

# Fortgeschrittene Funktionale Programmierung in Haskell

Universität Bielefeld, Sommersemester 2015

Jonas Betzendahl & Stefan Dresselhaus

# Übersicht I

- 1 Record-Syntax
- 2 State-Monad
- 3 Kombination von Monaden
- 4 Monad-Transformer

Nehmen wir an, wir wollen den folgenden Produkttypen definieren:

```
data V2 a = V2 a a
```

Nehmen wir an, wir wollen den folgenden Produkttypen definieren:

```
data V2 a = V2 a a
```

Nun wollen wir auch einzelne Elemente auslesen und setzen. Dafür müssen wir ein paar Hilfsfunktionen definieren.

Zum Auslesen:

Zum Auslesen:

```
x :: V2 a -> a  
x (V2 x' _) = x'
```

Zum Auslesen:

```
x :: V2 a -> a  
x (V2 x' _) = x'
```

```
y :: V2 a -> a  
y (V2 _ y') = y'
```

Zum Auslesen:

```
x :: V2 a -> a  
x (V2 x' _) = x'
```

```
y :: V2 a -> a  
y (V2 _ y') = y'
```

Und zum Setzen:



Zum Auslesen:

```
x :: V2 a -> a  
x (V2 x' _) = x'
```

```
y :: V2 a -> a  
y (V2 _ y') = y'
```

Und zum Setzen:

```
sx :: a -> V2 a -> V2 a  
sx x (V2 _ y) = V2 x y
```

Zum Auslesen:

```
x :: V2 a -> a  
x (V2 x' _) = x'
```

```
y :: V2 a -> a  
y (V2 _ y') = y'
```

Und zum Setzen:

```
sx :: a -> V2 a -> V2 a  
sx x (V2 _ y) = V2 x y
```

```
sy :: a -> V2 a -> V2 a  
sy y (V2 x _) = V2 x y
```

Nun sind diese Funktionen stupide zu schreiben. Man kann diesen Vorgang allerdings auch automatisieren.

Nun sind diese Funktionen stupide zu schreiben. Man kann diesen Vorgang allerdings auch automatisieren.

Dies nennt sich dann *Record-Syntax*:

Nun sind diese Funktionen stupide zu schreiben. Man kann diesen Vorgang allerdings auch automatisieren.

Dies nennt sich dann *Record-Syntax*:

```
data V2 a = V2 { x :: a  
                 , y :: a  
                 }
```

Nun sind diese Funktionen stupide zu schreiben. Man kann diesen Vorgang allerdings auch automatisieren.

Dies nennt sich dann *Record-Syntax*:

```
data V2 a = V2 { x :: a  
                 , y :: a  
                 }
```

welches automatisch die Funktionen

```
x :: V2 a -> a  
y :: V2 a -> a
```

generiert.

Es werden auch Setter generiert, die wie folgt zu verwenden sind:

Es werden auch Setter generiert, die wie folgt zu verwenden sind:

```
let r = V2 1 2
let r' = r { x = 0 }
-- r' = V2 0 2
```



Es werden auch Setter generiert, die wie folgt zu verwenden sind:

```
let r = V2 1 2
let r' = r { x = 0 }
-- r' = V2 0 2
```

Wir geben also einfach die Struktur an (hier: `r`) und in den geschweiften Klammern alle Parameter, die wir ändern wollen.

Nochmal ein etwas komplizierteres Beispiel:

Nochmal ein etwas komplizierteres Beispiel:

Welche Funktionen generiert folgender Code?

```
data D a = K a (a -> a)
```

Nochmal ein etwas komplizierteres Beispiel:

Welche Funktionen generiert folgender Code?

```
data D a = K a (a -> a)
```

```
K :: a -> (a -> a) -> D a
```

Nochmal ein etwas komplizierteres Beispiel:

Welche Funktionen generiert folgender Code?

```
data D a = K a (a -> a)
```

```
K :: a -> (a -> a) -> D a
```

Welche Funktionen generiert folgende Record-Syntax?

```
data D a = K { x :: a, y :: (a -> a) }
```

Nochmal ein etwas komplizierteres Beispiel:

Welche Funktionen generiert folgender Code?

```
data D a = K a (a -> a)
```

```
K :: a -> (a -> a) -> D a
```

Welche Funktionen generiert folgende Record-Syntax?

```
data D a = K { x :: a, y :: (a -> a) }
```

```
K :: a -> (a -> a) -> D a
```

```
x :: D a -> a
```

```
y :: D a -> (a -> a)
```

Nochmal ein etwas komplizierteres Beispiel:

Welche Funktionen generiert folgender Code?

```
data D a = K a (a -> a)
```

```
K :: a -> (a -> a) -> D a
```

Welche Funktionen generiert folgende Record-Syntax?

```
data D a = K { x :: a, y :: (a -> a) }
```

```
K :: a -> (a -> a) -> D a
```

```
x :: D a -> a
```

```
y :: D a -> (a -> a)
```

Die Record-Syntax beschert uns also kostenlos Getter-Funktionen und bietet die Möglichkeit eines Setzens über die Update-Notation

```
a { x = y }
```

Wir hatten in der letzten Vorlesung die State-Monade kurz angesprochen.

Heute wenden wir uns der Definition zu und werden herausfinden, wie man noch weiter abstrahieren kann.



