

Dieses Dokument ist vom 30.12.2025. Die aktuelle Version des Dokuments kannst du im moodle oder [direkt von GitHub herunterladen](#).

Dieses Dokument enthält 236 Fragen, 22 kleinere bis größere Aufgaben und andere Ressourcen zum Thema Deklarative Programmierung. Die Inhalte dieses Dokuments sollen dir helfen, dein Verständnis über Haskell und Prolog zu prüfen und zu stärken.

Größere Aufgaben haben wir als Challenges markiert. Diese Aufgaben benötigen öfter mehrere Konzepte und führen zusätzlich Konzepte ein, die nur für das Lösen der Aufgabe wichtig sind. Wenn die zusätzlichen Konzepte, dir zu sehr Schwierigkeiten bereiten, überspringe die entsprechende Frage oder Aufgabe.

Die Nomenklatur des Aufgaben ist aktuell möglicherweise noch etwas willkürlich, da es Tests gibt, die wie Challenges wirken – und möglicherweise sogar andersherum.

Wenn du Anmerkungen oder weitere Ideen für Inhalte für dieses Dokument hast, dann schreibe uns gerne über z.B. mattermost an – oder [erstellt ein issue oder stellt eine PR auf GitHub](#).

## Funktionale Programmierung

**Test 1** Was bedeutet es, wenn eine Funktion keine Seiteneffekte hat?

**Test 2** Haskell ist eine streng getypte Programmiersprache. Was bedeutet das?

**Test 3** Wenn du eine Schleife in Haskell umsetzen möchtest, auf welches Konzept musst du dann zurückgreifen?

**Test 4** In imperativen Programmiersprachen sind Variablen Namen für Speicherzellen, deren Werte zum Beispiel in Schleifen verändert werden können. Als Beispiel betrachte

```
def clz(n):
    k = 0
    while n > 0:
        n //= 2
        k += 1
    return 64 - k

def popcnt(n):
    k = 0
    while n > 0:
        if n % 2 == 1:
            k += 1
        n //= 2
    return k
```

In Haskell sind Variablen keine Namen für Speicherzellen. Wie können wir dieses Programm in Haskell umsetzen? Wo wandert das `k` hin?

**Test 5** Auf was müssen wir achten, wenn wir eine rekursive Funktion definieren? Die Antwort ist abhängig von dem, was die Funktion berechnen soll. Denke über die verschiedenen Möglichkeiten nach und gebe Beispiele an.

**Test 6** Gegeben sei das folgende Haskell-Programm.

```
even :: Int -> Bool
even 0 = True
even n = odd (n - 1)

odd :: Int -> Bool
```

```
odd 0 = False
odd n = even (n - 1)
```

- Berechne das Ergebnis von `odd (1 + 1)` händisch.
- Wie sieht der Auswertungsgraph für den Ausdruck `odd (1 + 1)` aus?
  - Welcher Pfad entspricht deiner händischen Auswertung?
  - Welcher Pfad entspricht der Auswertung wie sie in Haskell stattfindet?
  - Welcher Pfad entspricht der Auswertung wie sie in Python sinngemäß stattfindet?

**Test 7** Es wird als sauberer Programmierstil angesehen, Hilfsfunktionen, die nur für eine Funktion relevant sind, nicht auf der höchsten Ebene zu definieren. Mithilfe welcher Konstrukte kannst du diese lokal definieren?

**Test 8** Das Potenzieren einer Zahl  $x$  (oder eines Elements einer Halbgruppe) mit einem natürlich-zahligen Exponent  $n$  ist in  $\mathcal{O}(\log n)$  Laufzeit möglich<sup>1</sup>, sofern wir die Laufzeit für die Verknüpfung vernachlässigen können. Dafür betrachten wir

$$x^n = \begin{cases} (x^{\frac{n}{2}})^2 & \text{falls } n \text{ gerade} \\ x \cdot x(x^{\frac{n-1}{2}})^2 & \text{sonst} \end{cases}$$

Implementiere eine Funktion, die diese Variante des Potenzierens umsetzt.

**Test 9** Gegeben ist folgender Ausdruck.

```
let v = 3
    w = 5
    x = 4
    y = v + x
    z = x + y
in y
```

Welche Belegungen der Variablen werden tatsächlich berechnet, wenn wir `y` ausrechnen?

**Test 10** Ist der folgende Ausdruck typkorrekt?

```
if 0 then 3.141 else 3141
```

**Test 11** Wie werden algebraische Datentypen in Haskell definiert?

**Test 12** Was ist charakterisierend für Aufzählungstypen, Verbundtypen und rekursive Datentypen? Gebe Beispiele für jeden dieser Typarten an.

**Test 13** Gegeben ist der Typ `IntList` mit `data IntList = Nil | Cons Int IntList`. Weiter kann mithilfe der Funktion

```
lengthIntList :: IntList -> Int
lengthIntList Nil = 0
lengthIntList (Cons _ xs) = 1 + lengthIntList xs
```

die Länge einer solchen Liste berechnet werden. Du möchtest nun auch die Längen von Listen berechnen, die Buchstaben, Booleans oder Gleitkommazahlen enthalten. Was stört dich am bisherigen Vorgehen? Kennst du ein Konzept mit dessen Hilfe du mit weniger Arbeit an dein Ziel kommst?

**Test 14** Wie ist die Funktion `lengthIntList :: IntList -> Int` aus dem vorherigen Test definiert?

---

<sup>1</sup>[Binäre Exponentiation](#)

**Test 15** Du hast einen Datentypen definiert und möchtest dir Werte des Typen nun z.B. im GHCi anzeigen lassen. Was kannst du tun, um dieses Ziel zu erreichen?

**Test 16** Wie definieren wir Funktionen?

**Test 17** Gebe ein Listendatentypen an, für den es nicht möglich ist, kein Element zu enthalten.

**Test 18** In Programmiersprachen wie Java greifen wir auf Daten komplexer Datentypen zu, indem wir auf Attribute von Objekten zugreifen oder getter-Methoden verwenden. Wie greifen wir auf Daten in Haskell zu?

**Test 19** Wie sieht eine Datentypdefinition in Haskell im Allgemeinen aus?

**Test 20** Welchen Typ haben

- `(:)` und `[]`,
- `Just` und `Nothing`,
- `Left` und `Right`?

