Intermediate Functional Programming in Haskell

Universität Bielefeld, Sommersemester 2015

Jonas Betzendahl & Stefan Dresselhaus

Übersicht I

Primitive Datentypen sind eine Annotation, wie die Bits im Speicher interpretiert werden sollen.

Primitive Datentypen sind eine Annotation, wie die Bits im Speicher interpretiert werden sollen.
Einige primitive Datentypen sollten euch aus anderen Programmiersprachen schon bekannt sein:

- Zahlen (z.B. Int, Integer, Float, Double, ...)
- Zeichenketten (z.B. String, UTF-8-Strings, ...)
- Bool

Es gibt auch Datentypen höherer Ordnung. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie alleine nicht vollständig sind.

Es gibt auch Datentypen höherer Ordnung. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie alleine nicht vollständig sind.
Auch hier sollten schon einige bekannt sein:
(a,k,v steht hier jeweis für einen (primitiven) Datentypen)

- Liste von a
- Hashmap von k und v
- Vektor von a
- Tree von a
- Zusammengesetzte Typen (z.B. Structs in C/C++)

Es gibt auch Datentypen höherer Ordnung. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie alleine nicht vollständig sind.
Auch hier sollten schon einige bekannt sein:
(a,k,v steht hier jeweis für einen (primitiven) Datentypen)

- Liste von a
- Hashmap von k und v
- Vektor von a
- Tree von a
- Zusammengesetzte Typen (z.B. Structs in C/C++)

Im folgenden gehen wir auf 2 wesentliche zusammengesetzte Typen in Haskell ein: Maybe und Either.

Einen neuen Datentypen definieren wir in Haskell mit dem Keyword `data`:

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

Einen neuen Datentypen definieren wir in Haskell mit dem Keyword `data`:

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

Was hat das für einen Sinn?

Einen neuen Datentypen definieren wir in Haskell mit dem Keyword `data`:

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

Was hat das für einen Sinn?
Maybe gibt das Ergebnis einer Berechnung an, die fehlschlagen kann.
In klassischen Sprachen wird hier meist ein „abgesprochener“ Fehlerzustand zurückgegeben (0, -1, null, ...). In Haskell wird dies über den Rückgabetyp deutlich gemacht.

Nachteile

- Ein neuer Datentyp, den man kennen muss

Nachteile

- Ein neuer Datentyp, den man kennen muss

Vorteile

- keine Absprachen, die man vergessen kann
- einheitliche Behandlung aller Fälle
- mehrere möglicherweise fehlschlagende Operationen gruppieren und nur solange evaluieren, bis die erste fehlschlägt oder alle erfolgreich sind

Beispiel: Finden eines Elementes in einer Liste

Beispiel: Finden eines Elementes in einer Liste

```
ghci > import Data.List
ghci > findIndex (== 5) [1..10]
Just 4                  -- [1..10] !! 4 => 5

ghci > findIndex (== 1000) [1..10]
Nothing
```

Beispiel: Finden eines Elementes in einer Liste

```
ghci > import Data.List
ghci > findIndex (== 5) [1..10]
Just 4                    -- [1..10] !! 4 => 5

ghci > findIndex (== 1000) [1..10]
Nothing
```

Da wir 1000 in der Liste der Zahlen von 1-10 nicht finden können, haben wir keinen gültigen Index, daher bekommen wir ein Nothing.

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

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

Was hat das für einen Sinn?

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

Was hat das für einen Sinn?
Either benutzt man, wenn man ein erwartetes Ergebnis `Right b` vom Typen `b` hat **oder** einen Fehlerzustand `Left a` vom Typen `a`. Meistens ist das erste Argument `String` um eine lesbare Fehlermeldung zu bekommen.

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

Was hat das für einen Sinn?
Either benutzt man, wenn man ein erwartetes Ergebnis `Right b` vom Typen `b` hat **oder** einen Fehlerzustand `Left a` vom Typen `a`.
Meistens ist das erste Argument `String` um eine lesbare Fehlermeldung zu bekommen.

Einfach zu merken: „Right“ ist der „richtige“ Fall.

Beispiele für eine Benutzung von Either:

```
parse5 :: String -> Either String Int
parse5 "5" = Right 5
parse5 _   = Left "Could not parse 5"

parse5 "5"   -- Right 5
parse5 "abc" -- Left "Could not parse 5"
```

Viele Typen haben ähnliche oder gleiche Eigenschaften. Diese Eigenschaften fasst man zu Typklassen zusammen.

