universität innsbruck

WS 2026/2027



Funktionale Programming

Woche 3 – Funktionen auf Bäumen

René Thiemann
Maria Fritzler Adam Pescoller Michael Schaper Lilly Schönherr

Institut für Informatik

Letzte Vorlesung

- Daten sind oft in Baum-Form
- jeder Wert und Ausdruck und jede Funktion hat einen Typ
- Typen von linker (`lhs`) und rechter (`rhs`) Seite einer Funktions-Definition `lhs = rhs` müssen gleich sein
- vordefinierte Typen: `Int`, `Integer`, `Float`, `Double`, `String`, `Char`, `Bool`
- benutzerdefinierte Datentypen

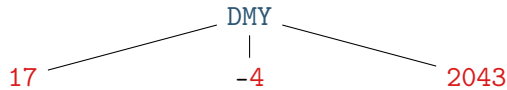
```
data TName =
    CName1 type1_1 ... type1_N1
  | ...
  | CNameM typeM_1 ... typeM_NM
  deriving Show
```

- ein Konstruktor `CNameI :: typeI_1 -> ... -> typeI_NI -> TName` ist eine Funktion, die nicht ausgewertet wird
- `TName` ist rekursiv, wenn mindestens ein `typeI_J` genau `TName` ist
- Namen von Typen und Konstruktoren beginnen mit Großbuchstaben

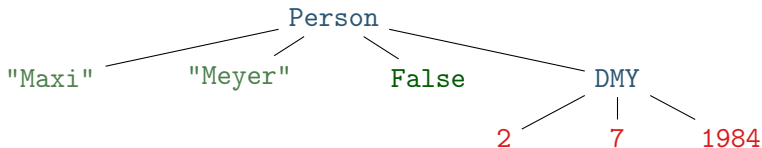
Beispiele nicht-rekursiver Datentypen

```
data Date = DMY Int Int Integer deriving Show
data Person = Person String String Bool Date deriving Show
```

- Werte vom Typ `Date` sind Bäume wie der folgende



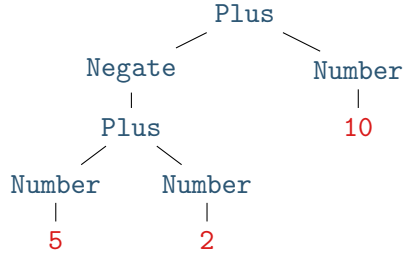
- Werte vom Typ `Person` sind Bäume wie der folgende



Beispiel eines rekursiven Datentyps – `Expr`

```
data Expr =
    Number Integer
  | Plus Expr Expr
  | Negate Expr
  deriving Show
```

- der Typ kann mathematische Ausdrücke $(-(5+2))+10$ als Haskell-Wert repräsentieren:
  `Plus (Negate (Plus (Number 5) (Number 2))) (Number 10)`
- Repräsentation als Baum



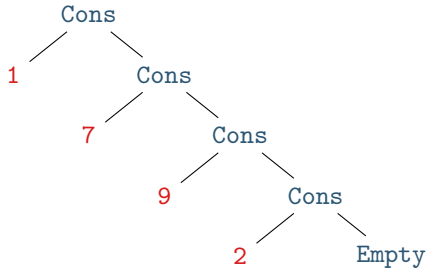
- obiger Wert ist nicht gleich `Number 3` und wird auch nicht dazu ausgewertet

Beispiel eines rekursiven Datentyps – Listen

- Listen sind eine spezielle Form von Bäumen, z.B. Listen von `Integer` Zahlen

```
data List =
    Empty
  | Cons Integer List
  deriving Show
```

- Repräsentation der Liste $[1, 7, 9, 2]$
  - in Haskell als Text: `Cons 1 (Cons 7 (Cons 9 (Cons 2 Empty)))`
  - als Baum:



Neue Formen von Funktions-Definitionen

Funktions-Definitionen und Ausdrücke

- bislang hatten alle Funktions-Definitionen die Form
  `funName x1 ... xN = expr`
  wobei
  - `x1` ... `xN` Variablen sind;
    eine Funktion kann beliebig viele Argumente haben, inkl. 0
  - `expr` ist ein Ausdruck, d.h., ein mathematischer Ausdruck bestehend aus
    - Variablen: `x`, `y`, `xs`, `f`, ...
    - Literalen: `5`, `3.4`, `'a'`, `"hello"`, ...
    - Funktions-Anwendungen: `pi`, `square expr`, `average expr1 expr2`, ...
    - Konstruktor-Anwendungen: `True`, `Number expr`, `Cons expr1 expr2`, ...
    - Operator-Anwendungen: `- expr`, `expr1 + expr2`, ...
    - Klammern
  - Anmerkung: Funktions- und Konstruktor-Anwendungen binden stärker als Operator-Anwendungen

    $$\texttt{(square 2) + 4} = \texttt{square 2 + 4} \neq \texttt{square (2 + 4)}$$

- diese Vorlesung: Erweiterung der Form von Funktions-Definitionen, insbesondere um Funktionen auf Datentypen zu definieren

