```
type IO α
```

```
(>>=)  :: IO α ->
          (α-> IO β) ->
          IO β
```

```
return :: α-> IO α
```

```
fmap   :: (α-> β)-> IO α->
          IO β
```

Berechnungsmuster: **Monade**

Monaden als Berechngsmuster

Eine Monade ist:

- **philosophisch**: metaphysisches Konzept (Leibnitz)
- **mathematisch**: durch Operationen und Gleichungen definierte, verallgemeinerte algebraische Theorie (MacLane, Kelly)
- als **Berechnungsmuster**: **verknüpfbare** Berechnungen mit einem **Ergebnis** (Moggi)
- in **Haskell**: durch mehrere Typklassen definierte Operationen mit **Eigenschaften** (Wadler)

Monaden in Haskell

- Aktion auf Funktionen:

```
class Functor f where
  fmap :: (a → b) → f a → f b
```

`fmap` bewahrt Identität und Komposition:

```
   fmap id  ==  id
fmap (f ∘ g)  ==  fmap f ∘ fmap g
```

- Die Eigenschaften **sollten** gelten, können aber nicht überprüft werden.
  - Standard: "*Instances of Functor should satisfy the following laws.*"

Monaden in Haskell

- Applicative:

```
class Functor f⇒ Applicative f where
  pure :: a→ f a
  <*> :: f (a → b) → f a → f b
```

Eigenschaften: links-neutralität, bewahrt Komposition, Homomorphismus:

```
                pure id <*> v == v
   pure (∘) <*> u <*> v <*> w == u <*> (v <*> w)
            pure f <*> pure x == pure (f x)
                 u <*> pure y == pure ($ y) <*> u
```


Monaden in Haskell

- Verkettung (~~>>=~~) und Lifting (`return`):

```
class Applicative m⇒ Monad m where
  (~~>>=~~)   :: m a → (a → m b) → m b
  return :: a → m a
```

>>=ist assoziativ und `return` das neutrale Element:

```
     return a >>= k  ==  k a
       m >>= return  ==  m
m >>= (λx → k x >>= h) ==  (m >>= k) >>= h
```

- Auch diese Eigenschaften können nicht geprüft werden.
- Den syntaktischen Zucker (`do`-Notation) gibt's umsonst dazu.

Monaden mit Möglichkeiten

- Alternativen:

```
class Applicative f ⇒ Alternative f where
  empty :: f a
  <|>   :: f a→ f a→ f a
```

- Monaden mit Alternative (e.g. List):

```
class (Alternative m, Monad m) ⇒ MonadPlus m where
  mzero :: m a
  mzero = empty
  mplus :: m a → m a → m a
  mplus = (<|>)
```

- Gleichungen: `mzero` Identität für `mplus` und>>=, `mplus` assoziativ.

Beispiele für Monaden

- Zustandstransformer: `Reader`, `Writer`, `State`
- Fehler und Ausnahmen: `Maybe`, `Either`
- Mehrdeutige Berechnungen: `List`, `Set`

Die Reader-Monade

- Aus dem Zustand wird nur gelesen:

```
data Reader σ α = R {run :: σ→ α}
```

- Instanzen:

```
instance Functor (Reader σ) where
  fmap f (R g) = R (f. g)
```

```
instance Monad (Reader σ) where
  return a = R (const a)
  R f >>= g = R $ λs→ run (g (f s)) s
```

- Nur eine elementare Operation:

```
get :: (σ→ α)→ Reader σ α
get f = R $ λs→ f s
```


Fehler und Ausnahmen

- `Maybe` als Monade:

```
instance Functor Maybe where
  fmap f (Just a) = Just (f a)
  fmap f Nothing  = Nothing
```

```
instance Monad Maybe where
  Just a >>= g  = g a
  Nothing >>= g = Nothing
  return = Just
```

  - Ähnlich mit `Either`
- Berechnungsmodell: **Ausnahmen** (Fehler)
  - `f :: α→ Maybe β` ist Berechnung mit möglichem Fehler
  - Fehlerfreie Berechnungen werden verkettet
  - Fehler (`Nothing` oder `Left x`) werden propagiert