Viele Typen haben ähnliche oder gleiche Eigenschaften. Diese Eigenschaften fasst man zu Typklassen zusammen.

- Zahlen kann man alle verrechnen, auch wenn z.B. Int und Double verschiedene Typen haben
- Listen, Vektoren, Arrays haben alle Elemente, über die man z.B. iterieren kann
- Maybe, Either, Listen, etc. haben (vielleicht) Elemente, die man verändern kann

Viele Typen haben ähnliche oder gleiche Eigenschaften. Diese Eigenschaften fasst man zu Typklassen zusammen.

- Zahlen kann man alle verrechnen, auch wenn z.B. Int und Double verschiedene Typen haben
- Listen, Vektoren, Arrays haben alle Elemente, über die man z.B. iterieren kann
- Maybe, Either, Listen, etc. haben (vielleicht) Elemente, die man verändern kann

Warnung: Typklassen haben nichts mit den Klassen der Objektorientierung zu tun, sondern eher mit Templates und abstrakten Klassen

```haskell
class  Eq a  where
     (==) :: a -> a -> Bool
--or (/=) :: a -> a -> Bool

class Eq a => Ord a  where
     (<=) :: a -> a -> Bool
-- definiert automatisch: compare, >=, <, >, max, min
```

```haskell
class  Eq a  where
     (==) :: a -> a -> Bool
--or (/=) :: a -> a -> Bool

class Eq a => Ord a  where
     (<=) :: a -> a -> Bool
-- definiert automatisch: compare, >=, <, >, max, min
```

Im folgenden stellen wir 3 Zentrale Typklassen vor: Functor, Applicative, Monad

Ein Funktor F lässt sich auf jedem Datentypen definieren, der sowas wie einen „Inhalt“ hat.

Ein Funktor F lässt sich auf jedem Datentypen definieren, der sowas wie einen „Inhalt“ hat.
Genauer: Er wird definiert über die Funktion `fmap`, die es erlaubt eine Funktion auf den Inhalt anzuwenden.

```
class Functor f where
    fmap :: (a -> b) -> f a -> f b
```

`f` heisst hier **der Kontext**, in dem a existiert.

Ein Funktor F lässt sich auf jedem Datentypen definieren, der sowas wie einen „Inhalt" hat.
Genauer: Er wird definiert über die Funktion `fmap`, die es erlaubt eine Funktion auf den Inhalt anzuwenden.

```
class Functor f where
    fmap :: (a -> b) -> f a -> f b
```

`f` heisst hier **der Kontext**, in dem a existiert.

Spoiler: Liste ist ein Funktor. Maybe auch. Wieso?

Hilfreiche Analogie:
Für den Anfang kann man sich den **Kontext** als eine Kiste vorstellen, in der etwas liegt.

Hilfreiche Analogie:
Für den Anfang kann man sich den **Kontext** als eine Kiste vorstellen, in der etwas liegt.

`fmap` wertet also nur Funktionen, die auf dem *Inhalt* der Kiste funktionieren würden, zu Funktionen auf, die auf *Kisten mit Dingen* funktionieren.

Hilfreiche Analogie:
Für den Anfang kann man sich den **Kontext** als eine Kiste vorstellen, in der etwas liegt.

`fmap` wertet also nur Funktionen, die auf dem *Inhalt* der Kiste funktionieren würden, zu Funktionen auf, die auf *Kisten mit Dingen* funktionieren.

Man kann `fmap` daher auch etwas anders Klammern:

```
fmap :: (a -> b) -> (f a -> f b)
```

`fmap` nimmt somit eine Funktion und gibt eine neue Funktion zurück, die auf dem Kontext `f` funktioniert.

