GOETHE UNIVERSITÄT FRANKFURT AM MAIN

www.uni-frankfurt.de

Einführung in die Funktionale Programmierung:

Haskell (2)

Prof. Dr. Manfred Schmidt-Schauß

WS 2022/23

Stand der Folien: 23. Dezember 2022

Übersicht

1. Typklassen
   - Klassen und Instanzen
   - Konstruktorklassen
   - Auflösung der Überladung
   - Erweiterung von Typklassen
2. Haskells hierarchisches Modulsystem

Haskells Typklassensystem

Ziele des Kapitels

- Klassen, Methoden, Ober-/Unterklassen, Vererbung
- Definition und Verwendung selbstdefinierter Typklassen
- Standardklassen und Methoden in Haskell:
  `Eq`, `Ord`, `Read`, `Show`, `Num`
  die weitverbreitet in Haskell-Modulen verwendet werden
- Auflösung der Überladung:
  Übersetzung in typklassenfreies Haskell

Polymorphismus (1)

Parametrischer Polymorphismus:

- Funktion f ist für eine Menge von verschiedenen Typen definiert
- Verhalten ist für alle Typen gleich
- Implementierung ist unabhängig von den konkreten Typen
- Beispiele:
  - `(++) :: [a] -> [a] -> [a]`
    kann für beliebige Listen verwendet werden
  - `(\x -> x) :: a -> a`
    kann auf beliebiges Argument angewendet werden
  - `map :: (a -> b) -> [a] -> [b]`
    kann für passende Funktion und Listen verwendet werden

Polymorphismus (2)

Ad hoc Polymorphismus:

- Eine Funktion (bzw. Funktionsname) f wird mehrfach für verschiedene Datentypen definiert.
- I.a. ist die Stelligkeit unabhängig vom Typ.
- Implementierungen von f für verschiedene Typen sind unterschiedlich.
- Ad hoc-Polymorphismus nennt man auch Überladung.
- Beispiele
  - `+`, für `Integer`- und für `Double`-Werte und ....
  - `==` für `Bool` und `Integer` und...
  - `map` für Listen und Bäume

Haskells Typklassen implementieren Ad hoc Polymorphismus

Typklassen und Instanzen

- Typklasse:
  - Name
  - Klassenfunktionen
- Instanzen: sind die Typen die zur Typklasse gehören:
  zusammen mit der jeweils spezifischen Implementierung der Klassenfunktionen

Beispiel

- Typklasse: GenericTree
- Klassenfunktionen, z.B. gmap, fold
- (Typ-)Instanzen: Listen, BBaum, ...
- Klassenfunktions-Instanzen: map, bmap, foldr, foldb

Typklassen

In der Klassendefinition wird festgelegt:

- Typ der Klassenfunktionen
- Optional: Default-Implementierungen der Klassenfunktionen

Pseudo-Syntax für den Kopf:

```
class [OBERKLASSE =>] Klassenname a where
  ... Typdeklarationen und Default-Implementierungen ...
```

- definiert die Klasse `Klassenname`
- `a` ist der Parameter für den Typ.
  Es ist nur eine solche Variable erlaubt
- `OBERKLASSE` ist eine Klassenbedingung (optional)
- Einrückung beachten!

Die Klasse Eq

Definition der Typklasse Eq:

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

       x /= y  = not (x == y)
       x == y  = not (x /= y)
```

- Keine Klassenbedingung (d.h. keine Oberklasse)
- Klassenmethoden sind == und /=
- Es gibt Default-Implementierungen für beide Klassenmethoden
- Sinnvolle Instanzen sollten mindestens == oder /= definieren

Beispiel für Oberklassen - Syntax

Auszug aus der Definition der Klasse Ord: (später)

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

  .. ..
```


Typklasseninstanz (1)

- Instanzen definieren die Klassenmethoden für einen **konkreten Typ**
- Instanzen können Default-Implementierungen überschreiben

Syntax für Instanzen:

```
instance [KLASSENBEDINGUNGEN => ] KLASSENINSTANZ where
  ...Implementierung der Klassenmethoden ...
```

- `KLASSENINSTANZ` besteht aus Klasse und der Instanz,
  z.B. `Eq [a]` oder `Eq Int`
  Erlaubt sind nur: Tykonstruktor, oder
  Typkonstruktor angewendet auf verschiedene Typ-Variablen.
- `KLASSENBEDINGUNGEN` optional

Typklasseninstanz (2)

Beispiele:

```
instance Eq Int where
 (==) = primEQInt
```

```
instance Eq Bool where
   x == y    =  (x && y) || (not x && not y)
   x /= y    =  not (x == y)
```

```
instance Eq Wochentag where
 Montag     == Montag     = True
 Dienstag   == Dienstag   = True
 Mittwoch   == Mittwoch   = True
 Donnerstag == Donnerstag = True
 Freitag    == Freitag    = True
 Samstag    == Samstag    = True
 Sonntag    == Sonntag    = True
 _          == _          = False
```

Typklasseninstanz (3)

Beispiel mit Klassenbedingung: (und Rekursion auf der Klassenebene)
Definiert wird was [a] bedeuten soll, D.h. Liste von a.

```
instance Eq a => Eq [a]  where
  []     == []     = True
  (x:xs) == (y:ys) =  (x == y) && (xs == ys)
  _      == _      = False
```