Erstellung neuer Werte – Beispiel für Typ `Expr`

- neue Werte werden einfach durch Konstruktoren erstellt
- Beispiel: Datentyp `Expr`

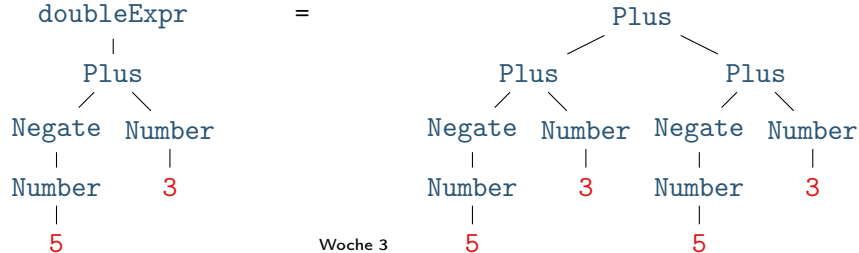
```
data Expr = Number Int | Plus Expr Expr | Negate Expr
```

(für den Rest der Vorlesung wird "`deriving Show`" nicht explizit hingeschrieben)

- Aufgabe: definieren Sie eine Funktion zur Verdopplung, d.h., Multiplikation mit 2
- Lösung:

```
doubleNum  x = x + x      -- Verdopplung einer Zahl
doubleExpr e = Plus e e   -- Verdopplung eines Ausdrucks vom Typ Expr
```

- Auswertung:



Erstellung neuer Werte – Beispiel für Typ `Person`

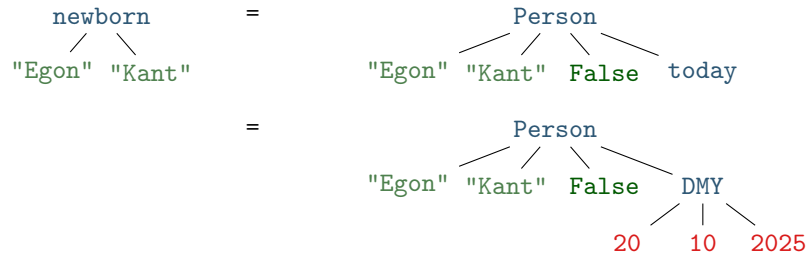
- Erinnerung: Datentyp `Person` ist wie folgt definiert

```
data Date = DMY Int Int Integer
data Person = Person String String Bool Date
```

- Aufgabe: erstellen Sie eine Funktion, die Vor- und Nachname bekommt und daraus ein Wert vom Typ `Person` erstellt, der ein neugeborenes Kind repräsentiert
- Lösung:

```
today = DMY 20 10 2025
newborn fName lName = Person fName lName False today
```

- Auswertung:



Funktions-Definitionen mit Pattern

- bislang waren alle Funktions-Definitionen von der Form
  `funName x1 ... xN = expr`
  mit einer Liste von Variablen `x1 ... xN`
- in diesen Definitionen kann man nicht die Struktur der Eingaben erkennen
- Ziel: Fallunterscheidung;
  Funktions-Definitionen, die abhängig von Struktur der Eingabe sind
- Beispiel mit dem Datentyp für Fahrzeuge

```
data Brand = Audi | BMW | Fiat | Lamborghini
data Vehicle = Car Brand Double | Bicycle | Truck Int
```

  - Aufgabe: Konvertieren Sie ein Fahrzeug in einen Text
  - Algorithmus:
    - wenn die Eingabe ein Auto mit x PS ist, dann erzeuge den Text "a car with x PS"
    - wenn die Eingabe ein Fahrrad ist, dann erzeuge den Text "a bicycle"
    - wenn die Eingabe ein Truck mit x Rädern ist, dann erzeuge den Text "a x-wheel truck"
- in Haskell wird die Struktur von Bäumen durch Pattern (Muster) beschrieben
- die Frage, ob ein Eingabe-Baum zu einem Pattern passt nennt man Pattern Matching