**Test 21** Was ist parametrischer Polymorphismus?

**Test 22** Welche Typkonstruktoren des kinds `* -> *` kennst du?

**Test 23** Welchen kinds haben jeweils `Either` und `Either a`?

**Test 24** Beim Programmieren in Haskell vernachlässigen redundante Syntax. Gibt es in Haskell einen Unterschied zwischen `f 1 2` und `f(1, 2)`.

**Test 25** Welches Konzept erlaubt es uns, dass wir Funktionen auf Listen nicht für jeden konkreten Typen angeben müssen?

**Test 26** Wie gewinnt man aus einem Typkonstruktor einen Typ?

**Test 27** Visualisiere `[1, 2, 3]` als Termbaum, wie du es in der Vorlesung kennengelernt hast. Zur Erinnerung: die inneren Knoten sind Funktionen und die Blätter Werte, die nicht weiter ausgerechnet werden können.

**Test 28** Ist `[32, True, "Hello, world!"]` ein valider Haskell-Wert? Warum ja oder nein?

**Test 29** Was ist der Unterschied zwischen einem Typ und einem Typkonstruktor?

**Test 30** Gegeben ist

```
data Pair a b = Pair a b
```

Wie unterscheidet sich der Typ von

```
data Pair a = Pair a a
```

### Challenge 1

- Der größte gemeinsamen Teiler (ggT) zweier Ganzzahlen kann mithilfe des euklidischen Algorithmus berechnet werden. Implementiere das Verfahren.

$$\text{gcd}(x, y) = \begin{cases} |x| & \text{falls } y = 0 \\ \text{gcd}(y, x \bmod y) & \text{sonst} \end{cases}$$

- Alternativ kann der ggT auch berechnet werden, indem wir das Produkt des Schnittes der Primfaktorzerlegung der beiden Zahlen betrachten, also

$$\prod (\text{PF}(x) \cap \text{PF}(y)),$$

wobei PF die Menge der Primfaktoren der gegebenen Zahl (mit entsprechenden Mehrfachvorkommen) beschreiben soll. Implementiere diesen Ansatz.

**Challenge 2** Die Ableitung einer Funktion  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  kann mithilfe des Differenzenquotienten  $\frac{f(x+h)-f(x)}{h}$  für kleines  $h$  approximiert werden. Eine andere Methode zur Berechnung der Ableitung ist symbolisches Differenzieren und ähnelt dem, wie wir analytisch Ableitungen berechnen. Eine Funktion sei dargestellt durch den folgenden Typ:

```
data Fun = X          -- x      (Variable x)
         | E          -- e      (Euler's constant)
         | Num Double -- c      (Constant)
         | Ln Fun     -- ln     (Natural logarithm)
         | Fun :+: Fun -- f + g (Addition)
         | Fun :-: Fun -- f - g (Subtraction)
         | Fun *: Fun  -- f * g (Multiplication)
         | Fun :/: Fun -- f / g (Division)
         | Fun <.: Fun -- f o g (Composition)
         | Fun ^: Fun  -- f ^ g (Exponentiation)

-- Example
f :: Fun
f = (E ^: X) <.: (X *: X) -- (e^x) o (x * x) = e^(x^2)

-- Example
g :: Fun
g :: let x = X
      x2 = x *: x
      x3 = x2 *: x
      in x3 :+: x2 :+: x :+: Num 1.0 -- x^3 + x^2 + x + 1
```

- Implementiere eine Funktion `($$) :: Fun → Double → Double`, die eine gegebene Funktion in einem gegebenen Punkt auswertet.
- Implementiere eine Funktion `derive :: Fun → Fun`, die eine gegebene Funktion ableitet.<sup>2</sup> Die Funktionen müssen nach dem Ableiten nicht vereinfacht werden.

**Challenge 3** In Einführung in die Algorithmik hast du verschiedene Varianten des mergesort-Algorithmus kennengelernt. Eine davon hat ausgenutzt, dass in einer Eingabeliste bereits aufsteigend sortierte Teillisten vorkommen können, um den Algorithmus zu beschleunigen.<sup>3</sup> Implementiere diese Variante in Haskell.

Für den Anfang kannst du annehmen, dass die Eingabelisten vom Typ `[Int]` sind. Wenn wir Typklassen behandelt haben, kannst du `Ord a ⇒ [a]` nutzen.

**Challenge 4** Entwickle einen Datentyp `Ratio`, um rationale Zahlen

$$\frac{p}{q} \in \mathbb{Q}, \quad p \in \mathbb{Z}, q \in \mathbb{N}, p \text{ und } q \text{ teilerfremd}$$

darzustellen. Implementiere die Operationen: Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division. Implementiere weiter eine Funktion, die die rationale Zahl als reelle Zahl mit einer festen Anzahl von Nachkommastellen darstellt.

Später kannst du auch hier die jeweiligen Typklassen verwenden, um die arithmetischen Operationen zu überladen.

<sup>2</sup>Zusammenfassung der Ableitungsregeln

<sup>3</sup>Falls du interessiert bist: In der Haskell base-library wird `sort` aus `Data.List` sehr ähnlich implementiert: [Data.List.sort](#).

**Test 31** Wie können wir es hinkriegen, dass die invalide Liste `[32, True, "Hello, world!"]` ein valider Haskell-Wert wird? Mithilfe welches Hilfstypen kriegen das hin? (Die Liste müssen wir dafür unter Umständen umschreiben.)

**Test 32** Du hast bereits viele Funktionen kennengelernt, die in der Haskell `base`-library implementiert sind. Anstatt eine konkrete Liste dieser Funktionen anzugeben, möchten wir dich motivieren, folgende Dokumentationen verschiedener Module anzuschauen.

- [Prelude](#)
- [Data.List](#)

Wenn du merkst, die Implementierung einer bekannten Funktion fällt dir ad hoc nicht ein, nehme dir Zeit und überlege, wie du sie implementieren könntest.

**Test 33** Hier ist eine fehlerhafte Implementierung eines Datentyps für einen knotenbeschrifteten Binärbäumen.

```
data Tree a = Empty | Node Tree a Tree
```

Was ist der Fehler?

**Test 34** In imperativen Programmiersprachen (hier Java) iterieren wir über Listen oft in folgender Form.

```
List<Integer> a = new ArrayList<>();
a.add(3); a.add(1); a.add(4); a.add(1); a.add(5);

List<Integer> b = new ArrayList<>();
for (int i = 0; i < a.size(); i++) {
    b.add(2 * a.get(i));
}
```

Wenn wir diesen Code naiv in Haskell übersetzen, könnten wir z.B.

```
double :: [Int] -> Int -> [Int]
double xs i | i < length xs = 2 * xs !! i : double xs (i + 1)
            | otherwise      = []
```

Das wollen wir niemals so tun.