- Für die Abfrage `x == y` muss der Gleichheitstest auf Listenelementen vorhanden sein
- `Eq a => Eq [a]` drückt diese Bedingung gerade aus.
- „Typ `[a]` ist nur dann eine Instanz von `Eq`,
  wenn Typ a bereits Instanz von `Eq` ist“

Fehlende Definitionen

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

       x /= y  = not (x == y)
       x == y  = not (x /= y)
```

Beispiel:

```
data RGB = Rot | Gruen | Blau
 deriving(Show)

instance Eq RGB where
```

- Instanz syntaktisch korrekt
- Keine Fehlermeldung oder Warnung (in meiner Version)
- `Rot == Gruen` terminiert nicht!
  (wg. Schleife in der Defaultimplementierung)

Fehlende Definitionen (2)

Eigene „Eq“-Klasse

```
class MyEq a where
  (===), (=/=) :: a -> a -> Bool
  (===)  a b = not (a =/= b)
```

Nur `(===)` hat eine Default-Implementierung

```
instance MyEq RGB where
```

- Instanz syntaktisch korrekt
- Warnung vom Compiler (kein Fehler):

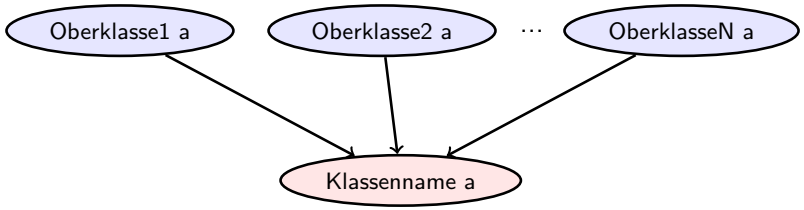
```
Warning: No explicit method nor default method for ‘=/=’
In the instance declaration for ‘MyEq RGB’
```

- `Rot === Gruen` gibt Laufzeitfehler:

```
*Main> Rot === Gruen
*** Exception: TypklassenBeispiele.hs:37:9-16:
No instance nor default method for class operation Main.=/=
```


Typklassen: Vererbung

```
class (Oberklasse1 a, ..., OberklasseN a) => Klassenname a where
  ...
```



- `Klassenname` ist Unterklasse von `Oberklasse1`,...,`OberklasseN`
- In der Klassendefinition können die überladenen Operatoren der Oberklassen verwendet werden (da sie geerbt sind)
- Beachte: => ist nicht als logische Implikation zu interpretieren
- Da mehrere Oberklassen erlaubt sind, ist Mehrfachvererbung möglich

Klasse mit Vererbung: Ord

Ord ist Unterklasse von Eq:

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

  compare x y | x == y    = EQ
              | x <= y    = LT
              | otherwise = GT

  x <= y  = compare x y /= GT
  x <  y  = compare x y == LT
  x >= y  = compare x y /= LT
  x >  y  = compare x y == GT

  max x y | x <= y    =  y
          | otherwise =  x
  min x y | x <= y    =  x
          | otherwise =  y
```

Ord: lineare Ordnungen!

Ordering ist definiert als:

```
data Ordering = LT | EQ | GT
```

Instanzen müssen entweder
<= oder compare
definieren.

Beispiel: Instanz für Wochentag

```
instance Ord Wochentag where
 a <= b =
   (a,b) `elem`  [(a,b) | i <- [0..6],
                          let a = ys!!i,
                          b <- drop i ys]
  where ys = [Montag, Dienstag, Mittwoch,
              Donnerstag, Freitag, Samstag, Sonntag]
```

Wenn Wochentag Instanz von Enum,
dann kann man die Definition ersetzen:

```
a <= b =
  (a,b)`elem`[(a,b) | a <- [Montag..Sonntag],b <- [a..Sonntag]]
```


Vererbung im Typsystem

Beispiel:

```
f x y = (x == y) && (x <= y)
```

Da == und <= verwendet werden würde man erwarten:

```
f :: (Eq a, Ord a) => a -> a -> Bool
```

Da Ord jedoch Unterklasse von Eq:

```
f :: Ord a => a -> a -> Bool
```

Ist aber inhaltlich das Gleiche.

Klassenbeschränkungen bei Instanzen

```
instance (Klasse1 a1, ..., KlasseN aN) => Klasse Typ where
 ...
```

- Es sind mehrere Typvariablen erlaubt.
- Die Typvariablen a1,...,aN müssen alle im Typ Typ vorkommen.
- Der Typ Typ kann nur sein:
  ein Typkonstruktor angewendet auf verschiedene Typvariablen.

Klassenbeschränkungen bei Instanzen

```
instance (Klasse1 a1, ..., KlasseN aN) => Klasse Typ where
 ...
```

- Keine Vererbung!
- Bedeutet: Es gibt nur dann eine Instanz, wenn es Instanzen für die Typvariablen a1,...,aN der entsprechenden Klassen gibt.