Beispiel:

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

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

```
examplemain = runState example 0
-- -> (14,2), 14 ist der Wert von z, 2 ist der interne Counter
```

## Beispiel 2:

```
module Main where

import Control.Monad.State

type CountValue = Int
type CountState = (Bool, Int)

startState :: CountState
startState = (False, 0)

play :: String -> State CountState CountValue
--play ...
```

```
play :: String -> State CountState CountValue
play []      = do (_, score) <- get
               return score
play (x:xs) = do
  (on, score) <- get
  case x of
    'C' -> if on then put (on, score + 1) else put (on, score)
    'A' -> if on then put (on, score - 1) else put (on, score)
    'T' -> put (False, score)
    'G' -> put (True, score)
    _   -> put (on, score)
  play xs

main :: IO ()
main = print $ runState (play "GACAACTCGAAT") startState
-- -> (-3,(False,-3))
```

Definition von State:

```
newtype State s a = State { runState :: s -> (a,s) }
```

Definition von State:

```
newtype State s a = State { runState :: s -> (a,s) }
```

Diese (Record-)Notation liefert uns zwei Funktionen:

```
State    :: (s -> (a,s)) -> State s a  
runState :: State s a    -> (s -> (a,s))
```

Definition von State:

```
newtype State s a = State { runState :: s -> (a,s) }
```

Diese (Record-)Notation liefert uns zwei Funktionen:

```
State    :: (s -> (a,s)) -> State s a  
runState :: State s a    -> s -> (a,s)
```

Definition von State:

```
newtype State s a = State { runState :: s -> (a,s) }
```

Diese (Record-)Notation liefert uns zwei Funktionen:

```
State    :: (s -> (a,s)) -> State s a  
runState :: State s a    -> s -> (a,s)
```

runState benötigt also zwei Argumente, damit es ein (a,s) liefert.

Definition von State:

```
newtype State s a = State { runState :: s -> (a,s) }
```

Diese (Record-)Notation liefert uns zwei Funktionen:

```
State    :: (s -> (a,s)) -> State s a  
runState :: State s a    -> s -> (a,s)
```

runState benötigt also zwei Argumente, damit es ein (a,s) liefert.

Wenn wir State monadisch nutzen, benutzen wir Funktionen der folgenden Form:



Definition von State:

```
newtype State s a = State { runState :: s -> (a,s) }
```

Diese (Record-)Notation liefert uns zwei Funktionen:

```
State    :: (s -> (a,s)) -> State s a  
runState :: State s a    -> s -> (a,s)
```

runState benötigt also zwei Argumente, damit es ein (a,s) liefert.

Wenn wir State monadisch nutzen, benutzen wir Funktionen der folgenden Form:

```
foo :: a -> State s b
```

Definition von State:

```
newtype State s a = State { runState :: s -> (a,s) }
```

Diese (Record-)Notation liefert uns zwei Funktionen:

```
State    :: (s -> (a,s)) -> State s a  
runState :: State s a    -> s -> (a,s)
```

runState benötigt also zwei Argumente, damit es ein (a,s) liefert.

Wenn wir State monadisch nutzen, benutzen wir Funktionen der folgenden Form:

```
foo :: a -> (s -> (b,s))
```

Definition von State:

```
newtype State s a = State { runState :: s -> (a,s) }
```

Diese (Record-)Notation liefert uns zwei Funktionen:

```
State    :: (s -> (a,s)) -> State s a  
runState :: State s a    -> s -> (a,s)
```

runState benötigt also zwei Argumente, damit es ein (a,s) liefert.

Wenn wir State monadisch nutzen, benutzen wir Funktionen der folgenden Form:

```
foo :: a -> s -> (b,s)
```

Definition von State:

```
newtype State s a = State { runState :: s -> (a,s) }
```

Diese (Record-)Notation liefert uns zwei Funktionen:

```
State    :: (s -> (a,s)) -> State s a  
runState :: State s a    -> s -> (a,s)
```

runState benötigt also zwei Argumente, damit es ein (a,s) liefert.

Wenn wir State monadisch nutzen, benutzen wir Funktionen der folgenden Form:

```
foo :: a -> s -> (b,s)
```

State in der monadischen Form fügt einfach nur einen Funktionsparameter s hinzu, versteckt das (b,s) und gibt lediglich das b in der do-Notation zurück.

Hilfreich ist es, sich die State-Monade als Berechnung vorzustellen, die noch nicht ausgeführt werden kann, weil der **Anfangszustand** (initial State) noch nicht bekannt ist.

Hilfreich ist es, sich die State-Monade als Berechnung vorzustellen, die noch nicht ausgeführt werden kann, weil der **Anfangszustand** (initial State) noch nicht bekannt ist.

Man bekommt also erst *später* irgendwann einen State, bearbeitet ihn ggf. und gibt dann den geänderten State weiter.

Hilfreich ist es, sich die State-Monade als Berechnung vorzustellen, die noch nicht ausgeführt werden kann, weil der **Anfangszustand** (initial State) noch nicht bekannt ist.

Man bekommt also erst *später* irgendwann einen State, bearbeitet ihn ggf. und gibt dann den geänderten State weiter.

Dies spiegelt sich auch in der Functor-Instanz wieder:

```
instance Functor (State s) where  
    fmap f rs = _
```

Found hole ‘\_’ with type: State s b

Where: ‘s’ is a rigid type variable

      ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

    rs :: State s a

    f :: a -> b

    fmap :: (a -> b) -> State s a -> State s b



```
instance Functor (State s) where  
  fmap f rs = _
```

```
State :: (s -> (b,s)) -> State s b
```

```
instance Functor (State s) where
  fmap f rs = State $ _
```

Found hole ‘\_’ with type: s -> (b, s)

Where: ‘s’ is a rigid type variable

      ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

  rs :: State s a

  f :: a -> b

  fmap :: (a -> b) -> State s a -> State s b

```
instance Functor (State s) where
  fmap f rs = State $ \st -> _
```

Found hole ‘\_’ with type: (b, s)

Where: ‘s’ is a rigid type variable

      ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

  st :: s

  rs :: State s a

  f :: a -> b

fmap :: (a -> b) -> State s a -> State s b

```
instance Functor (State s) where
  fmap f rs = State $ \st -> _
```