- Wie unterscheiden sich die Laufzeiten?
- Optimierte die Funktion `double`, sodass sie lineare Laufzeit in der Länge der Liste hat.

Dein Ergebnis sollte Haskell-idiomatisch sein.

**Test 35** Die `(!!)`-Funktion ist unsicher in dem Sinne, dass sie für invalide Listenzugriffe einen Fehler wirft – also z.B. für `xs !! (-1)` oder `xs !! k` mit `k > length xs`. Die Funktion `(!?) :: [a] -> Int -> Maybe a` ist eine sichere Variante von `(!!)`. Sie macht den Fehlerfall explizit durch die Wahl des Ergebnistypen. Wie fängt der Ergebnistyp diesen Fehlerfall auf? Implementiere diese Funktion.<sup>4</sup>

**Test 36** Gegeben sei der Datentyp für knotenbeschriftete Binärbäume

```
data Tree a = Empty | Node (Tree a) a (Tree a).
```

Mithilfe einer Pfadbeschreibung können wir durch so einen Baum navigieren. Diese Beschreibung soll durch eine Liste von Werten vom Typ `data D = L | R` dargestellt sein.<sup>5</sup> Implementiere eine Funktion `(!?) :: Tree a -> [D] -> Maybe a`, die die Beschriftung des

<sup>4</sup>Diese Funktion ist auch bereits vorimplementiert: `(!?)` in `Data.List`.

<sup>5</sup>Da Datenkonstruktoren in Haskell nicht überladen werden können, können hier leider nicht `Left` und `Right` verwendet werden, solange die Datenkonstruktoren des `Either`-Typs im scope sind.

Knotens zurückgibt, der durch die gegebene Pfadbeschreibung gefunden wird. Hier sind kleine Beispiele:

- `Node Empty 3 Empty !? [] = Just 3`
- `Node Empty 3 Empty !? [L] = Nothing`
- `Node Empty 3 Empty !? [R] = Nothing`
- `Node (Node Empty 1 (Node Empty 2 Empty)) 3 Empty !? [L, R] = 2`

**Test 37** `(++) :: [a] → [a] → [a]` wird verwendet, um zwei Listen aneinanderzuhängen. Wenn wir eine Funktion induktiv über den Listentypen definieren wie z.B.

`square :: [Int] → [Int]`, die jeden Listeneintrag quadrieren soll, dann können wir das wie folgt tun.

```
square :: [Int] → [Int]
square []      = []
square (x:xs) = [x * x] ++ square xs
```

Die Funktion ist zwar korrekt aber nicht Haskell-idiomatisch, d.h., eine Person, die Erfahrung im Programmieren von Haskell ist, würde dies nicht so schreiben. Was müssten wir an der Funktion ändern, damit sie idiomatisch wäre.

**Test 38** Die Funktion `show` kann genutzt werden, um Werte eines beliebigen Datentyp in eine String-Repräsentation zu überführen. Warum kann `show` nicht als Funktion vom Typ `a → String` implementiert sein?

**Challenge 5** In Haskell sind Listen als einfach-verkettete Listen implementiert. Das macht sie ungeeignet für Operationen, die wahlfreien Zugriff in konstanter Laufzeit benötigen. Darüber hinaus sind Listen auch nicht mutierbar. Das führt dazu, dass Operationen, die eine Liste verändern, häufig lineare Laufzeit in der Länge der Liste haben – mit Ausnahme der `(:)`-Operation.

Ziel dieser Challenge ist es, eine Datenstruktur zu entwickeln, die eine (amortisiert) konstante `append`-Operation hat. Diese ist bekannt als `Queue`. Sie soll durch `data Queue a = Q [a] [a]` dargestellt werden. Die Idee ist es, eine (linke) Liste vorzuhalten, die eine (amortisiert) konstante `dequeue`-Operationen erlaubt, und eine andere (rechte), die eine konstante `enqueue`-Operationen erlaubt. Das heißt, die fast alle dieser Operationen benötigen konstante Laufzeit und konstant wenige können lineare Laufzeit haben.

Implementiere die Funktionen

- `empty :: Queue a`, die eine leere Queue erzeugt,
- `front :: Queue a → a`, die das erste Element in einer queue zurückgibt,
- `isEmpty :: Queue a → Bool`, die bestimmt, ob eine queue leer ist,
- `enqueue :: a → Queue a → Queue a`, die ein Element an das Ende einer queue anhängt,
- `dequeue :: Queue a → Queue a`, die das erste Element in einer queue entfernt.

Die Implementierung soll dabei folgende Invariante erfüllen: Eine queue ist genau dann leer, wenn die `dequeue`-Liste leer ist. Diese Invariante kannst du z.B. mit einer Hilfsfunktion erzwingen – oder du passt bei der Implementierung deiner Funktionen auf.<sup>6</sup> Falls es dir für den Anfang einfacher fällt, ignoriere die Invariante erstmal.

---

<sup>6</sup>Für Interessierte: Wenn sogar `length xs ≥ length ys` für eine queue `Q xs ys` gewährleistet wird, ist die queue nochmal schneller. Dafür muss man die Längen der Listen immer vorhalten. Mehr darüber findest du in [Simple and efficient purely functional queues and dequeues](#) von Chris Okasaki lesen. Falls dich funktionale Datenstrukturen allgemein interessieren, sei dir [seine Doktorarbeit](#) empfohlen.

**Challenge 6** In den Übungsaufgaben hast du einen Suchbaum ohne Höhenbalancierung implementiert. Die Rotationen für einen AVL-Baum lassen sich durch das pattern matching in Haskell vergleichsweise elegant implementieren - erinnere dich z.B. an die Implementierung aus Einführung in die Algorithmik, die recht verbos ist.

Die Höhe eines Teilbaums kann z.B. als weiteres Attribut im Knoten gespeichert werden. Eine ineffizientere Variante ist es, die Höhe mit einer Funktion wiederkehrend zu berechnen. Letztere Variante ist für den Anfang übersichtlicher.