Beispiel:

```
instance Eq a => Eq (BBaum a) where
 Blatt m1 == Blatt mr             = m1 == mr
 Knoten l1 r1 == Knoten l2 r2 = l1 == l2 && r1 == r2
 _  ==  _                         = False
```

Nur wenn man Blattmarkierungen vergleichen kann,
dann auch Bäume

Klassenbeschränkungen bei Instanzen (2)

```
*Main List> Blatt 1 == Blatt 2 ↩
False
*Main List> Blatt 1 == Blatt 1 ↩
True
*Main List> Blatt (\x ->x) == Blatt (\y -> y) ↩

<interactive>:1:0:
    No instance for (Eq (t -> t))
      arising from a use of '==' at <interactive>:1:0-32
    Possible fix: add an instance declaration for (Eq (t -> t))
    In the expression: Blatt (\ x -> x) == Blatt (\ y -> y)
    In the definition of 'it':
        it = Blatt (\ x -> x) == Blatt (\ y -> y)
```


Klassenbeschränkungen bei Instanzen (3)

Beispiel mit mehreren Klassenbeschränkungen:

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

Either-Instanz für Eq:

```
instance (Eq a, Eq b) => Eq (Either a b) where
 Left x  == Left y  = x == y -- benutzt Eq-Instanz f\"ur a
 Right x == Right y = x == y -- benutzt Eq-Instanz f\"ur b
 _       == _       = False
```


Die Klassen Read und Show

Die Klassen Read und Show dienen zum Einlesen (Parsen) und Anzeigen (Drucken) von Datentypen.

```
show :: Show a => a -> String
read :: Read a => String -> a
```

Allerdings ist read keine Klassenfunktion!
Komplizierter:

```
type  ReadS a = String -> [(a,String)]
type  ShowS   = String -> String
```

- reads ist wie ein Parser mit Erfolgslisten
- shows kann noch einen String als Argument nehmen (oft schneller als geschachteltes ++)

```
reads :: Read a => ReadS a
shows :: Show a => a -> ShowS
```

Die Klassen Read und Show (2)

```
class  Read a  where
    readsPrec :: Int -> ReadS a
    readList  :: ReadS [a]
    -- ... default decl for readList given in Prelude

class  Show a  where
    showsPrec :: Int -> a -> ShowS
    show      :: a -> String
    showList  :: [a] -> ShowS

    showsPrec _ x s   = show x ++ s
    show x            = showsPrec 0 x ""
    -- ... default decl for showList given in Prelude
```


Show für BBaum

```
showBBaum :: (Show t) => BBaum t -> String
showBBaum (Blatt a)    = show a
showBBaum (Knoten l r) =
   "<" ++ showBBaum l ++ "|" ++ showBBaum r ++ ">"
```

Schlecht, da quadratische Laufzeit.
insbesondere bei tiefen baumartigen Strukturen
Besser:

```
showBBaum' :: (Show t) => BBaum t -> String
showBBaum' b = showsBBaum b []

showsBBaum :: (Show t) => BBaum t -> ShowS
showsBBaum (Blatt a)    = shows a
showsBBaum (Knoten l r) =
  showChar '<' . showsBBaum l . showChar '|'
    . showsBBaum r . showChar '>'
```


Show für BBaum (2)

Tests:

```
*Main> last $ showBBaum t ⏎
'>'
(73.38 secs, 23937939420 bytes)
*Main> last $ show t ⏎      (das ist showBBaum')
'>'
(0.16 secs, 10514996 bytes)
```

Hierbei ist t ein Baum mit ca. 15000 Knoten.

Show-Instanz für BBaum a:

```
instance Show a => Show (BBaum a) where
 showsPrec _ = showsBBaum
```


Rand eines Baumes: analog

```
bRand (Blatt a) = [a]
bRand (Knoten links rechts) = (bRand links) ++ (bRand rechts)

--  Variante 1
bRandschnell tr = reverse (bRandschnell_r [] tr)
bRandschnell_r r (Blatt a)  =  (a:r)
bRandschnell_r r (Knoten links rechts)  =
        bRandschnell_r (bRandschnell_r r rechts) links

--  Variante 2
bRandschnell' tr = bRandschnell'_r tr []
bRandschnell'_r (Blatt a)  =  \x-> (a:x)
bRandschnell'_r (Knoten links rechts)  =
      (bRandschnell'_r rechts)  . (bRandschnell'_r links)
```

Rand eines Baumes: analog

```
*Main> let t = genBaum [1..10000] ↩
*Main> :s +s ↩
*Main> length (bRand t)
......
*Main> let t' = genBaum' [1..100000] ↩
*Main> length (bRandschnell t)
```


Read für BBaum

Elegant mit List Comprehensions:

```
instance Read a => Read (BBaum a) where
 readsPrec _ = readsBBaum

readsBBaum :: (Read a) => ReadS (BBaum a)
readsBBaum ('<':xs) =
   [(Knoten l r, rest) | (l, '|':ys)   <- readsBBaum xs,
                         (r, '>':rest) <- readsBBaum ys]
readsBBaum s      =
    [(Blatt x, rest)    | (x,rest)      <- reads s]
```


Auflösung erfordert manchmal Typ

```
Prelude> read "10" ↩


<interactive>:1:0:
 Ambiguous type variable 'a' in the constraint
 'Read a' arising from a use of 'read' at <interactive>:1:0-8
 Probable fix: add a type signature that
               fixes these type variable(s)
Prelude> (read "10")::Int ↩
10
```

Ähnliches Problem bei überladenen Konstanten, z.B. `0`

Im GHC Defaulting: Für Zahlen ist dies der Typ `Integer`.