Functor-Instanz von Maybe:

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

Functor-Instanz von Maybe:

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

Functor-Instanz von Listen:

```
instance Functor [] where
    fmap f (x:xs) = f x : (fmap f xs)
    fmap _ []     = []
```

fmap auf Listen ist einfach das bekannte map

Beispiel:

```
ghci > fmap (+1) (Just 3)
```

Beispiel:

```
ghci > fmap (+1) (Just 3)
       Just 4
ghci > fmap (+1) Nothing
```

Beispiel:

```
ghci > fmap (+1) (Just 3)
       Just 4
ghci > fmap (+1) Nothing
       Nothing
ghci > fmap (+1) [1..10]
```

Beispiel:

```
ghci > fmap (+1) (Just 3)
       Just 4
ghci > fmap (+1) Nothing
       Nothing
ghci > fmap (+1) [1..10]
       [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11]
ghci > fmap (+1) (Right 2)
```

Beispiel:

```
ghci > fmap (+1) (Just 3)
       Just 4
ghci > fmap (+1) Nothing
       Nothing
ghci > fmap (+1) [1..10]
       [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11]
ghci > fmap (+1) (Right 2)
       Right 3
ghci > fmap (+1) (Left 2)
```

Beispiel:

```
ghci > fmap (+1) (Just 3)
       Just 4
ghci > fmap (+1) Nothing
       Nothing
ghci > fmap (+1) [1..10]
       [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11]
ghci > fmap (+1) (Right 2)
       Right 3
ghci > fmap (+1) (Left 2)
       Left 2
```

Funktoren sind mathematische Objekte mit Eigenschaften. Damit der Compiler auch die richtigen Optimierungen machen kann, muss jeder Funktor folgende Regeln erfüllen:

Funktoren sind mathematische Objekte mit Eigenschaften. Damit der Compiler auch die richtigen Optimierungen machen kann, muss jeder Funktor folgende Regeln erfüllen:

```haskell
-- Strukturerhaltung
fmap id = id
```

Die Datenstruktur darf sich nicht ändern.

Funktoren sind mathematische Objekte mit Eigenschaften. Damit der Compiler auch die richtigen Optimierungen machen kann, muss jeder Funktor folgende Regeln erfüllen:

```haskell
-- Strukturerhaltung
fmap id = id
```

Die Datenstruktur darf sich nicht ändern.

```haskell
-- Composability
fmap (f . g) = fmap f . fmap g
```

Mehrere `fmap`s hintereinander dürfen zusammengefasst werden, ohne, dass sich das Ergebnis ändert.

Negativbeispiel

```
fmap' f []     = []
fmap' f (a:as) = (f a):a:(fmap' f as)
```

Negativbeispiel

```
fmap' f []     = []
fmap' f (a:as) = (f a):a:(fmap' f as)

fmap' id [1,2,3] = [1,1,2,2,3,3] /= [1,2,3]
```

Negativbeispiel

```
fmap' f Nothing  = Nothing
fmap' f (Just a) = Just (f (f a))
```

Negativbeispiel

```
fmap' f Nothing  = Nothing
fmap' f (Just a) = Just (f (f a))
```

```
(fmap' (+1) . fmap' (*2)) (Just 1)
= fmap' (+1) (Just ((*2) ((*2) 1))
= fmap' (+1) (Just 4)
= Just 6
```

```
(fmap' ((+1).(*2)) (Just 1)
= Just (((+1).(*2).(+1).(*2)) 1)
= Just 7
```

Applicative funktioniert ähnlich zu Funktor. Hierbei kann man auch mit Funktionen in einem Kontext arbeiten.

Applicative funktioniert ähnlich zu Funktor. Hierbei kann man auch mit Funktionen in einem Kontext arbeiten.

```
class Functor f => Applicative f where
    pure  :: a -> f a
    (<*>) :: f (a -> b) -> f a -> f b
```

Applicative funktioniert ähnlich zu Funktor. Hierbei kann man auch mit Funktionen in einem Kontext arbeiten.

```
class Functor f => Applicative f where
    pure  :: a -> f a
    (<*>) :: f (a -> b) -> f a -> f b
```

`pure` bringt etwas in den Standardkontext (z.B. Liste mit 1 Element, Just x, Right x, ..).
<*> ist fast ein `fmap`, nur dass die Funktion auch in demselben Kontext liegt.