Implementiere eine Funktion `rotate :: SearchTree a → SearchTree a`, die einen Teilbaum an der Wurzel rebalanciert, sollte der Teilbaum unbalanciert sein. Diese Funktion kannst du dann nutzen, um die gängigen Operationen auf Suchbäumen anzupassen.<sup>7</sup>

**Test 39** Formuliere QuickCheck-Eigenschaften, die die Funktionen

- `isElem :: Int → SearchTree Int → Bool`,
- `toList :: SearchTree Int → [Int]`,
- `insert :: Int → SearchTree Int → SearchTree Int` und
- `delete :: Int → SearchTree Int → SearchTree Int`

erfüllen sollen. `isElem` überprüft, ob eine Ganzzahl in gegebenen Suchbaum enthalten ist. `toList` konvertiert einen Suchbaum in eine Liste. `insert` fügt eine Ganzzahl in einen Suchbaum ein. `delete` löscht eine Ganzzahl aus einen Suchbaum.

Wie kannst du die Suchbaum-Eigenschaft spezifizieren (dafür brauchst du weitere Funktionen)?

**Test 40** QuickCheck-Eigenschaften werden mit zufällig generierten Werten getestet. Hin und wieder kommt es vor, dass diese Werte Vorbedingungen erfüllen müssen, damit wir Eigenschaften von Funktionen testen können. Wie können wir das erreichen?

**Test 41** Wie können wir eine Funktionen teilweise auf Korrektheit testen – also wie können wir für eine beliebige Eingabe verifizieren, dass die Ausgabe korrekt ist?

**Test 42** Welchen Nachteil hat die Prüfung von Vorbedingungen mit ( $\Rightarrow$ )? Wie können wir diese beheben?

**Test 43** Was sind Funktionen höherer Ordnung?

**Test 44** Wie definieren wir Lambda-Abstraktionen bzw. anonyme Funktionen?

**Test 45** Warum ist der Typ  $(a \rightarrow b) \rightarrow c$  nicht identisch zum Typ  $a \rightarrow b \rightarrow c$ ? Welcher andere Typ ist identisch zu letzterem?

**Test 46** Mit welchen Konzepten gehen die Linksassoziativität der Funktionsapplikation und die Rechtsassoziativität des Typkonstruktors ( $\rightarrow$ ) gut Hand in Hand?

**Test 47** Zu welchen partiell applizierten Funktionen verhalten sich folgenden Funktionen identisch?

- `succ :: Int → Int` (die Inkrementfunktion)
- `pred :: Int → Int` (die Dekrementfunktion)
- `length :: [a] → Int`
- `sum :: [Int] → Int`
- `product :: [Int] → Int`

**Test 48** Was ist partielle Applikation?

---

<sup>7</sup>Rebalancierung eines AVL-Baum

**Test 49** Was ist Currying?

**Test 50** Welche Funktionen höherer Ordnung hast du kennengelernt im Kontext der generischen Programmierung? Was ist das Ziel dieser Funktionen?

**Test 51** Die Funktionen `map :: (a → b) → [a] → [b]` und `filter :: (a → Bool) → [a] → [a]` lassen sich alle mithilfe `foldr :: (a → r → r) → r → [a] → r` ausdrücken. Wie lauten diese Definitionen?

**Test 52** Gegeben seien folgende Funktionen:

- `rgbToHsv :: RGB → HSV`, die eine Farbe von einer Darstellung in einen anderen konvertiert, und
- `hue :: HSV → Float`, die den Farbwert einer Farbe im Wertebereich  $[0^\circ, 360^\circ)$  im HSV-Farbraum zurückgibt.

Du bekommst als Eingabe ein Bild, das hier als Liste von `RGB`-Werten dargestellt ist. Jeder `RGB`-Wert korrespondiert zu einem Pixel. Schreibe eine Funktion, die berechnet, wie viele blaue Pixel das Bild hat. Hier bezeichne eine Farbe als blau, wenn ihr Farbwert zwischen  $200^\circ$  und  $250^\circ$  (inklusive) liegt. Nutze für die Definition der Funktion sowohl `map` als auch `filter`.

**Test 53** Was sind sections im Kontext von Funktionen höherer Ordnung?

**Test 54** Welche der Faltungsfunktion auf Listen ergibt sich aus dem Verfahren zur Erzeugung von Faltungsfunktionen, das du für beliebige Datentypen kennengelernt hast?

**Test 55** Was ist der Unterschied zwischen `foldl` und `foldr`? Wann liefern `foldl` und `foldr` das gleiche Ergebnis?

**Test 56** Wie gewinnen wir aus `foldr` die Identitätsfunktion auf Listen? In den Übungen hast du gelernt, wie man Werte anderer Typen falten kann. Wie gewinnt man aus diesen Funktionen die Identitätsfunktionen auf den jeweiligen Typen?

**Test 57** Gegeben sind folgende Datentypen

- `data Tree a = Empty | Leaf a | Branch (Tree a) (Tree a)`,
- `data Rose a = Node [Rose a]`.

Welche Typen haben die jeweiligen Datenkonstruktor und wie führen wir diese in die Signatur der jeweiligen Faltungsfunktion über? Wo benötigen wir rekursive Aufrufe der jeweiligen Faltungsfunktionen?

**Test 58** Betrachte die Funktion

```
f :: [a] → b
f []      = e
f (x:xs) = g x (f xs)
```

Nach diesem induktiven Muster sind viele Funktionen auf Listen implementiert. Nehme als Beispiel die Funktion `sum :: [Int] → Int`.

```
sum :: [Int] → Int
sum []      = 0
sum (x:xs) = x + sum xs
```

Dieses Muster haben wir in `foldr` abstrahiert. Wo wandern die jeweiligen Bestandteile der abstrakten Funktion `f` hin, wenn wir `f` mithilfe von `foldr` definieren. Was passiert insbesondere mit dem rekursiven Aufruf von `f`?

**Test 59** Wie kannst du mithilfe von Faltung viele Elemente in einen Suchbaum einfügen oder lösen? Implementiere



- `insertMany :: [Int] → SearchTree Int → SearchTree Int` und
- `deleteMany :: [Int] → SearchTree Int → SearchTree Int`.

Du kannst davon ausgehen, dass du die Einfüge- und Löschfunktion für einzelne Elemente bereits hast.

**Test 60** Wir können `map :: (a → b) → [a] → [b]` mithilfe von `foldr` wie folgt implementieren:

```
map f xs = foldr (\x ys → f x : ys) [] xs
```

Vereinfache den Lambda-Ausdruck mithilfe von Funktionen höherer Ordnung.