Klassen mit Mehrfachvererbung: Num

`Num` überlädt Operatoren für Zahlen:

```
class  (Eq a, Show a) => Num a  where
    (+), (-), (*)  :: a -> a -> a
    negate         :: a -> a
    abs, signum    :: a -> a
    fromInteger    :: Integer -> a
```

Mit `fromInteger` werden Zahlenkonstanten überladen, z.B.

```
length [] = 0
length (x:xs) = 1+(length xs)
```

Der Compiler kann den Typ `length :: (Num a) => [b] -> a` herleiten, da `0` eigentlich für `fromInteger (0::Integer)` steht.
In Haskell: `genericLength` aus Modul `Data.List`

Die Klasse Enum

`Enum` ist für Typen geeignet deren Werte aufzählbar sind:

```
class  Enum a  where
    succ, pred     :: a -> a
    toEnum         :: Int -> a
    fromEnum       :: a -> Int
    enumFrom       :: a -> [a]             -- [n..]
    enumFromThen   :: a -> a -> [a]        -- [n,n'..]
    enumFromTo     :: a -> a -> [a]        -- [n..m]
    enumFromThenTo :: a -> a -> a -> [a]   -- [n,n'..m]
```


Die Klasse Enum (2)

Enum-Instanz für Wochentag

```
instance Enum Wochentag where
 toEnum i = tage!!(i `mod` 7)
 fromEnum t = case elemIndex t tage of
                Just i -> i

tage = [Montag,Dienstag,Mittwoch,Donnerstag,
        Freitag,Samstag,Sonntag]
```

Ein Aufruf:

```
*Main> enumFromTo  Montag Sonntag ↩
[Montag,Dienstag,Mittwoch,Donnerstag,Freitag,Samstag,Sonntag]
*Main> [(Montag)..(Samstag)] ↩
[Montag,Dienstag,Mittwoch,Donnerstag,Freitag,Samstag]
```


Typisierung unter Typklassen

Syntax von polymorphen Typen ohne Typklassen

$$\mathbf{T} ::= TV \mid TC\ \mathbf{T}_1\ \ldots\ \mathbf{T}_n \mid \mathbf{T}_1 \to \mathbf{T}_2$$

Erweiterte Typen $\mathbf{T_e}$ mit Typklassen:

$$\mathbf{T_e} ::= \mathbf{T} \mid \mathbf{Kon}\ \texttt{=>}\ \mathbf{T}$$

Kon ist ein Typklassenkontext:

$$\mathbf{Kon} ::= \text{Klassenname}\ TV \mid (\text{Klassenname}_1\ TV, \ldots, \text{Klassenname}_n\ TV)$$

Zusätzlich: Für *Kontext* `=>` *Typ* muss gelten:
Alle Typvariablen von *Kontext* kommen auch in *Typ* vor.

Z.B. `elem ::(Eq a) => a -> [a] -> Bool`.

Konstruktorklassen

- Die bisherigen Klassen abstrahieren über einen Typ
  Z.B.

```
class  Eq a  where
     (==), (/=)  ::  a -> a -> Bool
     x /= y  = not (x == y)
     x == y  = not (x /= y)
```

  für die Variable `a` kann ein Typ eingesetzt werden.
- In Haskell ist es auch möglich über **Typkonstruktoren** zu abstrahieren
- Solche Klassen heißen **Konstruktorklassen**
- Zu Erinnerung: Z.B. ist `BBaum a` ein Typ aber `BBaum` ein Typkonstruktor.

Die Konstruktorklasse Functor

Definition der Klasse Functor:

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

`f` ist eine Variable für einen Typkonstruktor.

Functor-Instanz für Listen

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

Hier ist der Typkonstruktor [] gemeint! Wie in $[a]$

Die Konstruktorklasse Functor

Functor-Instanz für `BBaum`

```
instance Functor BBaum where
 fmap = bMap
```

Bei Instanzbildung muss der Typkonstruktor `BBaum` und nicht der Typ `(BBaum a)` angegeben werden.

Die Konstruktorklasse Functor

Falsch mit `BBaum a` statt `BBaum`:

```
instance Functor (BBaum a) where
 fmap = bMap
```

ergibt den Fehler:

```
Kind mis-match
The first argument of ‘Functor’ should have kind ‘* -> *’,
but ‘BBaum a’ has kind ‘*’
In the instance declaration for ‘Functor (BBaum a)’
```


Kinds

(“Kind” ist englisch gemeint)

- Kinds sind quasi Typen über Typen
- Syntax: $K ::= * \mid K \texttt{ -> } K$
- Hierbei steht $*$ für einen Typ
- Beispiele:
  - der Typkonstruktor `BBaum` hat den Kind `* -> *`,
  - der Typ `Int` hat den Kind `*`,
  - der Typkonstruktor `Either` hat den Kind `* -> * -> *`.