Found hole ‘\_’ with type: (b, s)

Where: ‘s’ is a rigid type variable

      ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

  st :: s

  rs :: State s a

  f :: a -> b

  fmap :: (a -> b) -> State s a -> State s b

```
runState :: State s a -> s -> (a,s)
```

```
instance Functor (State s) where
  fmap f rs = State $ \st -> let (a,st') = runState rs st
                                in _
```

Found hole ‘\_’ with type: (b, s)

Where: ‘s’ is a rigid type variable

      ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

  a :: a

  st' :: s

  st :: s

  rs :: State s a

  f :: a -> b

  fmap :: (a -> b) -> State s a -> State s b

```
instance Functor (State s) where
  fmap f rs = State $ \st -> let (a,st') = runState rs st
                                in (f a, _)
```

Found hole ‘\_’ with type: s

Where: ‘s’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

```
a :: a
st' :: s
st :: s
rs :: State s a
f :: a -> b
fmap :: (a -> b) -> State s a -> State s b
```

```
instance Functor (State s) where
  fmap f rs = State $ \st -> let (a,st') = runState rs st
                                in (f a, st')
```

Danke, typed holes!

Ganz analog funktioniert die `Applicative`-Instanz:



Ganz analog funktioniert die Applicative-Instanz:

```
instance Applicative (State s) where
    pure a      = _
    rf <*> rs = undefined
```

Found hole ‘\_’ with type: State s a  
Where: ‘s’ is a rigid type variable  
      ‘a’ is a rigid type variable  
Relevant bindings include  
      a :: a  
      pure :: a -> State s a

Ganz analog funktioniert die Applicative-Instanz:

```
instance Applicative (State s) where
  pure a      = State $ _
  rf <*> rs = undefined
```

Found hole ‘\_’ with type: s -> (a, s)

Where: ‘s’ is a rigid type variable

‘a’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

a :: a

pure :: a -> State s a

Ganz analog funktioniert die Applicative-Instanz:

```
instance Applicative (State s) where
  pure a      = State $ \st -> _
  rf <*> rs = undefined
```

Found hole ‘\_’ with type: (a, s)  
Where: ‘s’ is a rigid type variable  
      ‘a’ is a rigid type variable  
Relevant bindings include  
  st :: s  
  a :: a  
  pure :: a -> State s a

Ganz analog funktioniert die Applicative-Instanz:

```
instance Applicative (State s) where
  pure a      = State $ \st -> (a,st)
  rf <*> rs = State $ \st -> _
```

Found hole ‘\_’ with type: (b, s)

Where: ‘s’ is a rigid type variable

‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

st :: s

rs :: State s a

rf :: State s (a -> b)

(<\*>) :: State s (a -> b) -> State s a -> State s b

Ganz analog funktioniert die Applicative-Instanz:

```
instance Applicative (State s) where
  pure a      = State $ \st -> (a,st)
  rf <*> rs = State $ \st ->
    let (f,st') = runState rf st
        (a,st'') = runState rs st'
    in _
```

Wichtig: Erst das rf ausführen, dann das rs, da <\*> von links-nach-rechts arbeitet.

Ganz analog funktioniert die Applicative-Instanz:

```
instance Applicative (State s) where
  pure a      = State $ \st -> (a,st)
  rf <*> rs = State $ \st ->
    let (f,st') = runState rf st
        (a,st'') = runState rs st'
    in _
```

Found hole ‘\_’ with type: (b, s)

Where: ‘s’ is a rigid type variable

‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

a :: a

st'' :: s

f :: a -> b

st' :: s

st :: s

rs :: State s a

rf :: State s (a -> b)

(<\*>) :: State s (a -> b) -> State s a -> State s b

Ganz analog funktioniert die Applicative-Instanz:

```
instance Applicative (State s) where
  pure a      = State $ \st -> (a,st)
  rf <*> rs = State $ \st ->
    let (f,st') = runState rf st
        (a,st'') = runState rs st'
    in (f a, st'')
```

Am wichtigsten ist die `Monad`-Instanz:



Am wichtigsten ist die Monad-Instanz:

```
instance Monad (State s) where
    return    = pure
    rs >>= f = State $ \st -> _
```

Found hole ‘\_’ with type: (b, s)

Where: ‘s’ is a rigid type variable

      ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

  st :: s

  f :: a -> State s b

  rs :: State s a

  (>>=) :: State s a -> (a -> State s b) -> State s b

Am wichtigsten ist die Monad-Instanz:

```
instance Monad (State s) where
  return    = pure
  rs >>= f = State $ \st ->
    let (a,st') = runState rs st
    in _
```

Found hole ‘\_’ with type: (b, s)  
Where: ‘s’ is a rigid type variable  
      ‘b’ is a rigid type variable  
Relevant bindings include

```
a :: a
st' :: s
st :: s
f :: a -> State s b
rs :: State s a
(>>=) :: State s a -> (a -> State s b) -> State s b
```

Am wichtigsten ist die Monad-Instanz:

```
instance Monad (State s) where
    return    = pure
    rs >>= f = State $ \st ->
        let (a,st') = runState rs st
        rs'         = f a
        in _
```

Found hole ‘\_’ with type: (b, s)  
Where: ‘s’ is a rigid type variable  
      ‘b’ is a rigid type variable  
Relevant bindings include

```
rs' :: State s b
a :: a
st' :: s
st :: s
f :: a -> State s b
rs :: State s a
...
```

Am wichtigsten ist die Monad-Instanz:

```
instance Monad (State s) where
  return    = pure
  rs >>= f = State $ \st ->
    let (a,st') = runState rs st
        rs'     = f a
    in runState rs' st'
```

Wir hatten letzte Woche die Maybe-Monade mit dem folgenden Anwendungsfall:

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

Wir hatten letzte Woche die Maybe-Monade mit dem folgenden Anwendungsfall:

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

Nun möchten wir aus irgendeinem Grund (Logging, Netzwerk, ..) zwischen dem `getInbox` und dem `getFirstMail` eine IO-Aktion ausführen.