Applicative-Instanz von Maybe:

```
instance Applicative Maybe where
    pure                         = Just
    Nothing  <*> _               = Nothing
    (Just f) <*> something       = fmap f something
```

Applicative-Instanz von Maybe:

```
instance Applicative Maybe where
    pure                     = Just
    Nothing  <*> _           = Nothing
    (Just f) <*> something   = fmap f something
```

Applicative-Instanz von Listen:

```
instance Applicative [] where
    pure a         = [a]
    (f:fs) <*> x = fmap f x ++ (fs <*> x)
    []     <*> _ = []
```

```
ghci > import Control.Applicative
ghci > Just (+1) <*> Just 3
```

```
ghci > import Control.Applicative
ghci > Just (+1) <*> Just 3
       Just 4
ghci > Nothing <*> Just 3
```

```
ghci > import Control.Applicative
ghci > Just (+1) <*> Just 3
       Just 4
ghci > Nothing <*> Just 3
       Nothing
ghci > pure (+1) <*> Right 2
```

```
ghci > import Control.Applicative
ghci > Just (+1) <*> Just 3
       Just 4
ghci > Nothing <*> Just 3
       Nothing
ghci > pure (+1) <*> Right 2
       Right 3
ghci > pure (+1) <*> Just 2
```

```
ghci > import Control.Applicative
ghci > Just (+1) <*> Just 3
       Just 4
ghci > Nothing <*> Just 3
       Nothing
ghci > pure (+1) <*> Right 2
       Right 3
ghci > pure (+1) <*> Just 2
       Just 3
ghci > [(+1),(*2)] <*> [1..5]
```

```
ghci > import Control.Applicative
ghci > Just (+1) <*> Just 3
       Just 4
ghci > Nothing <*> Just 3
       Nothing
ghci > pure (+1) <*> Right 2
       Right 3
ghci > pure (+1) <*> Just 2
       Just 3
ghci > [(+1),(*2)] <*> [1..5]
       [2,3,4,5,6,2,4,6,8,10]
ghci > pure (*) <*> [1..3] <*> [1..3]
```

```
ghci > import Control.Applicative
ghci > Just (+1) <*> Just 3
       Just 4
ghci > Nothing <*> Just 3
       Nothing
ghci > pure (+1) <*> Right 2
       Right 3
ghci > pure (+1) <*> Just 2
       Just 3
ghci > [(+1),(*2)] <*> [1..5]
       [2,3,4,5,6,2,4,6,8,10]
ghci > pure (*) <*> [1..3] <*> [1..3]
       [1,2,3,2,4,6,3,6,9]
```

Wozu Monaden?

Wozu Monaden?

- Man kann auch ohne funktional programmieren

Wozu Monaden?

- Man kann auch ohne funktional programmieren
- Monaden verhalten sich wie ein Semikolon in anderen Sprachen

Wozu Monaden?

- Man kann auch ohne funktional programmieren
- Monaden verhalten sich wie ein Semikolon in anderen Sprachen
- Monaden „arbeiten" im Hintergrund

Beispiel

```haskell
f            :: Maybe Header
getInbox     :: Maybe Folder
getFirstMail :: Folder -> Maybe Mail
getHeader    :: Mail -> Maybe Header
```

Beispiel

```
f            :: Maybe Header
getInbox     :: Maybe Folder
getFirstMail :: Folder -> Maybe Mail
getHeader    :: Mail -> Maybe Header
```

Ohne Monaden:

```
f = case getInbox of
      (Just folder) ->
          case getFirstMail folder of
            (Just mail) ->
                case getHeader mail of
                  (Just head) -> return head
                  Nothing     -> Nothing
            Nothing     -> Nothing
      Nothing       -> Nothing
```

Beispiel

```haskell
f            :: Maybe Header
getInbox     :: Maybe Folder
getFirstMail :: Folder -> Maybe Mail
getHeader    :: Mail -> Maybe Header
```

Mit Monaden:

```haskell
f = do
     folder <- getInbox
     mail   <- getFirstMail folder
     header <- getHeader mail
     return header
```

Wie funktioniert diese Magie?

Wie funktioniert diese Magie?
Monaden benutzen die Funktion „bind “ (»=) um Berechnungen zu verketten und arbeit für uns im Hintergrund zu übernehmen.

Wie funktioniert diese Magie?
Monaden benutzen die Funktion „bind “ (»=) um Berechnungen zu verketten und arbeit für uns im Hintergrund zu übernehmen.

```
class Applicative m => Monad m where
  return :: a -> m a
  (>>=)  :: m a -> (a -> m b) -> m b
```

Wie funktioniert diese Magie?
Monaden benutzen die Funktion „bind “ (»=) um Berechnungen zu verketten und arbeit für uns im Hintergrund zu übernehmen.

```
class Applicative m => Monad m where
  return :: a -> m a
  (>>=)  :: m a -> (a -> m b) -> m b
```

`return` funktioniert analog zu `pure` und bringt ein Element in den Standardkontext.
»= enthält die ganze Magie. Prinzipiell „packt“ es ein `m a` aus und wendet die mitgegegbene Funktion an.