Instanzen von Functor

```
instance Functor (Either a) where
  fmap f (Left a) = Left a
  fmap f (Right a) = Right (f a)
```

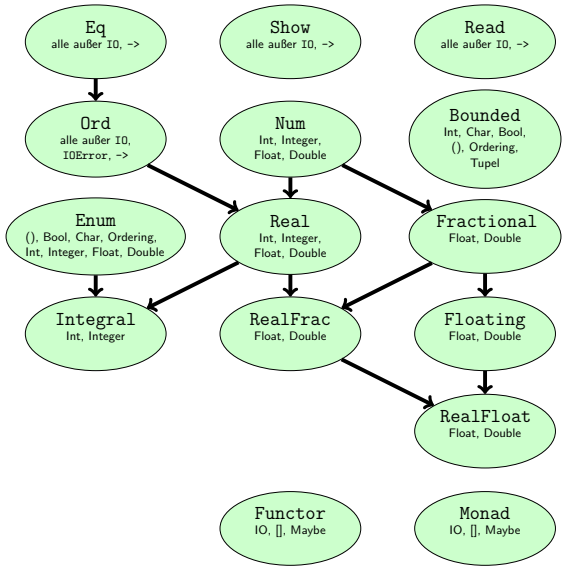
Beachte, dass (Either a) wie ein 1-stelliger Typkonstruktor wirkt, da Either 2-stellig ist.
siehe Data.Either

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

Instanzen von Functor sollten die folgenden beiden Gesetze erfüllen:

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


Übersicht über einige der vordefinierten Typklassen



Neue Typklassen in Haskell ghc 7.10.2

Monoid

```
class Monoid a where
  mempty :: a
  mappend :: a -> a -> a
  mconcat :: [a] -> a
```

Foldable

```
class Foldable (t :: * -> *) where
  fold :: Monoid m => t m -> m
  foldMap :: Monoid m => (a -> m) -> t a -> m
  ...
```

Beispiel

```
fold :: (Foldable t, Monoid m) => t m -> m
```


Auflösung der Überladung

Empfehlung zur eigenen Recherche:
Nutzen Sie :info <...> im ghc.
z.B.:

```
Main> :info Functor

class Functor (f :: * -> *) where
  fmap :: (a -> b) -> f a -> f b
  (<$) :: a -> f b -> f a
   -- Defined in 'GHC.Base'
instance Functor (Either a) -- Defined in 'Data.Either'
instance Functor [] -- Defined in 'GHC.Base'
instance Functor Maybe -- Defined in 'GHC.Base'
instance Functor IO -- Defined in 'GHC.Base'
instance Functor ((->) r) -- Defined in 'GHC.Base'
instance Functor ((,) a) -- Defined in 'GHC.Base'
```

Auflösung der Überladung

- Irgendwann muss die richtige Implementierung für eine überladene Funktion benutzt werden
- Early Binding: Auflösung zur Compilezeit
- Late Binding: Auflösung zur Laufzeit

Zur Erinnerung:

- Parametrisch polymorph: Implementierung ist unabhängig von den konkreten Typen
- Ad hoc polymorph (Typklassen): Implementierung ist abhängig von den konkreten Typen

Auflösung der Überladung durch Typklassen

Haskellprogramm mit Typklassen

⇓ Vor-Übersetzung

Haskellprogramm ohne Typklassen (erweiterte Datentypen)

⇓ (normale Compilation)

Programm für abstrakte Maschine (Graphdatenstrukturen)

Auflösung der Überladung in Haskell

- Es gibt keine Typinformation zur Laufzeit

  deshalb Auflösung zur Compilezeit.
- Diese Auflösung der Überladung ist eine **Übersetzung in typklassenfreies Haskell**.
  UND: Es werden Hilfsdatenstrukturen erzeugt
  UND: Funktionen bekommen tlw zusätzliche Argumente.
- Auflösung benötigt Typinformation,
  daher Auflösung zusammen mit dem Typcheck.
- Typen-Ersatz für Late Binding:
  Datenstruktur die „Typinformation“ enthält
- Typcheck ist notwendig für korrekte Auflösung der Überladung
  Insbesondere lokale Typinformation
  Auch für Optimierungen durch early Binding.

Auflösung der Überladung

Unser Vorgehen zur Transformation in Kernsprache:

- Wir nehmen an, dass Typinformation, auch für Unterausdrücke, vorhanden ist.
- Wir trennen jedoch Auflösung
  und Typcheck (Typberechnung), d.h.
  wir behandeln zunächst nur die Auflösung durch Übersetzung (late binding)

Auflösung der Überladung (2)

Erklärung anhand von Beispielen:
Auflösung von Eq

```
class  Eq a  where
     (==), (/=)  ::  a -> a -> Bool
     x /= y  = not (x == y)
     x == y  = not (x /= y)
```

- Anstelle der Typklasse tritt eine Datentypdefinition:
- Dieser Dictionary-Datentyp ist ein Produkttyp (record), der für jede Klassenmethode eine Komponente erhält.

```
data EqDict a = EqDict {
                  eqEq  :: a -> a -> Bool, -- f"ur ==
                  eqNeq :: a -> a -> Bool  -- f"ur /=
                }
```


Auflösung der Überladung (3)

Methoden bzw. Operatoren - Implementierungen:

- Sie werden als „normale“ Funktionen implementiert
- und erhalten als zusätzliches Argument ein Dictionary (also ein Tupel der Klassenfunktion-Implementierungen)

Anstelle der überladenen Operatoren:

Implementierung von $==$

```
overloadedeq :: EqDict a -> a -> a -> Bool
overloadedeq dict a b = (eqEq dict) a b
```

Implementierung von $/=$

```
overloadedneq :: EqDict a -> a -> a -> Bool
overloadedneq dict a b = (eqNeq dict) a b
```


Auflösung der Überladung (4)

Beachte bei der Übersetzung: aus

```
(==)          :: Eq a => a -> a -> Bool
```

wird:

```
overloadedeq :: EqDict a -> a -> a-> Bool
```

Überladene Funktionen können nun durch zusätzliche Dictionary-Parameter angepasst werden:
Beispiel:

```
elem :: (Eq a) => a -> [a] -> Bool
elem e []    = False
elem e (x:xs)
 | e == x    = True
 | otherwise = elem e xs
```

$\Longrightarrow$

```
elemEq :: EqDict a -> a -> [a] -> Bool
elemEq dict e []    = False
elemEq dict e (x:xs)
 | (eqEq dict) e  x   = True
 | otherwise          = elemEq dict e xs
```


Auflösung der Überladung (5)

`... x == y...` wird zu `... overloadedeq dict x y`

Bei konkreten Typen müssen jedoch die konkreten Dictionaries eingesetzt werden

Z.B. aus

```
... True == False ...
```

wird

```
... overloadedeq eqDictBool True False
```

Auflösung der Überladung

Beispiel:

Aus

```
instance Eq Bool where
   True  == True  = True
   False == False = True
   _ == _         = False
```

wird

```
eqDictBool = EqDict {eqEq = eqBool, eqNeq =  default_eqNeq}
```

und

```
eqBool True  True  = True
eqBool False False = True
eqBool _     _     = False
```


Auflösung der Überladung: Grundtypen

Übersetzung:

```
True == True
```

Typ von == ist hier
`Bool -> Bool -> Bool`

wird zu

```
overloadedeq eqDictBool True True
```

Das kann man durch Beta-Reduktion (zur Compilezeit) weiter vereinfachen:

```
eqEq eqDictBool True True
```

und zu

```
eqBool True True
```

Ergebnis: early binding bei bekanntem Grundtyp

Auflösung der Überladung: Eq auf Listen

```
instance Eq a => Eq [a] where
 ....
 x:xs == y:ys = x == y && xs == ys
```

wird als Funktion übersetzt: dict für Elemente $\mapsto$ dict für Liste

```
eqDictList::  EqDict a -> EqDict [a]
eqDictList dict  =  EqDict {eqEq = eqList dict,
          eqNeq = default_eqNeq (eqDictList dict)}   where

 eqList .... =
 eqList dict (x:xs)  (y:ys)
     = overloadedeq dict x y && overloadedeq (eqDictList dict) xs ys
```


Auflösung der Überladung: Defaults

Default-Implementierungen:

falls Klassenmethoden nicht bei `instance` angegeben:
Hier für die Eq-Typklasse

```
-- Default-Implementierung f"ur ==:
default_eqEq eqDict  x y = not (eqNeq eqDict x y)

-- Default-Implementierung f"ur /=:
default_eqNeq eqDict x y = not (eqEq eqDict x y)
```

Auflösung der Überladung (6)

Weitere Beispiele für konkrete Dictionaries

Aus der Instanzdefinition:

```
instance Eq Wochentag where
 Montag     == Montag     = True
 Dienstag   == Dienstag   = True
 Mittwoch   == Mittwoch   = True
 Donnerstag == Donnerstag = True
 Freitag    == Freitag    = True
 Samstag    == Samstag    = True
 Sonntag    == Sonntag    = True
 _          == _          = False
```

⇒

```
eqDictWochentag :: EqDict Wochentag
eqDictWochentag =
 EqDict {
   eqEq = eqW,
   eqNeq = default_eqNeq eqDictWochentag
 }
  where  eqW Montag     Montag     = True
         eqW Dienstag   Dienstag   = True
         eqW Mittwoch   Mittwoch   = True
         eqW Donnerstag Donnerstag = True
         eqW Freitag    Freitag    = True
         eqW Samstag    Samstag    = True
         eqW Sonntag    Sonntag    = True
         eqW _          _          = False
```

Beachte die Verwendung der Default-Implementierung für `eqNeq`

Auflösung der Überladung (7)

Eq-Dictionary für `Ordering`

```
instance Eq Ordering where
    LT == LT = True
    EQ == EQ = True
    GT == GT = True
    _  == _  = False
```

⇒

```
eqDictOrdering :: EqDict Ordering
eqDictOrdering =
 EqDict {
  eqEq = eqOrdering,
  eqNeq = default_eqNeq eqDictOrdering
 }
  where
   eqOrdering LT LT = True
   eqOrdering EQ EQ = True
   eqOrdering GT GT = True
   eqOrdering _  _  = False
```


Auflösung der Überladung (8)

Instanzen mit Klassenbeschränkungen:

```
instance Eq a => Eq (BBaum a) where
 Blatt a == Blatt b           = a == b
 Knoten l1 r1 == Knoten l2 r2 = l1 == l2 && r1 == r2
 _  ==  _                     = False
```