Mehrdeutigkeit

- `List` als Monade:
  - Können wir so nicht hinschreiben, Syntax vordefiniert

```
instance Functor [α] where
  fmap = map

instance Monad [α] where
  a : as >>= g = g a ++ (as >>= g)
  [] >>= g = []
  return a = [a]
```

- Berechnungsmodell: Mehrdeutigkeit
  - `f :: α → [β]` ist Berechnung mit **mehreren** möglichen Ergebnissen
  - Verkettung: Anwendung der folgenden Funktion auf **jedes** Ergebnis (`concatMap`)

Beispiel

- Berechnung aller Permutationen einer Liste:
  1. Ein Element überall in eine Liste einfügen:

```
ins :: α → [α] → [[α]]
ins x [] = return [x]
ins x (y:ys) = [x:y:ys] ++ do
  is ← ins x ys
  return $ y:is
```

  2. Damit Permutationen (rekursiv):

```
perms :: [α] → [[α]]
perms [] = return []
perms (x:xs) = do
  ps ← perms xs
  is ← ins x ps
  return is
```


Der Listenmonade in der Listenkomprehension

- Berechnung aller Permutationen einer Liste:
  1. Ein Element überall in eine Liste einfügen:

```
ins' :: α → [α] → [[α]]
ins' x [] = [[x]]
ins' x (y:ys) = [x:y:ys] ++ map (y :) (ins' x ys)
```

  2. Damit Permutationen (rekursiv):

```
perms' :: [α] → [[α]]
perms' [] = [[]]
perms' (x:xs) = [is | ps ← perms' xs, is ← ins' x ps ]
```

- Listenkomprehension ≅ Listenmonade

Zum Nachdenken

Listen sind mehrdeutige Berechnungen mit einer **Reihenfolge**.

1. Was bedeutet das?
2. Wie können wir das ändern?
3. Wie implementieren wir das?

IV. IO ist keine Magie

Referenzen in Haskell

- Zustand als **finite map** von Referenzen auf Werte

```
data Mem α = Mem { fresh :: Int, mem  :: Map Int α }

type Stateful α β = State (Mem α) β
```

- Ungetypt (`SimpleRefs`)
- Typ der Werte ist Typparameter des Zustands

```
readRef  :: Ref → Stateful α α
writeRef :: Ref → α → Stateful α ()
```


Zum Nachdenken

- Wie können wir Referenzen **typisieren**?
  - Refenzen `Ref α` verweist auf Werte vom Typ `α`
- Was ist das Problem? Der Typ von `Mem`:

```
data Mem α = Mem { fresh :: Int, mem  :: Map Int α }
```

- Getypt (`Refs`): nutzt **dynamische Typen** (`Dynamic`)

```
data Mem = Mem { fresh :: Int, mem  :: Map Int Dynamic }

readRef  :: Typeable α⇒ Ref α→ Stateful α
writeRef :: Typeable α⇒ Ref α→ α→ Stateful ()
```


Implizite vs. explizite Zustände

- Wie funktioniert jetzt `IO`?
- Nachteil von `State`: Zustand ist **explizit**
  - Kann dupliziert werden
- Daher: Zustand **implizit** machen
  - Datentyp verkapseln (kein `run`)
  - Zugriff auf `State` nur über elementare Operationen

Aktionen als Zustandstransformationen

- **Idee**: Aktionen sind Transformationen auf Systemzustand S
- S beinhaltet
  - Speicher als Abbildung $A \rightharpoonup V$ (Adressen A, Werte V)
  - Zustand des Dateisystems
  - Zustand des Zufallsgenerators
- In Haskell: Typ `RealWorld`
  - "Virtueller" Typ, Zugriff nur über elementare Operationen
  - Entscheidend nur Reihenfolge der Aktionen

Zusammenfassung

- War das jetzt **reaktiv?**
  - Haskell ist **funktional**
  - Für eine reaktive Sprache fehlt **Nebenläufigkeit**
- Nächstes Mal:
  - Monaden **komponieren** — Monadentransformer
- Danach: Nebenläufigkeit in Haskell und Scala