**Test 61** Wenn wir die Listenkonstruktoren in `foldr` einsetzen, erhalten wir die Identitätsfunktion auf Listen, also

```
foldr (:) [] :: [a] → [a].
```

Wenn wir das Gleiche mit `foldl` und angepassten `(:)` machen, also

```
foldl (flip (:)) [] :: [a] → [a],
```

dann erhalten wir nicht die Identitätsfunktion auf Listen. Warum und was bekommen wir stattdessen heraus?

**Test 62** Es gibt viele andere hilfreiche Funktionen höherer Ordnung in der Haskell Prelude. Eine von diesen ist `zipWith :: (a → b → c) → [a] → [b] → [c]`. Sie verknüpft jeweils zwei Elemente aus den jeweiligen Listen unter der gegebenen Funktion.

- Implementiere `zipWith` mithilfe von `map`, `uncurry`, `zip`.
- Implementiere `zip` mithilfe von `zipWith`.
- Implementiere das Prädikat `isSorted` mithilfe von `zipWith`.

**Test 63** Das Pendant zum Falten ist das Biegen mit `foldr` ist `unfoldr` (aus `Data.List`).

Anstatt eine Liste von Werten zu falten, können wir mit `unfoldr` aus einem Wert eine Liste erzeugen. Die Funktion hat den Typ `(b → Maybe (a, b)) → b → [a]`.

- Überlege dir anhand des Typs, wie diese Funktion implementiert sein könnte. Implementiere sie anschließend.
- Können wir `foldr (+) 0 [3, 1, 4, 1, 5]` mit `unfoldr` rückgängig machen? Das heißt, können wir die Eingabeliste rekonstruieren, ohne Annahmen darüber zu machen, wie die Eingabeliste entstanden ist?
- Berechne die Binärdarstellung einer natürlichen Zahl mithilfe von `unfoldr`. (Das LSB soll an erster Stelle der Ausgabeliste stehen.) Implementiere dies als Funktion `bits :: Int → [Int]`.
- Implementiere `map` mithilfe von `unfoldr`.

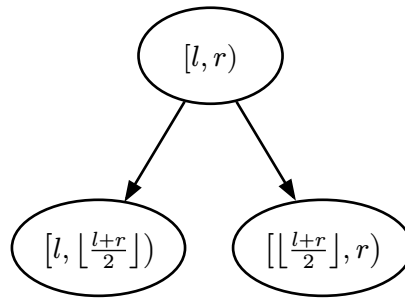
**Test 64** In diesem Test wollen wir einen beliebigen Wert zu einem Baum entfalten.

Implementiere eine Funktion `unfoldTree :: (b → Maybe (b, a, b)) → b → Tree a`, die eine Funktion nimmt, die ein Wert vom Typ `b` nimmt und in eine Knotenbeschriftung und zwei weitere Werte vom Typ `b` aufspaltet, oder das Entfalten stoppt, indem ein `Nothing` zurückgegeben wird. Bäume sind durch den Datentyp

```
data Tree a = Empty | Node (Tree a) a (Tree a)
```

definiert.

Nutze die definierte Funktion, um einen Binärbaum zu erzeugen, welche die Zerlegungen eines diskreten Intervalls darstellen soll. Entnehme die Art der Zerlegung dem Diagramm.



**Challenge 7** Gegeben sei die Faltungsfunktion

`foldTree :: (r → a → r → r) → r → Tree a → r` für einen knotenbeschrifteten Binärbaum gegeben durch `data Tree a = Empty | Node (Tree a) a (Tree a)`.

Eine Reihe von Funktionen, die du bereits für Listen kennengelernt hast, lassen sich auch auf Bäume übertragen.<sup>8</sup> Implementiere die Funktionen

- `any :: (a → Bool) → Tree a → Bool` und `and :: (a → Bool) → Tree a → Bool`,
- `elem :: Int → Tree Int → Bool` und `notElem :: Int → Tree Int → Bool`,
- `toList :: Tree a → Bool`,
- `null :: Tree a → Bool` (überprüft, ob der Baum leer ist),
- `length :: Tree a → Int`,
- `maximum :: Tree Int → Int` und `minimum :: Tree Int → Int`, und
- `sum :: Tree Int → Int` und `product :: Tree Int → Int`.

**Test 65** Gegeben seien die Funktion

`f :: a → b`  
`g :: a → b → c`

sowie die Kompositionsfunktion `(.) :: (b → c) → (a → b) → a → c`.

In der Typdefinition von `(.)` scheint das erste Argument, eine einstellige Funktion zu sein. Ist der Ausdruck

`g . f`

trotzdem typkorrekt, obwohl `g` eine zweistellige Funktion ist? Wenn ja, wie werden die Typvariablen – insbesondere das `c` der Komposition – unifiziert?

**Test 66** Gegeben sei der Datentyp `data Tree a = Empty | Node (Tree a) a (Tree a)` und die Faltungsfunktion `foldTree :: r → (r → a → r → r) → Tree a → r`.

Vergewissere dich, dass die Implementierung der folgenden Funktion, die alle Beschriftungen durch den gleichen Wert ersetzt, korrekt ist.

`replace :: b → Tree a → Tree b`  
`replace x = foldTree Empty (const . flip Node x)`

Zeige, dass `const . flip Node x = \l y r → Node l x r` ist.

**Test 67** Welche Funktion verbirgt sich hinter `foldr ((++) . f) []` und was ist ihr Typ?

**Test 68** Versuche in den folgenden Ausdrücken, Teilausdrücke schrittweise durch bekannte Funktionen zu ersetzen oder gegebenenfalls zu vereinfachen.

- `foldr (\x ys → f x : ys) [] (foldr (\x ys → g x : ys) [] xs)`,

<sup>8</sup>Diese Funktionen lassen sich auf alle faltbaren Datentypen verallgemeinern. Für Interessierte: Dies wird mithilfe der Typklasse `Foldable` festgehalten – diese Typklasse behandeln wir aber in der Vorlesung voraussichtlich nicht.

- `map (\_ → y) xs`,
- `foldr (\x ys → if x `mod` 2 == 1 then x - 1 : ys else ys) [] xs`,
- `foldl (\ys x → x : ys) [] xs` und
- `flip (curry snd) x`.<sup>9</sup>

**Challenge 8** Sei  $m, n \in \mathbb{N}$ . Gegeben seien

- die Identitätsfunktion auf  $\{0, \dots, n-1\}$  mit  $\pi_0 : \{0, \dots, n-1\} \rightarrow \{0, \dots, n-1\}, x \mapsto x$  und
- eine endliche Folge von Paaren  $((a_i, b_i))_{i \in \{1, \dots, m\}}$  mit  $a_i \in \{0, \dots, n-1\}, b_i \in \{0, \dots, n-1\}$  für alle  $i \in \{1, \dots, m\}$ .