Auflösung: das Dictionary für `BBaum a` ist eine Funktion,
Diese erhält das Dictionary für a als Argument:

```
eqDictBBaum :: EqDict a -> EqDict (BBaum a)
eqDictBBaum dict = EqDict {
                     eqEq  = eqBBaum dict,
                     eqNeq = default_eqNeq (eqDictBBaum dict)
                   }
 where
  eqBBaum dict (Blatt a) (Blatt b) =
    overloadedeq dict a b -- hier Eq-Dictionary f"ur dict
  eqBBaum dict (Knoten l1 r1) (Knoten l2 r2) =
    eqBBaum dict l1 l2 && eqBBaum dict r1 r2
  eqBBaum dict x y = False
```


Auflösung der Überladung (9)

Auflösung bei **Unterklassen**:

Der Datentyp enthält die Dictionaries der Oberklassen

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

 compare x y | x == y    = EQ
             | x <= y    = LT
             | otherwise = GT

 x <= y  = compare x y /= GT
 x <  y  = compare x y == LT
 x >= y  = compare x y /= LT
 x >  y  = compare x y == GT

 max x y | x <= y    =  y
         | otherwise =  x
 min x y | x <= y    =  x
         | otherwise =  y
```

⇒

```
data OrdDict a =
 OrdDict {
  eqDict :: EqDict a,    -- Dictionary
                         -- der Oberklasse
  ordCompare :: a -> a -> Ordering,
  ordL  :: a -> a -> Bool,
  ordLT :: a -> a -> Bool,
  ordGT :: a -> a -> Bool,
  ordG  :: a -> a -> Bool,
  ordMax :: a -> a -> a,
  ordMin :: a -> a -> a
  }
```

Auflösung der Überladung (10)

Übersetzung der Default-Implementierungen:

```
compare x y | x == y    = EQ
            | x <= y    = LT
            | otherwise = GT
```

⇒

```
default_ordCompare dictOrd x y
  | (eqEq (eqDict dictOrd)) x y = EQ
  | (ordLT dictOrd) x y         = LT
  | otherwise                   = GT
```

```
x <= y  = compare x y /= GT
```

⇒

```
default_ordLT dictOrd x y =
  let compare = (ordCompare dictOrd)
      nequal  = eqNeq (eqDictOrdering)
  in (compare x y) `nequal` GT
```

```
x <  y  = compare x y == LT
```

⇒

```
default_ordL dictOrd x y =
  let compare = (ordCompare dictOrd)
      equal    = eqEq eqDictOrdering
  in (compare x y) `equal` LT
```

usw.

Auflösung der Überladung (11)

Ord-Dictionary für `Wochentag`:

```
instance Ord Wochentag where
 a <= b =
   (a,b) `elem`  [(a,b) | i <- [0..6], let a = ys!!i, b <- drop i ys]
  where ys = [Montag,Dienstag,Mittwoch,Donnerstag,Freitag,Samstag,Sonntag]
```

⇒

```
ordDictWochentag = OrdDict {
  eqDict = eqDictWochentag,
  ordCompare = default_ordCompare ordDictWochentag,
  ordL  = default_ordL ordDictWochentag,
  ordLT = wt_lt,
  ordGT = default_ordGT ordDictWochentag,
  ordG  = default_ordG ordDictWochentag,
  ordMax = default_ordMax ordDictWochentag,
  ordMin = default_ordMin ordDictWochentag
  }
  where
   wt_lt  a b =
      (a,b) `elem` [(a,b) | i <- [0..6], let a = ys!!i, b <- drop i ys]
   ys = [Montag, Dienstag, Mittwoch, Donnerstag, Freitag, Samstag, Sonntag]
```


Auflösung der Überladung (11)

Konstruktorklassen:

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

Typvariablen a und b müssen dem Dictionary hinzugefügt werden:

```
data FunctorDict a b f = FunctorDict {
  functorFmap :: (a -> b) -> f a -> f b}
```

Die überladene `fmap`-Funktion nach der Übersetzung:

```
overloaded_fmap :: (FunctorDict a b f) -> (a -> b) -> f a -> f b
overloaded_fmap dict = functorFmap dict
```

Instanz für BBaum:

```
functorDictBBaum = FunctorDict {functorFmap = bMap}
```


Erweiterung von Typklassen

Multiparameter Klassen

- Haskell erlaubt nur eine „Kind“-Variable in der Klassendeklaration
- Multiparameter-Klassen erlauben auch mehrere „Kind“-Variablen, z.B.