Wir hatten letzte Woche die Maybe-Monade mit dem folgenden Anwendungsfall:

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

Nun möchten wir aus irgendeinem Grund (Logging, Netzwerk, ..) zwischen dem `getInbox` und dem `getFirstMail` eine IO-Aktion ausführen.

Problem: `IO /= Maybe`

Wir hatten letzte Woche die Maybe-Monade mit dem folgenden Anwendungsfall:

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

Nun möchten wir aus irgendeinem Grund (Logging, Netzwerk, ..) zwischen dem `getInbox` und dem `getFirstMail` eine IO-Aktion ausführen.

Problem: `IO`  $\neq$  `Maybe`

Als Konsequenz können wir die `do`-Notation nicht verwenden - wir fallen also wieder zurück auf die hässliche Notation:



```
f :: IO (Maybe Header)
f = case getInbox of
    (Just folder) ->
        do
            putStrLn "debug"
            case getFirstMail folder of
                (Just mail) ->
                    case getHeader mail of
                        (Just head) -> return $ return head
                        Nothing      -> return Nothing
                Nothing          -> return Nothing
            Nothing             -> return Nothing
        Nothing                -> return Nothing
```

Dieser Code ist ohne Frage umständlich und unschön. Stellt sich die Frage, ob wir nicht so etwas wie MaybeIO bauen können, sodass wir wieder do-Notation verwenden können.

Dieser Code ist ohne Frage umständlich und unschön. Stellt sich die Frage, ob wir nicht so etwas wie `MaybeIO` bauen können, sodass wir wieder `do`-Notation verwenden können.

Also kombinieren wir es (ähnlich zur `State-Monade`):

```
newtype MaybeIO a = MaybeIO { runMaybeIO :: IO (Maybe a) }
```

Dieser Code ist ohne Frage umständlich und unschön. Stellt sich die Frage, ob wir nicht so etwas wie `MaybeIO` bauen können, sodass wir wieder `do`-Notation verwenden können.

Also kombinieren wir es (ähnlich zur `State-Monade`):

```
newtype MaybeIO a = MaybeIO { runMaybeIO :: IO (Maybe a) }
```

Dieses liefert uns zwei Funktionen:

```
MaybeIO    :: IO (Maybe a) -> MaybeIO a  
runMaybeIO :: MaybeIO a -> IO (Maybe a)
```

Also eine Funktion, um einen Wert in unsere neue Monade zu bekommen und eine Funktion um dieses wieder rückgängig zu machen.

Fangen wir mit der Functor-Instanz an:

Fangen wir mit der Functor-Instanz an:

```
instance Functor MaybeIO where  
  fmap f input = _
```

```
Found hole ‘_’ with type: MaybeIO b  
Where: ‘b’ is a rigid type variable  
Relevant bindings include  
  input :: MaybeIO a  
  f :: a -> b  
  fmap :: (a -> b) -> MaybeIO a -> MaybeIO b
```

Fangen wir mit der Functor-Instanz an:

```
instance Functor MaybeIO where
  fmap f input = _
                where
                  unwrapped = runMaybeIO input
```

Found hole ‘\_’ with type: MaybeIO b

Where: ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

unwrapped :: IO (Maybe a)

input :: MaybeIO a

f :: a -> b

fmap :: (a -> b) -> MaybeIO a -> MaybeIO b

Fangen wir mit der Functor-Instanz an:

```
instance Functor MaybeIO where
  fmap f input = _
                where
                    unwrapped = runMaybeIO input
                    fmapped = fmap (fmap f) unwrapped
```

Found hole ‘\_’ with type: MaybeIO b

Where: ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

fmapped :: IO (Maybe b)

unwrapped :: IO (Maybe a)

input :: MaybeIO a

f :: a -> b

fmap :: (a -> b) -> MaybeIO a -> MaybeIO b



Fangen wir mit der Functor-Instanz an:

```
instance Functor MaybeIO where
  fmap f input = _
                where
                    unwrapped = runMaybeIO input
                    fmapped = fmap (fmap f) unwrapped
                    wrapped = MaybeIO fmapped
```

Found hole ‘\_’ with type: MaybeIO b

Where: ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

wrapped :: MaybeIO b

fmapped :: IO (Maybe b)

unwrapped :: IO (Maybe a)

input :: MaybeIO a

f :: a -> b

fmap :: (a -> b) -> MaybeIO a -> MaybeIO b

Fangen wir mit der Functor-Instanz an:

```
instance Functor MaybeIO where
  fmap f input = wrapped
    where
      unwrapped = runMaybeIO input
      fmapped   = fmap (fmap f) unwrapped
      wrapped   = MaybeIO fmapped
```

Fangen wir mit der Functor-Instanz an:

```
instance Functor MaybeIO where
  fmap f input = wrapped
    where
      unwrapped = runMaybeIO input
      fmapped   = fmap (fmap f) unwrapped
      wrapped   = MaybeIO fmapped
```

oder kurz:

```
instance Functor MaybeIO where
  fmap f = MaybeIO . fmap (fmap f) . runMaybeIO
```

Applicative:

Applicative:

```
instance Applicative MaybeIO where
  pure a   = _
  f <*> x = undefined
```

Found hole ‘\_’ with type: MaybeIO a  
Where: ‘a’ is a rigid type variable  
Relevant bindings include  
 a :: a  
 pure :: a -> MaybeIO a

Applicative:

```
instance Applicative MaybeIO where
  pure a  = MaybeIO $ _
  f <*> x = undefined
```