Patterns

- ein Pattern ist ein Ausdruck folgender Bauart
  - `x` — Variablen wie bei einer Funktions-Definition
  - `_` — Unterstrich
  - `CName pat1 ... patN` — Konstruktor-Anwendung mit Pattern `pat1 ... patN` als Argumenten
  - `x@pat` — Variable gefolgt vom `@`-Zeichen und einem Pattern

  wobei
  - jede Variable nur einmal vorkommen darf
  - Zahlen, Zeichenketten und Zeichen wie Konstruktoren behandelt werden
  - Klammern bei Bedarf genutzt werden können, um verschachtelte Pattern zu bilden
- Beispiele
  - `Car brand ps` ✔
  - `Car _ ps` ✔
  - `Car BMW 100` ✔
  - `Car _ (50 + 50)` + ist kein Konstruktor ✘
  - `Person "Egon" lName _ _` ✔
  - `p@(Person _ _ _ (DMY 20 10 _))` ✔
  - `Person name name _ _` doppelte Verwendung einer Variable ✘

Pattern Matching

- Gegeben ein Ausdruck und ein Pattern, Pattern Matching
  - entscheidet, ob der Ausdruck zu dem Pattern passt (das Pattern matcht den Ausdruck),
  - und im positiven Fall wird eine Substitution als Lösung erzeugt,
    in der Variablen aus dem Pattern mit (Teil-)Ausdrücken belegt werden
- Beispiele
  - `Car brand ps` matcht `expr`,
    wenn `expr` ein beliebiges Auto ist;
    die Substitution speichert die Marke (in Variable `brand`) and die Leistung (in Variable `ps`)
  - `Car _ ps` matcht `expr`,
    wenn `expr` ein beliebiges Auto ist;
    die Substitution wird nur die Leistung speichern, die Marke ist nicht verfügbar
  - `Car BMW 100` matcht `expr`,
    wenn `expr` ein BMW mit genau 100 PS ist; die Substitution ist leer
  - `Person "Mia" lName _ _` matcht `expr`,
    wenn `expr` eine Person mit Vornamen Mia ist; Substitution speichert Nachnamen in `lName`
  - `p@(Person _ _ _ (DMY 20 10 _))` matcht `expr`
    wenn `expr` eine Person ist, die heute Geburtstag hat;
    die Substitution speichert die gesamte Person in Variable `p`

Algorithmus zum Pattern Matching

- im Algorithmus wird eine Substitution in Form `x1/expr1, ..., xN/exprN` notiert (hier ist / nicht die Division, sondern der wird-substituiert-durch Operator)
- Algorithmus für Eingabe-Pattern `pat` und Ausdruck `expr`
  - Fall `pat` ist Variable `x`: Matching gelingt, Substitution ist `x/expr`
  - Fall `pat` ist `_`: Matching gelingt, leere Substitution
  - Fall `pat` ist `x@pat1`: Matching gelingt gdw. `expr` von `pat1` gematcht wird; füge dann `x/expr` zur Substitution hinzu
  - Fall `pat` ist `CName pat1 ... patN`:
    - falls `expr` die Form `OtherCName ...` hat und `CName` $\neq$ `OtherCName` gilt, dann schlägt das Matching fehl
    - falls `expr` die Form `CName expr1 ... exprN` hat, dann matche `expr1` mit `pat1`, ..., matche `exprN` mit `patN`; wenn alle Matchings erfolgreich sind, dann gelingt das Matching und die Substitutionen werden vereinigt, ansonsten schlägt das Matching fehl
    - anderenfalls, werte `expr` erst weiter aus, bis der äußerste Konstruktor sichtbar wird
- Anmerkung: der Algorithmus zur Berechnung von Pattern Matching nutzt selber Pattern Matching

Pattern Matching Algorithmus – Beispiele

- matche Ausdruck `Car BMW (20 + 80)` mit verschiedenen Pattern `pat`
  - `pat = x`: Erfolg mit Substitution `x / Car BMW (20 + 80)`
  - `pat = Car brand ps`: Erfolg mit Substitution `brand / BMW, ps / 20 + 80`
  - `pat = Car brand _`: Erfolg mit Substitution `brand / BMW`
  - `pat = Car Audi _`: Fehlschlag
  - `pat = Car _ 100`: Erfolg mit leerer Substitution, benötigt Auswertung

- nächstes Beispiel mit Ausdruck `Person "Mia" "Kuhn" True (DMY 20 10 1970)`
  - `pat = Person "John" lName _ _`: Fehlschlag
  - `pat = p@(Person _ _ _ (DMY 20 10 _))`: Erfolg mit Substitution `p / Person "Mia" "Kuhn" True (DMY 20 10 1970)`