```
class Indexed c a i where
sub :: c -> i -> a
idx :: c -> a -> Maybe i
```

- Überlappende bzw. flexible Instanzen sind in Haskell verboten:

```
instance Eq (Bool,Bool) where
(a,b) == (c,d) = ...
```

- Funktionale Abhängigkeiten

```
class MyClass a b | a -> b where
```

bedeutet in etwa: Der Typ b wird durch den Typ a bestimmt.

Problem fast aller Erweiterungen: Typsystem wird unentscheidbar!

Haskells hierarchisches Modulsystem

Haskells hierarchisches Modulsystem

Aufgaben von Modulen

- Strukturierung / Hierarchisierung
- Kapselung
- Wiederverwendbarkeit

Moduldefinition in Haskell

`module` *Modulname*(*Exportliste*) `where`

$$\left.\begin{array}{l} \textit{Modulimporte}, \\ \textit{Datentypdefinitionen}, \\ \textit{Funktionsdefinitionen}, \ldots \end{array}\right\} \textit{Modulrumpf}$$

- Name des Moduls muss mit Großbuchstaben beginnen
- Exportliste enthält die nach außen sichtbaren Funktionen und Datentypen
- Dateiname = Modulname.hs (bei hierarchischen Modulen Pfad+Dateiname = Modulname.hs)
- Ausgezeichnetes Modul `Main` muss Funktion `main :: IO ()` exportieren

Import / Export

Beispiel:

```
module Spiel where
  data Ergebnis = Sieg | Niederlage | Unentschieden
  berechneErgebnis a b = if a > b then Sieg
                         else if a < b then Niederlage
                              else Unentschieden
  istSieg Sieg = True
  istSieg _    = False
  istNiederlage Niederlage = True
  istNiederlage _          = False
```

- Da keine Exportliste: Es werden alle Funktionen und Datentypen exportiert
- Außer importierte

Exporte

Exportliste kann enthalten

- Funktionsname (in Präfix-Schreibweise) Z.B.: ausschließlich `berechneErgebnis` wird exportiert

```
module Spiel(berechneErgebnis) where
```

- Datentypen mittels `data` oder `newtype`, drei Möglichkeiten
  - Nur `Ergebnis` in die Exportliste:

    ```
    module Spiel(Ergebnis) where
    ```

    Typ `Ergebnis` wird exportiert, die Datenkonstruktoren, d.h. `Sieg`, `Niederlage`, `Unentschieden` jedoch nicht
  - `module Spiel(Ergebnis(Sieg, Niederlage))`

    Typ `Ergebnis` und die Konstruktoren `Sieg` und `Niederlage` werden exportiert, nicht jedoch `Unentschieden`.
  - Durch den Eintrag `Ergebnis(..)`, wird der Typ mit sämtlichen Konstruktoren exportiert.

Exporte (2)

Exportliste kann enthalten

- Typsynonyme, die mit `type` definiert wurden

```
module Spiel(Result) where
  ... wie vorher ...
  type Result = Ergebnis
```

- Importierte Module:

```
module Game(module Spiel, Result) where
  import Spiel
  type Result = Ergebnis
```

`Game` exportiert alle Funktionen, Datentypen und Konstruktoren, die auch `Spiel` exportiert sowie zusätzlich noch den Typ `Result`.

Importe

Einfachste Form: Importiert alle Einträge der Exportliste

`import` *Modulname*

Andere Möglichkeiten:

- Explizites Auflisten der zu importierenden Einträge:

```
module Game where
  import Spiel(berechneErgebnis, Ergebnis(..))
  ...
```

- Explizites Ausschließen einzelner Einträge:

```
module Game where
  import Spiel hiding(istSieg,istNiederlage)
  ...
```


Importe (2)

So importierte Funktionen und Datentypen sind mit ihrem unqualifizierten und ihrem qualifizierten Namen ansprechbar.
Qualifizierter Name: *Modulname*.*unqualifizierter Name*

```
module A(f) where
    f a b = a + b
module B(f) where
    f a b = a * b
module C where
    import A
    import B
    g = f 1 2 + f 3 4 -- funktioniert nicht!
```

```
Prelude> :l C.hs ↩

ERROR C.hs:4 - Ambiguous variable occurrence "f"
*** Could refer to: B.f A.f
```

Importe (3)

Mit qualifizierten Namen funktioniert es:

```
module C where
  import A
  import B
  g = A.f 1 2 + B.f 3 4
```

Mit Schlüsselwort `qualified` kann man nur die qualifizierten Namen importieren:

```
module C where
  import qualified A
  g = f 1 2   -- f ist nicht sichtbar
```

```
Prelude> :l C.hs ⏎

ERROR C.hs:3 - Undefined variable "f"
```


Importe (4)

Lokale Aliase: Schlüsselwort as:

```
import LangerModulName as C
```


Importe (5)

Übersicht:

Import-Deklaration	definierte Namen
`import M`	`f, g, M.f, M.g`
`import M()`	keine
`import M(f)`	`f, M.f`
`import qualified M`	`M.f, M.g`
`import qualified M()`	keine
`import qualified M(f)`	`M.f`
`import M hiding ()`	`f, g, M.f, M.g`
`import M hiding (f)`	`g, M.g`
`import qualified M hiding ()`	`M.f, M.g`
`import qualified M hiding (f)`	`M.g`
`import M as N`	`f, g, N.f, N.g`
`import M as N(f)`	`f, N.f`
`import qualified M as N`	`N.f, N.g`

Hierarchische Modulstruktur

- Modulnamen mit Punkten versehen geben Hierarchie an: z.B.
  `module A.B.C`
- Allerdings ist das rein syntaktisch (es gibt keine Beziehung zwischen Modul `A.B` und `A.B.C`)
- Beim Import:
  `import A.B.C`
  sucht der Compiler nach dem File namens `C.hs` im Pfad `A/B/`