Found hole ‘\_’ with type: IO (Maybe a)

Where: ‘a’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

a :: a

pure :: a -> MaybeIO a

Applicative:

```
instance Applicative MaybeIO where
  pure a  = MaybeIO $ pure $ _
  f <*> x = undefined
```

Found hole ‘\_’ with type: Maybe a  
Where: ‘a’ is a rigid type variable  
Relevant bindings include  
 a :: a  
 pure :: a -> MaybeIO a

Applicative:

```
instance Applicative MaybeIO where
    pure a = MaybeIO $ pure $ pure $ _
    f <*> x = undefined
```

Found hole ‘\_’ with type: a  
 Where: ‘a’ is a rigid type variable  
 Relevant bindings include  
   a :: a  
   pure :: a -> MaybeIO a



Applicative:

```
instance Applicative MaybeIO where
  pure a  = MaybeIO $ pure $ pure $ a
  f <*> x = undefined
```

Applicative:

```
instance Applicative MaybeIO where
  pure a  = MaybeIO . pure . pure $ a
  f <*> x = undefined
```

Applicative:

```
instance Applicative MaybeIO where
  pure    = MaybeIO . pure . pure
  f <*> x = _
```

Found hole ‘\_’ with type: MaybeIO b

Where: ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

x :: MaybeIO a

f :: MaybeIO (a -> b)

(<\*>) :: MaybeIO (a -> b) -> MaybeIO a -> MaybeIO b

Applicative:

```
instance Applicative MaybeIO where
  pure    = MaybeIO . pure . pure
  f <*> x = MaybeIO $ _
```

Found hole ‘\_’ with type: IO (Maybe b)

Where: ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

x :: MaybeIO a

f :: MaybeIO (a -> b)

(<\*>) :: MaybeIO (a -> b) -> MaybeIO a -> MaybeIO b

Applicative:

```
instance Applicative MaybeIO where
  pure    = MaybeIO . pure . pure
  f <*> x = MaybeIO $ _
           where
             f' = runMaybeIO f
             x' = runMaybeIO x
```

Found hole ‘\_’ with type: IO (Maybe b)

Where: ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

f' :: IO (Maybe (a -> b))

x' :: IO (Maybe a)

x :: MaybeIO a

f :: MaybeIO (a -> b)

(<\*>) :: MaybeIO (a -> b) -> MaybeIO a -> MaybeIO b

Applicative:

```
instance Applicative MaybeIO where
  pure    = MaybeIO . pure . pure
  f <*> x = MaybeIO $ (<*>) <$> f' <*> x'
    where
      f' = runMaybeIO f
      x' = runMaybeIO x
```

Das erste (<\*>) ist Applicative auf Maybe und es wird in Applicative <\*> von IO hineingemappt.

Monad:

Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ _
```

Found hole ‘\_’ with type: IO (Maybe b)

Where: ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

f :: a -> MaybeIO b

x :: MaybeIO a

(>>=) :: MaybeIO a -> (a -> MaybeIO b) -> MaybeIO b



Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ _
           where
             x' = runMaybeIO x
```

Found hole ‘\_’ with type: IO (Maybe b)

Where: ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

x' :: IO (Maybe a)

f :: a -> MaybeIO b

x :: MaybeIO a

(>>=) :: MaybeIO a -> (a -> MaybeIO b) -> MaybeIO b

Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ x' >>= _
           where
             x' = runMaybeIO x
```

Found hole ‘\_’ with type: Maybe a -> IO (Maybe b)

Where: ‘a’ is a rigid type variable

‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

x' :: IO (Maybe a)

f :: a -> MaybeIO b

x :: MaybeIO a

(>>=) :: MaybeIO a -> (a -> MaybeIO b) -> MaybeIO b

Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ x' >>= _ . fmap f
          where
            x' = runMaybeIO x
```

Found hole ‘\_’ with type: Maybe (MaybeIO b) -> IO (Maybe b)

Where: ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

x' :: IO (Maybe a)

f :: a -> MaybeIO b

x :: MaybeIO a

(>>=) :: MaybeIO a -> (a -> MaybeIO b) -> MaybeIO b

Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ x' >>= runMaybeIO . _ . fmap f
          where
            x' = runMaybeIO x
```

Found hole ‘\_’ with type: Maybe (MaybeIO b) -> MaybeIO b

Where: ‘b’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

x' :: IO (Maybe a)

f :: a -> MaybeIO b

x :: MaybeIO a

(>>=) :: MaybeIO a -> (a -> MaybeIO b) -> MaybeIO b

Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ x' >>= runMaybeIO . mb . fmap f
    where
      x' = runMaybeIO x
      mb :: Maybe (MaybeIO a) -> MaybeIO a
      mb a = _
```

Found hole ‘\_’ with type: MaybeIO a1

Where: ‘a1’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

a :: Maybe (MaybeIO a1)

mb :: Maybe (MaybeIO a1) -> MaybeIO a1

f :: a -> MaybeIO b

x :: MaybeIO a

(>>=) :: MaybeIO a -> (a -> MaybeIO b) -> MaybeIO b

Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ x' >>= runMaybeIO . mb . fmap f
    where
      x' = runMaybeIO x
      mb :: Maybe (MaybeIO a) -> MaybeIO a
      mb (Just a) = _
      mb Nothing = undefined
```

Found hole ‘\_’ with type: MaybeIO a1

Where: ‘a1’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

a :: MaybeIO a1

mb :: Maybe (MaybeIO a1) -> MaybeIO a1

f :: a -> MaybeIO b

x :: MaybeIO a

(>>=) :: MaybeIO a -> (a -> MaybeIO b) -> MaybeIO b

Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ x' >>= runMaybeIO . mb . fmap f
    where
      x' = runMaybeIO x
      mb :: Maybe (MaybeIO a) -> MaybeIO a
      mb (Just a) = a
      mb Nothing = _
```