Monad-Instanz von Maybe:

```haskell
instance Monad Maybe where
    return              = pure   -- = Just
    (Just a) >>= f      = f a
    Nothing >>= _       = Nothing
```

Monad-Instanz von Maybe:

```haskell
instance Monad Maybe where
    return                  = pure    -- = Just
    (Just a) >>= f          = f a
    Nothing >>= _           = Nothing
```

Monad-Instanz von Listen:

```haskell
instance Monad [] where
    return       = pure
    (x:xs) >>= f = f x ++ (xs >>= f)
    []     >>= _ = []
```

Zurück zu unserem Beispiel. Wie helfen nun Monaden?

Zurück zu unserem Beispiel. Wie helfen nun Monaden?

```
f = case getInbox of
      (Just folder) ->
          case getFirstMail folder of
            (Just mail) ->
                case getHeader mail of
                  (Just head) -> return head
                  Nothing     -> Nothing
            Nothing     -> Nothing
      Nothing       -> Nothing
```

Schreiben wir mittels »= um zu:

Schreiben wir mittels »= um zu:

```
f = getInbox >>= (\folder ->
        getFirstMail folder >>= (\mail ->
            getHeader mail >>= (\header ->
                return header
            )
        )
    )
```

Schreiben wir mittels »= um zu:

```
f = getInbox >>= (\folder ->
        getFirstMail folder >>= (\mail ->
            getHeader mail >>= (\header ->
                return header
            )
        )
    )
```

»= fäng hier den Nothing-Fall ab und wir geben eine Funktion mit, die nur noch den Just-Fall behandeln muss.

Da dieses ganze `x »= (\v -> ... »= (\w -> ...))` hässlich ist, gibt es die do-notation.
Wir können das Beispiel von oben also umschreiben als:

Da dieses ganze `x >>= (\v -> ... >>= (\w -> ...))` hässlich ist, gibt es die do-notation.
Wir können das Beispiel von oben also umschreiben als:

```haskell
f = do
      folder <- getInbox
      mail   <- getFirstMail folder
      header <- getHeader mail
      return header
```

Da dieses ganze `x >>= (\v -> ... >>= (\w -> ...))` hässlich ist, gibt es die do-notation.
Wir können das Beispiel von oben also umschreiben als:

```
f = do
      folder <- getInbox
      mail   <- getFirstMail folder
      header <- getHeader mail
      return header
```

`<-` extrahiert hier den Wert „aus der Monade“:

```
getInbox :: Maybe Folder
folder   :: Folder
```

Da dieses ganze `x >>= (\v -> ... >>= (\w -> ...))` hässlich ist, gibt es die do-notation.
Wir können das Beispiel von oben also umschreiben als:

```
f = do
      folder <- getInbox
      mail   <- getFirstMail folder
      header <- getHeader mail
      return header
```

`<-` extrahiert hier den Wert „aus der Monade“:

```
getInbox :: Maybe Folder
folder   :: Folder
```

Dieses automatische Zusammenfassen funktioniert nur, wenn **alle** Funktionen als letzten Wert etwas in derselben Monade zurückgeben.

In manchen Fällen können wir sogar auf die do-notation verzichten. Wenn jeder zurückgegebene Wert direkt von der nächsten Funktion gebraucht wird, dann sparen wir uns die lambda-Ausdrücke und verketten direkt:

In manchen Fällen können wir sogar auf die do-notation verzichten. Wenn jeder zurückgegebene Wert direkt von der nächsten Funktion gebraucht wird, dann sparen wir uns die lambda-Ausdrücke und verketten direkt:

```
f = getInbox >>= getFirstMail >>= getHeader
```

In manchen Fällen können wir sogar auf die do-notation verzichten. Wenn jeder zurückgegebene Wert direkt von der nächsten Funktion gebraucht wird, dann sparen wir uns die lambda-Ausdrücke und verketten direkt:

```
f = getInbox >>= getFirstMail >>= getHeader
```