Wir definieren  $\pi_{i,j}$  als

$$\pi_{i,j}(k) = \begin{cases} i & \text{falls } k = j \\ j & \text{falls } k = i \\ k & \text{sonst} \end{cases}$$

für alle  $k \in \{0, \dots, n-1\}$ .

Wir betrachten die Paare als Vertauschungen der Bilder der Abbildung  $\pi_0$ , d.h.,

$$\pi_i = \pi_{a_i, b_i} \circ \pi_{i-1} \text{ für } i \in \{1, \dots, m\}.$$

- Implementiere eine Funktion `swaps :: Int → [(Int, Int)] → [Int]`, die  $\pi_m$  mithilfe von Listen berechnet. Der erste Parameter bestimmt die Menge  $\{0, \dots, n-1\}$  und der zweite die Folge.
- Implementiere eine Funktion `swaps :: Int → [(Int, Int)] → Int → Int`, die  $\pi_m$  mithilfe von Funktion berechnet. (Hier ist der erste Parameter unter Umständen redundant.)
- Welche Vor- und Nachteile haben die jeweiligen Ansätze im Vergleich?

**Test 69** Eta-reduziere die folgende Ausdrücke:

- `sum xs = foldr (+) 0 xs`,
- `add a b = a + b` und
- `\x ys → (:) x ys`.

**Test 70** Implementiere die Funktion `insert :: Int → a → Map Int a → Map Int a`, die ein Schlüssel-Wert-Paar in eine `Map Int a` einfügt. Die `Map` ist wie folgt repräsentiert

```
type Map k v = k → v.
```

**Test 71** Wir haben `foldr :: (a → b → b) → b → [a] → b` als natürliche Faltungsfunktion kennengelernt, die einen Ausdruck erzeugt, der rechts geklammert ist. Zum Beispiel gilt

$$\text{foldr } (+) \ 0 \ [1, 2, 3] = 1 + (2 + (3 + 0)).$$

Das gleiche Ziel können wir mit anderen Typen verfolgen. Implementiere eine Funktion `foldr :: (a → b → b) → b → Tree a → b` für einen blattbeschrifteten Binärbaum

```
data Tree a = Leaf a | Tree a :+: Tree a
```

die den gleichen Ausdruck erzeugt. Zum Beispiel soll

$$\text{foldr } (+) \ 0 \ ((\text{Leaf } 1 :+: \text{Leaf } 2) :+: \text{Leaf } 3) = 1 + (2 + (3 + 0))$$

gelten.

---

<sup>9</sup> „Your scientists were so preoccupied with whether or not they could, that they didn't stop to think if they should.“  
Jenseits solcher kleinen Verständnisfragen gilt weiterhin, dass wir verständlichen Code schreiben wollen. Solche Ausdrücke sind häufig schwieriger zu verstehen – auch wenn es unterhaltsam ist, sich solche Ausdrücke auszudenken.

**Test 72** Gegeben sei folgendes Python-Programm.

```
from dataclasses import dataclass
from typing import Generic, TypeVar

class Foldable():
    def foldr(self, f):
        pass

    def sum(self):
        return self.foldr(lambda x: lambda ys: x + ys)(0)

    def toList(self):
        return self.foldr(lambda x: lambda ys: [x] + ys)([])

    def __len__(self):
        return self.foldr(lambda _: lambda s: 1 + s)(0)

    def __contains__(self, y):
        return self.foldr(lambda x: lambda z: z or x == y)(False)

    # ...

T = TypeVar('T')

class Tree(Generic[T], Foldable):
    def foldr(self, f):
        def foldr_with_f(e):
            match self:
                case Empty():
                    return e
                case Node(l, x, r):
                    y = f(x)(r.foldr(f)(e))
                    z = l.foldr(f)(y)
                    return y
            return foldr_with_f

@dataclass
class Empty(Tree[T]):
    pass

@dataclass
class Node(Tree[T]):
    left: Tree[T]
    value: T
    right: Tree[T]

tree = Node(Empty(), 3, Node(Node(Empty(), 7, Empty()), 4, Empty()))
print(tree.sum()) # 14
print(tree.toList()) # [3, 7, 4]
print(len(tree)) # 3
print(3 in tree, 9 in tree) # True False
```

In diesem Programm werden viele Konzepte verwendet, die du im Haskell-Kontext kennengelernt hast – aber wahrscheinlich bisher nicht in Python gesehen hast. In diesem Test geht es darum, diese Konzepte im Python-Programm zu identifizieren.

Wo findest du

- Funktionen höherer Ordnung,
- pattern matching,
- algebraische Datentypen (Typkonstruktoren, Datenkonstruktoren),
- parametrischen Polymorphismus<sup>10</sup>,
- ad-hoc Polymorphismus (Typklassen bzw. Überladung) und
- lokale Definitionen.

Data classes und match statements brauchst du dir jenseits dieses Tests nicht anschauen (wenn es dich nicht weiter interessiert). Es soll in dem Test nur darum gehen, die Haskell-Konzepte zu erkennen. In [Bemerkung 2](#) kannst du das gleiche Programm in Java sehen.

**Test 73** In das folgende Python-Programm hat sich ein bug hineingeschlichen.

```
text = 'Ja, ja, ich back mir \'nen Kakao!'
say_words = []

for word in text.split():
    say_words.append(lambda sep: print(word, end=sep))

for say_word in say_words[:-1]:
    say_word(' ')
say_words[-1]('\n')
```

Dieses Programm gibt sieben Mal „Kakao!“ aus. Erkläre wie dieses Verhalten zustande kommt? Wie kannst du den bug beheben? Kann der gleiche Fehler in Haskell passieren?

**Test 74** Was ist ein abstrakter Datentyp? Was sind die Bestandteile eines abstrakten Datentyps?

**Test 75** Wie definieren wir die Semantik der zu einem abstrakten Datentyp gehörenden Operationen? Wie definieren wir sie insbesondere nicht?

**Test 76** Wieso ist das sofortige Nutzen einer Gleichheit auf einem abstrakten Datentypen problematisch? Was sollte man stattdessen tun?