Found hole ‘\_’ with type: MaybeIO a1

Where: ‘a1’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

mb :: Maybe (MaybeIO a1) -> MaybeIO a1

f :: a -> MaybeIO b

x :: MaybeIO a

(>>=) :: MaybeIO a -> (a -> MaybeIO b) -> MaybeIO b

Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ x' >>= runMaybeIO . mb . fmap f
    where
      x' = runMaybeIO x
      mb :: Maybe (MaybeIO a) -> MaybeIO a
      mb (Just a) = a
      mb Nothing = MaybeIO $ _
```

Found hole ‘\_’ with type: IO (Maybe a1)

Where: ‘a1’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

mb :: Maybe (MaybeIO a1) -> MaybeIO a1

f :: a -> MaybeIO b

x :: MaybeIO a

(>>=) :: MaybeIO a -> (a -> MaybeIO b) -> MaybeIO b



Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ x' >>= runMaybeIO . mb . fmap f
    where
      x' = runMaybeIO x
      mb :: Maybe (MaybeIO a) -> MaybeIO a
      mb (Just a) = a
      mb Nothing = MaybeIO $ return _
```

Found hole ‘\_’ with type: Maybe a1

Where: ‘a1’ is a rigid type variable

Relevant bindings include

mb :: Maybe (MaybeIO a1) -> MaybeIO a1

f :: a -> MaybeIO b

x :: MaybeIO a

(>>=) :: MaybeIO a -> (a -> MaybeIO b) -> MaybeIO b

Monad:

```
instance Monad MaybeIO where
  return = pure
  x >>= f = MaybeIO $ x' >>= runMaybeIO . mb . fmap f
  where
    x' = runMaybeIO x
    mb :: Maybe (MaybeIO a) -> MaybeIO a
    mb (Just a) = a
    mb Nothing = MaybeIO $ return Nothing
```

Da wir nun eine Monade definiert haben, können wir ja wieder do nutzen:

```
f = do i <- getInbox
      putStrLn "debug"
      m <- getFirstMail i
      h <- getHeader m
      return h
```

## Allerdings:

```
Couldn't match type Maybe with MaybeIO
Expected type: MaybeIO Inbox
  Actual type: Maybe Inbox
In a stmt of a 'do' block: in <- getInbox
```

```
Couldn't match type IO with MaybeIO
Expected type: MaybeIO ()
  Actual type: IO ()
In a stmt of a 'do' block: putStrLn "debug"
```

```
Couldn't match type Maybe with MaybeIO
Expected type: MaybeIO Mail
  Actual type: Maybe Mail
In a stmt of a 'do' block: m <- getFirstMail i
```

```
Couldn't match type Maybe with MaybeIO
Expected type: MaybeIO Header
  Actual type: Maybe Header
In a stmt of a 'do' block: h <- getHeader m
```

Wir brauchen also zwei Konverter:

- `Maybe -> MaybeIO`
- `IO -> MaybeIO`

Wir brauchen also zwei Konverter:

- `Maybe -> MaybeIO`
- `IO -> MaybeIO`

Aber wir haben schon alles, was wir brauchen, wenn wir uns nur Folgendes klar machen:

```
return  :: Maybe a -> IO (Maybe a)  -- return von IO
MaybeIO :: IO (Maybe a) -> MaybeIO a
```

Wir brauchen also zwei Konverter:

- `Maybe -> MaybeIO`
- `IO -> MaybeIO`

Aber wir haben schon alles, was wir brauchen, wenn wir uns nur Folgendes klar machen:

```
return  :: Maybe a -> IO (Maybe a)  -- return von IO
MaybeIO :: IO (Maybe a) -> MaybeIO a
```

und

```
Just      :: a -> Maybe a
fmap Just :: IO a -> IO (Maybe a)
```

Somit wird unser Code von oben:

```
f = do i <- MaybeIO (return (getInbox))
      MaybeIO (fmap Just (putStrLn "debug"))
      m <- MaybeIO (return (getFirstMail i))
      h <- MaybeIO (return (getHeader m))
      return h
```



Somit wird unser Code von oben:

```
f = do i <- MaybeIO (return (getInbox))
      MaybeIO (fmap Just (putStrLn "debug"))
      m <- MaybeIO (return (getFirstMail i))
      h <- MaybeIO (return (getHeader m))
      return h
```

Zwar können wir nun `do` nutzen, aber das sieht doch eher hässlich aus. Außerdem ist so viel Code doppelt!

Wenn wir Muster finden, dann lagern wir sie doch einfach in Funktionen aus!

```
liftMaybe :: Maybe a -> MaybeIO a  
liftMaybe x = MaybeIO (return x)
```

```
liftIO :: IO a -> MaybeIO a  
liftIO x = MaybeIO (fmap Just x)
```

Wenn wir Muster finden, dann lagern wir sie doch einfach in Funktionen aus!

```
liftMaybe :: Maybe a -> MaybeIO a  
liftMaybe x = MaybeIO (return x)
```

```
liftIO :: IO a -> MaybeIO a  
liftIO x = MaybeIO (fmap Just x)
```

und wir erhalten:

```
f = do i <- liftMaybe getInbox  
      liftIO $ putStrLn "debug"  
      m <- liftMaybe $ getFirstMail i  
      h <- liftMaybe $ getHeader m  
      return h
```

Wenn wir uns nochmals ansehen, welche Eigenschaft der IO-Monade wir genutzt haben, dann fällt uns auf:

Wenn wir uns nochmals ansehen, welche Eigenschaft der IO-Monade wir genutzt haben, dann fällt uns auf:

```
instance Functor MaybeIO where  
    fmap f = MaybeIO . fmap (fmap f) . runMaybeIO
```

fmap von IO als Functor

Wenn wir uns nochmals ansehen, welche Eigenschaft der IO-Monade wir genutzt haben, dann fällt uns auf:

```
instance Functor MaybeIO where
  fmap f = MaybeIO . fmap (fmap f) . runMaybeIO
```

fmap von IO als Functor

```
instance Applicative MaybeIO where
  pure    = MaybeIO . pure . pure
  f <*> x = MaybeIO $ (<*>) <$> (runMaybeIO f)
                                <*> (runMaybeIO x)
```

pure und <\*> von IO als Applicative

Wenn wir uns nochmals ansehen, welche Eigenschaft der IO-Monade wir genutzt haben, dann fällt uns auf:

```
instance Functor MaybeIO where
    fmap f = MaybeIO . fmap (fmap f) . runMaybeIO
```

fmap von IO als Functor

```
instance Applicative MaybeIO where
    pure    = MaybeIO . pure . pure
    f <*> x = MaybeIO $ (<*>) <$> (runMaybeIO f)
                                <*> (runMaybeIO x)
```

pure und <\*> von IO als Applicative

```
instance Monad MaybeIO where
    return = pure
    x >=> f = MaybeIO $ (runMaybeIO x)
                      >=> runMaybeIO . mb . fmap f
    where
        mb (Just a) = a
        mb Nothing = MaybeIO $ return Nothing
```

return und >=> von IO als Monad

Uns fällt auf: Wir verwenden gar keine intrinsischen Eigenschaften von IO.

Also können wir IO auch durch jede andere Monade ersetzen. Dies nennt man dann *Monad Transformer*.

```
newtype MaybeT m a = MaybeT { runMaybeT :: m (Maybe a) }
```



Und der Code von eben...

```
instance Functor MaybeIO where
    fmap f = MaybeIO . fmap (fmap f) . runMaybeIO

instance Applicative MaybeIO where
    pure    = MaybeIO . pure . pure
    f <*> x = MaybeIO $ (<*>) <$> (runMaybeIO f)
                                <*> (runMaybeIO x)

instance Monad MaybeIO where
    return = pure
    x >=> f = MaybeIO $ (runMaybeIO x)
                      >=> runMaybeIO . mb . fmap f
    where
        mb (Just a) = a
        mb Nothing = MaybeIO $ return Nothing
```

...wird zu:

```
instance Functor m => Functor (MaybeT m) where
  fmap f = MaybeT . fmap (fmap f) . runMaybeT

instance Applicative m => Applicative (MaybeT m) where
  pure    = MaybeT . pure . pure
  f <*> x = MaybeT $ (<*>) <$> (runMaybeT f)
                      <*> (runMaybeT x)

instance Monad m => Monad (MaybeT m) where
  return = pure
  x >=> f = MaybeT $ (runMaybeT x)
                    >=> runMaybeT . mb . fmap f
  where
    mb (Just a) = a
    mb Nothing  = MaybeT $ return Nothing
```

Frage: Wie realisieren wir nun `liftIO` etc.?

Frage: Wie realisieren wir nun `liftIO` etc.?

Über Typklassen! Dafür sind sie schließlich da!

```
class Monad m => MonadIO m where  
    liftIO :: IO a -> m a
```

Wir verlangen einfach, dass `IO` irgendwie verarbeitet werden muss.

Frage: Wie realisieren wir nun `liftIO` etc.?

Über Typklassen! Dafür sind sie schließlich da!

```
class Monad m => MonadIO m where  
    liftIO :: IO a -> m a
```

Wir verlangen einfach, dass `IO` irgendwie verarbeitet werden muss.

Genereller:

```
class MonadTrans t where  
    lift :: (Monad m) => m a -> t m a
```

Frage: Wie realisieren wir nun `liftIO` etc.?

Über Typklassen! Dafür sind sie schließlich da!

```
class Monad m => MonadIO m where  
    liftIO :: IO a -> m a
```

Wir verlangen einfach, dass `IO` irgendwie verarbeitet werden muss.

Genereller:

```
class MonadTrans t where  
    lift :: (Monad m) => m a -> t m a
```

Dies ist die allgemeine Form für *additive* Monaden. Mit `lift` heben wir uns eine monadische Ebene höher.

Frage: Wie realisieren wir nun `liftIO` etc.?

Über Typklassen! Dafür sind sie schließlich da!

```
class Monad m => MonadIO m where  
    liftIO :: IO a -> m a
```

Wir verlangen einfach, dass `IO` irgendwie verarbeitet werden muss.

Genereller:

```
class MonadTrans t where  
    lift :: (Monad m) => m a -> t m a
```

Dies ist die allgemeine Form für *additive* Monaden. Mit `lift` heben wir uns eine monadische Ebene höher.

Wichtig: `IO` ist nicht additiv! Es gibt keinen `IO-T`!

Wir haben schon ein paar Monaden kennengelernt. Diese sind *fast* alle additiv. Wir können somit folgendes bauen:



Wir haben schon ein paar Monaden kennengelernt. Diese sind *fast* alle additiv. Wir können somit folgendes bauen:

```
data MyMonadStack a = StateT MyState  
                        (EitherT String  
                          (MaybeT (IO a)))
```

Wir haben schon ein paar Monaden kennengelernt. Diese sind *fast* alle additiv. Wir können somit folgendes bauen:

```
data MyMonadStack a = StateT MyState  
                      (EitherT String  
                        (MaybeT (IO a)))
```

Wie schreiben wir nun Code dafür?

```
bsp :: MyMonadStack ()  
bsp = do  
  a <- fun  
  -- fun :: StateT MyState (EitherT String (MaybeT (IO Int)))  
  b <- lift $ fun2  
  -- fun2 :: EitherT String (MaybeT (IO Int))  
  c <- lift . lift $ fun3  
  -- fun3 :: MaybeT (IO Int))  
  liftIO $ putStrLn "foo"  
  -- putStrLn :: IO ()
```

Weitere Monaden, die hierbei häufig vorkommen, sind z.B.