Funktions-Definitionen mit Pattern Matching

- bislang waren alle Funktions-Definitionen von der Form
  `funName x1 ... xN = expr`
- jetzt: Verallgemeinerung der Form auf zwei Weisen
  - eine Funktions-Definition hat die Form

    `funName pat1 ... patN = expr` $(\star)$

    wobei alle Variablen der Pattern `pat1 ... patN` maximal einmal in den Pattern vorkommen
  - es kann mehrere definierende Gleichungen für die gleiche Funktion geben
- Auswertung von `funName expr1 ... exprN` für einzelne Funktions-Gleichung $(\star)$
  - wenn `expr1` von `pat1` gematcht wird und ... und `exprN` von `patN` gematcht wird, dann ist die Gleichung anwendbar und `funName expr1 ... exprN` wird durch die rechte Seite `expr` ersetzt, wobei man die Substitutionen aus dem Matching anwendet
  - ansonsten ist $(\star)$ nicht anwendbar
- Auswertung von `funName expr1 ... exprN`
  - wende die oberste Funktions-Gleichung an, die anwendbar ist
  - falls keine Gleichung anwendbar ist, dann breche mit einer Fehlermeldung ab

Funktions-Definitionen – Beispiele mit dem Typ `Person`

```
data Date = DMY Int Int Integer
data Person = Person String String Bool Date
data Option  = Some Integer | None
```

- Aufgabe: ändere den Nachnamen einer Person
  ```
  withLastName lName (Person fName _ m b) = Person fName lName m b
  ```
  Anmerkung: in Haskell werden Daten nie verändert, sondern neu erzeugt
- Aufgabe: Berechne das Alter einer Person in Jahren, wenn diese heute Geburtstag hat, sonst gebe nichts zurück
  ```
  ageYear (Person _ _ _ (DMY 20 10 y)) = Some (2025 - y)
  ageYear _  = None
  ```
  Anmerkung: die Reihenfolge der Gleichungen ist hier wichtig
- Aufgabe: Erstellen Sie eine Begrüßung für eine Person
  ```
  greeting p@(Person name _ _ _) = gHelper name (ageYear p)
  gHelper n None = "Hello " ++ n
  gHelper n (Some a) = "Hi " ++ n ++ ", you turned " ++ show a
  ```
  Anmerkung: `(++)` verkettet zwei `String`s, `show` konvertiert einen Wert in einen `String`

Vereinigung von Substitutionen und Gleichheit

- betrachten Sie folgendes Programm, um auf Gleichheit von zwei Argumenten zu testen

```
equal x x = True
equal _ _ = False
```

- wie würde die Auswertung von `equal 5 7` funktionieren?
  - erstes Argument: `x` matcht `5`, erhalte Substitution `x / 5`
  - zweites Argument: `x` matcht `7`, erhalte Substitution `x / 7`
  - Vereinigung dieser Substitutionen ist nicht möglich: `x / ???`
- Haskell umgeht dieses Problem durch die Einschränkungen, dass Variablen auf linken Seiten einer definierenden Gleichung nur einmal verwendet werden dürfen; die Funktions-Definition von `equal` ist in Haskell nicht erlaubt
- korrekte Lösung, um auf Gleichheit zu Testen:
  - `(==)` ist ein vordefinierter Operator, um zwei Werte des gleichen Typs zu vergleichen, das Ergebnis ist ein Wert vom Typ `Bool`
  - um Gleichheit auf eigenen Datentypen zu verwenden, ersetzen Sie `deriving Show` durch `deriving (Show, Eq)`
  - korrekte Ausdrücke: `5 == 7`, `"Peter" == name`, ..., aber nicht `"five" == 5`

Funktions-Definitionen – Beispiel mit Typ `Bool`

- der Typ `Bool` ist intern wie folgt definiert: `data Bool = True | False`
- folgende Funktion berechnet die Konjunktion zweier `Bool`-Werte

```
conj True  b = b
conj False _ = False
```

- Beispiel Berechnung (die Zahlen werden hier nur zur Benennung genutzt)

```
  conj1 (conj2 True False) (conj3 True True)
-- check which equation is applicable for conj1
-- first equation triggers evaluation of first argument of conj1 (True)
-- check which equation is applicable for conj2
-- first equation is applicable with substitution b/False
= conj1 False (conj3 True True)
-- now see that only second equation is applicable for conj1
= False
```