**Test 77** Zur Spezifikation der Semantik nutzen wir Gesetze, die bestimmen, wie verschiedene Operationen miteinander interagieren. Dafür benötigen wir verschiedene Werte oftmals unterschiedlicher Datentypen. Wo kommen diese her und wie sind sie quantifiziert?

**Test 78** Welche Eigenschaften sollten die für einen abstrakten Datentypen formulierten Gesetze erfüllen, damit sie eine sinnvolle Semantik beschreiben?

**Challenge 9** Gebe folgende abstrakte Datentypen an: Paar, Menge, stack, queue, double-ended queue, knotenbeschrifteter Binärbaum, priority queue.

Anschließend kannst du diese auch (naiv) implementieren und deine Implementierung testen, indem du deine formulierten Gesetze mit QuickCheck implementierst.

**Test 79** Als Teil eines ADTs für Arrays soll eine Operation `reverse :: Array a → Array a` spezifiziert werden, die ein Array umdreht. Ihr Verhalten soll unter anderem durch das folgende Gesetz festgehalten sein:

$$\text{reverse (reverse a)} == a \quad \text{für alle Arrays } a$$

Warum ist dieses Gesetz problematisch? Wie können wir das Problem beseitigen?

---

<sup>10</sup>Typannotationen in Python sind nicht sonderlich elegant. Deshalb sind nur die angegeben, um den parametrischen Polymorphismus zu identifizieren und data classes anständig zu nutzen.

**Test 80** Als Teil eines ADTs für Array soll eine Operation `at :: Array a → Int → a` spezifiziert werden, die das Element an einer Position in einem Array zurückgibt. Weiter soll `update :: Int → a → Array a → Array a` einen Wert an eine Position in ein Array schreiben.

Wie können wir spezifizieren, dass durch ein `update` nur das Element an der gegebenen Position verändert wird?

**Test 81** Eine Teilmenge der Operationen für eine Menge sind

- `insert :: a → Set a → Set a` zum Einfügen von einem Wert in eine Menge und
- `size :: Set a → Int` zum Bestimmen der Kardinalität einer Menge.

Gegeben ist folgendes Gesetz:

$$\text{size (insert y (insert x s))} == \text{size s} + 2 \quad \text{für alle Werte x, y, alle Mengen s.}$$

Das Gesetz ist falsch. Warum und wie können es korrigieren?

**Test 82** In ADT-Gesetzen sind Variablen allquantifiziert. Wie können wir gewährleisten, dass ein Wert bestimmte Bedingungen erfüllt, bevor wir ein entsprechendes Gesetz für solche Werte definieren?

**Test 83** Warum benötigen wir Konstruktoren als Teil eines ADTs?

**Test 84** Was sind Typklassen?

**Test 85** Wie unterscheidet sich der Polymorphismus, der durch Typklassen ermöglicht wird, vom parametrischen Polymorphismus?

**Test 86** In einem vorherigen Test wurdest du bereits gefragt, wieso `show` nicht als Funktion mit dem Typ `a → String` implementiert sein. Wieso wird die Funktion durch den Typ `Show a ⇒ a → String` gerettet?

**Test 87** Welche Typklassen kennst du? Was ermöglichen sie konkret?

**Test 88** Eine `Show`-Instanz für den Typ `Tree a = Leaf a | Tree a :+: Tree a` könnte wie folgt aussehen:

```
instance Show a ⇒ Show (Tree a) where
  show (Leaf x) = "Leaf " ++ show x
  show (l :+: r) = "(" ++ show l ++ " " ++ show r ++ ")"
```

Welche Werte vom Typ `Tree a` führen zur worst-case Laufzeit und welche zur best-case Laufzeit? Die Anzahl der Blätter soll hier frei sein. Welche Eigenschaften von `(++)` führen zu den jeweiligen Laufzeiten?

**Test 89** Überlade die Operationen `(+)`, `(-)`, `(*)`, `abs`, `signum`, `fromInteger` für den Datentypen `data Mat22 a = Mat22 a a a a`, der  $(2 \times 2)$ -Matrizen repräsentieren soll – `abs`, `signum`, `fromInteger` kannst du z.B. komponentenweise implementieren.<sup>11</sup>

**Test 90** Mit

$$\begin{pmatrix} f_{n+1} & f_n \\ f_n & f_{n-1} \end{pmatrix}^n = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^n$$

und der binären Exponentiation und `Mat22 Integer` aus einem vorherigen Tests kannst du die  $n$ -te Fibonacci-Zahl in logarithmischer Laufzeit in  $n$  berechnen. Implementiere das Verfahren.

<sup>11</sup>Oft sind an Funktionen von Typklassen Bedingungen bzw. Gesetze, die erfüllt werden sollen, gekoppelt. Das für `abs` und `signum` wird durch den Vorschlag nicht erfüllt.

Da du eine `Num`-Instanz auf `Mat22` definiert hast, kannst du den `(^)`-Operator zum binären Exponentiation nutzen.

**Challenge 10** In dieser Challenge sollst du automatisches Differenzieren im Rückwärtsmodus mithilfe von (Operator-)Überladung implementieren. Dieser Ansatz des Differenzierens führt dabei das Differenzieren komplizierter Funktionen auf einfache, elementare Funktionen zurück.

Wir verwenden folgenden Datentyp: `data D a = D a a`. Ein Wert vom Typ `D a` enthält einen Funktionswert und seine Ableitung.

Der Kern der Idee ist, Funktionen so zu überladen, dass sie auf `D a`-Werte angewendet werden können. Angenommen, es sei eine Funktion `f` und ihre Ableitungsfunktion `f'` gegeben. Dann soll ein überladenes `f` wie folgt funktionieren

```
f :: D a -> D a
f (D gx dgdx) = D (f gx) (dgdx * f' gx)
```

Der Wert `gx` ist das Ergebnis einer inneren Funktion `g`, und `dgdx` entspricht deren Ableitung `g'` an der Stelle `x` (bzw.  $\frac{dg}{dx}(x)$ ). Die Kettenregel führt dann zu  $(f \circ g)' x = g' x * f' x$ . Nach dem Muster kannst du nun Standardfunktionen überladen. Für die arithmetischen Operatoren benötigst du an der Stelle deren Ableitungsregeln (Summenregel, Leibnizregel, usw.)