`ReaderT` für ein read-only-Environment (z.B. Konfiguration)

Weitere Monaden, die hierbei häufig vorkommen, sind z.B.

`ReaderT` für ein read-only-Environment (z.B. Konfiguration)

`WriterT` für ein write-only-Environment (z.B. für Logging)

Weitere Monaden, die hierbei häufig vorkommen, sind z.B.

`ReaderT` für ein read-only-Environment (z.B. Konfiguration)

`WriterT` für ein write-only-Environment (z.B. für Logging)

`StateT` für einen globalen State

Weitere Monaden, die hierbei häufig vorkommen, sind z.B.

`ReaderT` für ein read-only-Environment (z.B. Konfiguration)

`WriterT` für ein write-only-Environment (z.B. für Logging)

`StateT` für einen globalen State

`EitherT` für fehlschlagbare Operationen (mit Fehlermeldung)

Weitere Monaden, die hierbei häufig vorkommen, sind z.B.

`ReaderT` für ein read-only-Environment (z.B. Konfiguration)

`WriterT` für ein write-only-Environment (z.B. für Logging)

`StateT` für einen globalen State

`EitherT` für fehlschlagbare Operationen (mit Fehlermeldung)

`MaybeT` für fehlschlagbare Operationen (ohne Fehlermeldung)

Weitere Monaden, die hierbei häufig vorkommen, sind z.B.

`ReaderT` für ein read-only-Environment (z.B. Konfiguration)

`WriterT` für ein write-only-Environment (z.B. für Logging)

`StateT` für einen globalen State

`EitherT` für fehlschlagbare Operationen (mit Fehlermeldung)

`MaybeT` für fehlschlagbare Operationen (ohne Fehlermeldung)

Je nachdem, welche Möglichkeiten man haben möchte, kann man diese miteinander kombinieren.



Auch kommt es auf die Reihenfolge an:

```
StateT MyState (EitherT String (Identity a))
```

kann fehlschlagen, aber man kommt nach dem Fehlschlag noch an den State dran,

Auch kommt es auf die Reihenfolge an:

```
StateT MyState (EitherT String (Identity a))
```

kann fehlschlagen, aber man kommt nach dem Fehlschlag noch an den State dran, wohingegen

```
EitherT String (StateT MyState (Identity a))
```

nur die Fehlermeldung liefert und den State schon entsorgt hat.

Auch kommt es auf die Reihenfolge an:

```
StateT MyState (EitherT String (Identity a))
```

kann fehlschlagen, aber man kommt nach dem Fehlschlag noch an den State dran, wohingegen

```
EitherT String (StateT MyState (Identity a))
```

nur die Fehlermeldung liefert und den State schon entsorgt hat.

Häufig findet man einen Read-Write-State-Transformer, kurz RWST.

Auch kommt es auf die Reihenfolge an:

```
StateT MyState (EitherT String (Identity a))
```

kann fehlschlagen, aber man kommt nach dem Fehlschlag noch an den State dran, wohingegen

```
EitherT String (StateT MyState (Identity a))
```

nur die Fehlermeldung liefert und den State schon entsorgt hat.

Häufig findet man einen Read-Write-State-Transformer, kurz RWST. Echtweltprogramme sind oft durch einen RWST IO mit der Außenwelt verbunden.

Ein Echtwelt-Beispiel könnte etwa der folgende Aufruf sein:

```
data Env = Env { filename :: String }

readInputs :: ReaderT Env IO String
readInputs = do
    e <- ask
    f <- liftIO $ readFile (filename e)
    return f
```

Ein Echtwelt-Beispiel könnte etwa der folgende Aufruf sein:

```
data Env = Env { filename :: String }

readInputs :: ReaderT Env IO String
readInputs = do
    e <- ask
    f <- liftIO $ readFile (filename e)
    return f
```

Dieser Aufruf liest einen Dateinamen aus einem Environment, kann per `liftIO` IO-Aktionen ausführen und das Ergebnis (den String mit dem Dateiinhalt) zurückliefern.

Noch ein Beispiel aus einem Spiel könnte sein:

```
mainLoop :: RWST Env () State IO ()
mainLoop = do
  e <- ask
  f <- liftIO $ getUserInput (keySettings e)
  oldWorld <- get
  newWorld <- updateWorld f oldWorld
  put newWorld
  unless (f == endKey e) mainLoop
```

Noch ein Beispiel aus einem Spiel könnte sein:

```
mainLoop :: RWST Env () State IO ()
mainLoop = do
    e <- ask
    f <- liftIO $ getUserInput (keySettings e)
    oldWorld <- get
    newWorld <- updateWorld f oldWorld
    put newWorld
    unless (f == endKey e) mainLoop
```

Dies ist eine klassische Game-Loop, bestehend aus Konfigurationen im Env (Key settings), IO (User-Input abfragen), Update des internen Zustands (updateWorld) und das schreiben des neuen Zustandes (put newWorld).



Noch ein Beispiel aus einem Spiel könnte sein:

```
mainLoop :: RWST Env () State IO ()
mainLoop = do
    e <- ask
    f <- liftIO $ getUserInput (keySettings e)
    oldWorld <- get
    newWorld <- updateWorld f oldWorld
    put newWorld
    unless (f == endKey e) mainLoop
```

Dies ist eine klassische Game-Loop, bestehend aus Konfigurationen im Env (Key settings), IO (User-Input abfragen), Update des internen Zustands (updateWorld) und das schreiben des neuen Zustandes (put newWorld).

Wichtig: updateWorld ist pure!