- Anmerkung: viele Boole'sche Funktionen sind vordefiniert, z.B.,
  `(&&)` (Konjunktion), `(||)` (Disjunktion),
  `(/=)` (exklusives Oder), `not` (Negation)

Funktions-Definitionen mit Fallunterscheidung

- Design-Prinzip für Funktionen:
  definieren Sie Gleichungen, die alle möglichen Arten von Eingaben behandeln
- Beispiel

```
data Weekday = Mon | Tue | Wed | Thu | Fri | Sat | Sun

weekend Sat = True
weekend Sun = True
weekend _   = False
```

- Beispiel: erstes Element einer Liste

```
data List = Empty | Cons Integer List

first (Cons x xs) = x
first Empty       = error "first on empty list"
```

- `error` nimmt einen `String` und liefert diesen Text als Fehlermeldung bei der Ausführung
- ohne die zweite Gleichung von `first` würde `first Empty` in einem allgemeinen "non-exhaustive patterns" Fehler resultieren

Rekursive Funktions-Definitionen

- Beispiel: Länge einer Liste

```
len Empty = 0
len (Cons x xs) = 1 + ???  -- ??? = die Laenge der Liste xs
```

- potentielles Problem: wir würden gerne die Funktion aufrufen, die wir gerade definieren
- das ist bei der Programmierung erlaubt und nennt sich Rekursion:
  eine Funktion, die sich in der rechten Seite selbst aufruft

```
len Empty = 0
len (Cons x xs) = 1 + len xs -- len xs ist ein rekursiver Aufruf
```

- in rekursiven Aufrufen sollte man sicherstellen, dass die Argumente kleiner werden
- die Auswertung funktioniert unverändert wie bisher

```
  len (Cons 1 (Cons 7 (Cons 9 Empty)))
= 1 + (len (Cons 7 (Cons 9 Empty)))
= 1 + (1 + (len (Cons 9 Empty)))
= 1 + (1 + (1 + (len Empty)))
= 1 + (1 + (1 + 0)) = 1 + (1 + 1) = 1 + 2 = 3
```

Rekursive Funktions-Definitionen – Verkettung zweier Listen

- Ziel: Verkettung zweier Listen, d.h., die Verkettung von $[1, 5]$ und $[3]$ resultiert in $[1, 5, 3]$
- Lösung: Pattern Matching und Rekursion im ersten Argument

```
append Empty ys = ys
append (Cons x xs) ys = Cons x (append xs ys)
```

- Beispiel Auswertung

```
  append (Cons 1 (Cons 3 Empty)) (Cons 2 (Cons 7 Empty))
= Cons 1 (append (Cons 3 Empty) (Cons 2 (Cons 7 Empty)))
= Cons 1 (Cons 3 (append Empty (Cons 2 (Cons 7 Empty))))
= Cons 1 (Cons 3 (Cons 2 (Cons 7 Empty)))
```

Rekursive Funktions-Definitionen – Mathematische Ausdrücke (1)

- betrachten Sie den Datentyp für mathematische Ausdrücke

```
data Expr =
    Number Integer
  | Plus Expr Expr
  | Negate Expr
```

- Aufgabe: implementieren Sie einen Taschenrechner, d.h. werten Sie einen Ausdruck aus
- Lösung:

```
eval (Number x)    = x
eval (Plus e1 e2) = eval e1 + eval e2
eval (Negate e)    = - eval e
```

Rekursive Funktions-Definitionen – Mathematische Ausdrücke (2)

- betrachten Sie den Datentyp für mathematische Ausdrücke

```
data Expr =
    Number Integer
  | Plus Expr Expr
  | Negate Expr
```

- Aufgabe: erstellen Sie eine Liste aller Zahlen, die in dem Ausdruck vorkommen
- Lösung:

```
numbers (Number x)    = Cons x Empty
numbers (Plus e1 e2) = append (numbers e1) (numbers e2)
numbers (Negate e)    = numbers e
```

Zusammenfassung

- Funktions-Definitionen können eine Fallunterscheidung mittels Pattern Matching implementieren
  - ein Pattern beschreibt die Struktur eines Baums
  - mehrere Gleichungen sind erlaubt; Haskell versucht diese nach-und-nach anzuwenden, beginnend mit der ersten Gleichung
- Funktions-Definitionen können rekursiv sein
  - `funName ... = ... (funName ...) ... (funName ...) ...`
  - die Argumente in rekursiven Aufrufen sollten kleiner sein als die Argumente in linker Gleichungs-Seite