Eine weitere Funktion, die einem in diesem Kontext begegnet ist », welche das Ergebnis verwirft und die nächste Funktion ohne Parameter aufruft:

```
main = putStrLn "Geben sie etwas ein."
                >>  getLine
                >>= putStrLn
```

In manchen Fällen können wir sogar auf die do-notation verzichten. Wenn jeder zurückgegebene Wert direkt von der nächsten Funktion gebraucht wird, dann sparen wir uns die lambda-Ausdrücke und verketten direkt:

```haskell
f = getInbox >>= getFirstMail >>= getHeader
```

Eine weitere Funktion, die einem in diesem Kontext begegnet ist », welche das Ergebnis verwirft und die nächste Funktion ohne Parameter aufruft:

```haskell
main = putStrLn "Geben sie etwas ein."
                >>  getLine
                >>= putStrLn
```

Dieses Programm gibt einen String aus (mit dem Ergebnis `IO ()`) und wir schmeissen das Ergebnis weg und rufen einfach die nächsten Funktionen auf.

Monaden haben ähnlich zu Functor und Applicative auch mathematische Regeln, die man erfüllen Muss.

- Linksidentität

```
return x >>= f == f x
```

- Rechtsidentität

```
m >>= return == m
```

- Assoziativität

```
(m >>= f) >>= g == m >>= (\x -> f x >>= g)
```

Monaden haben ähnlich zu Functor und Applicative auch mathematische Regeln, die man erfüllen Muss.

- Linksidentität

```haskell
return x >>= f == f x
```

- Rechtsidentität

```haskell
m >>= return == m
```

- Assoziativität

```haskell
(m >>= f) >>= g == m >>= (\x -> f x >>= g)
```

Die Assoziativität ist etwas schwer zu erkennen. Deutlicher wird es, wenn wir eine umgeformte Funktion definieren:

```haskell
(<=<) :: (Monad m) => (b -> m c) -> (a -> m b) -> (a -> m c
f <=< g = (\x -> g x >>= f)
```

Somit gibt sich für die Regeln:

```
return <=< f     == f
f <=< return     == f
(f <=< g) <=< h == f <=< (g <=< h)
```

Somit gibt sich für die Regeln:

```
return <=< f     == f
f <=< return     == f
(f <=< g) <=< h == f <=< (g <=< h)
```

Diese Regeln sind relativ „natürlich“, da sie im prinzip nur Funktionskomposition `(.)` auf Monaden wohldefinieren.

Die bereits bekannte List-Comprehension

```
let l = [x*y | x <- [1..5], y <- [1..5], x + y == 5]
```

ist nur syntaktischer Zucker für die monadische do-notation:

```
let l = do
        x <- [1..5]
        y <- [1..5]
        guard (x + y == 5)
        return x*y
```

mit

```
guard :: (MonadPlus m) => Bool -> m ()
guard True = return ()
guard False = mzero
```

Häufig hat man das Problem, dass man einen Zustand in einem Programm herumreichen möchte.

Häufig hat man das Problem, dass man einen Zustand in einem Programm herumreichen möchte.
Hierzu gibt es 2 Möglichkeiten:

1. Den Zustand immer explizit an die Funktion übergeben
2. Den Zustand in einer Monade verstecken

Häufig hat man das Problem, dass man einen Zustand in einem Programm herumreichen möchte.
Hierzu gibt es 2 Möglichkeiten:

1. Den Zustand immer explizit an die Funktion übergeben
2. Den Zustand in einer Monade verstecken

Letzteres hat den Vorteil, dass man auch Funktionen aufwerten kann, die den Zustand ignorieren.

Beispiel:

```
countme :: (a -> b) -> a -> State Int b
countme f a = do
              modify (+1)
              return (f a)

example :: State Int Int
example = do
              x <- countme (+2) 2
              y <- return (x*x)
              z <- countme (-2) y
              return z

examplemain = runState example 0
-- -> (14,2), 14 = wert von z, 2 = interner counter
```

Beispiel 2:

```
data Spieler = X | O
data TicTacToeSpielfeld = Array (Int,Int) Spieler
data TicTacToe a = State TicTacToeSpielfeld a

macheSpielzug :: (Int, Int) -> Spieler -> TicTacToe ()
macheSpielzug pos s = modify ((flip (//)) [(pos,s)])

spielVorbei :: TicTacToe Bool
spielVorbei = do
              spielfeld <- get
              return (istVorbei spielfeld)
```