Implementiere die Typklasseninstanzen `Num`, `Fractional` und `Floating`.<sup>12</sup>

Mit den folgenden Funktionen kannst du dann die erste, zweite oder dritte Ableitung bilden.<sup>13</sup>

```
d1 :: Num a => (D a -> D b) -> a -> b
d1 f x = let (D _ d) = f (D x 1) in d

d2 :: Num a => (D (D a) -> D (D b)) -> a -> b
d2 f x = let (D (D _ _) (D _ d)) = f (D (D x 1) 1) in d

d3 :: Num a => (D (D (D a)) -> D (D (D b))) -> a -> b
d3 f x = let (D _ (D _ (D _ d))) = f (D (D (D x 1) 1) 1) in d
```

An vielen Stellen in den bisherigen Selbsttests haben wir oft einen konkreten Typ (z.B. `Int`) genutzt, für den es bestimmte Typklasseninstanzen gibt. Das ist meistens der Fall gewesen, wenn wir Gleichheit auf Werten oder eine Vergleichsoperation auf Werten brauchten. Schau dir die bisherigen Selbsttests erneut an und überlege dir, wo du Typen verallgemeinern kannst.

**Test 91** Welche Funktionen musst du implementieren, damit eine `Eq`-Instanz vollständig definiert ist? Welche Gesetze sollten die Funktionen einer `Eq`-Instanz erfüllen?

**Test 92** Gegeben sei der Typ

```
data Tree a b c = Empty | Leaf a | Node (Tree a b c) Int c (Tree a b c).
```

Implementiere eine `Eq`-Instanz für diesen Typen. Die Gleichheit soll sich so verhalten, wie die die wir durch das Ableiten bekommen würden. Bevor du die Instanz implementierst, überlege dir:

- Wie viele Regeln brauchst du mindestens, um `(==)` zu definieren?
- Benötigst du für die Implementierung Typeinschränkungen? Wenn ja, für welche Typen?
- An welchen Stellen wirst du `(==)` rekursiv anwenden?
- Die Datenkonstruktoren sind auf den rechten Seiten der Regeln nicht relevant. Auf welchen Typen kannst du die Gleichheit für z.B. `Node` zurückführen, bzw. wenn du dir die rechte Seite

<sup>12</sup>Zusammenfassung der Ableitungsregeln

<sup>13</sup>Für Interessierte: In [Bemerkung 1](#) kannst du eine allgemeinere Funktion zum Berechnen der Ableitung sehen.

der Regel für **Node** anschaut, welche Typen fallen dir ein, für die diese rechte Seite auch eine Gleichheit definieren würde?

**Test 93** Welche Funktionen musst du implementieren, damit eine **Ord**-Instanz vollständig definiert ist? Welche Gesetze sollten die Funktionen einer **Ord**-Instanz erfüllen?

**Test 94** Gegeben sei der Typ

```
data Tree a b c = Empty | Leaf a | Node (Tree a b c) Int c (Tree a b c).
```

Implementiere eine **Ord**-Instanz für diesen Typen. Die Ordnung soll sich so verhalten, wie die die wir durch das Ableiten bekommen würden. Bevor du die Instanz implementierst, überlege dir:

- Spielt die Reihenfolge, in der wir die Datenkonstruktoren definieren eine Rolle für die Ordnung? Wenn ja, wie?
- Wie viele Regeln brauchst du mindestens, um **compare** zu definieren? Wie auch bei der Typklasse **Eq** können wir eine Regel definieren, die alle Fälle abdeckt, in denen wir **GT** erhalten, wenn wir uns nur die Datenkonstruktoren anschauen. Welches Schema müssen wir für die anderen Regeln verwenden, damit das funktioniert?
- Benötigst du für die Implementierung Typeinschränkungen? Wenn ja, für welche Typen?
- An welchen Stellen wirst du **compare** rekursiv anwenden?
- Die Datenkonstruktoren sind auf den rechten Seiten der Regeln nicht relevant. Auf welchen Typen kannst du die Ordnung für z.B. **Node** zurückführen, bzw. wenn du dir die rechte Seite der Regel für **Node** anschaut, welche Typen fallen dir ein, für die diese rechte Seite auch eine Ordnung definieren würde?

Implementiere die Ordnung auch erneut mit **(≤)**.

**Test 95** Die Typklasse **Ord** ist wie folgt definiert:

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

  -- default definitions
  -- ...

  {-# MINIMAL compare | (≤) #-}
```

Das `{-# MINIMAL compare | (≤) #-}` bedeutet, dass es genügt, entweder **compare** oder **(≤)** zu implementieren.

- Gebe Standarddefinitionen für die Funktionen der Typklasse an.
- Was ermöglicht es, eine Standarddefinition für **compare** angeben zu können?
- Deine Standarddefinition von **compare** ist voraussichtlich ineffizient.<sup>14</sup> Woran liegt das? Mit Hinsicht auf Effizienz – welche der beiden Funktionen würdest du implementieren, wenn du nur eine implementieren dürftest?<sup>15</sup>

**Test 96** In nicht streng getypten Programmiersprachen haben wir oft mit impliziter Typkonversion zu tun.<sup>16</sup> Implementiere eine Funktion **ifThenElse**, die als Bedingung Werte

<sup>14</sup>Die Vordefinierte ist es auch, also keine Sorge.

<sup>15</sup>Auch wenn Standarddefinitionen für den Anfang hilfreich sind, um mit minimalem Aufwand alle Funktionen einer Typklasse zu verwenden, findet man häufig konkrete Implementierungen für mehr als nur die Funktionen, für die es notwendig ist.

<sup>16</sup>Diese wollen wir nun für einen Moment nach Haskell zurückholen, um sie dann ganz schnell wieder zu vergessen.



beliebiger Typen entgegennehmen kann. Ziel ist es, dass der folgende Ausdruck ausgewertet werden kann.

```
let a = ifThenElse 0 3 4
    b = ifThenElse [5] 6 7
    c = ifThenElse Nothing 8 9
in a + b + c -- 19
```

**Test 97** Eine Halbgruppe ist eine Struktur  $(H, *)$ , wobei  $*$  eine assoziative, binäre Verknüpfung  $* : H \times H \rightarrow H$  ist. Ein Monoid erweitert die Halbgruppe um ein neutrales Element bzgl.  $*$ .

Definiere Typklassen **Semigroup** und **Monoid**, die diese Strukturen implementieren. Gebe auch beispielhaft ein paar Instanzen für diese an.

**Test 98** Wo findest du das Konzept der Typklassen in Programmiersprachen wie z.B. Python oder Java wieder? Gibt es z.B. ein Pendant zur **Show**-Typklasse in diesen Programmiersprachen?

**Test 99** Was ist Lazy Evaluation?

**Test 100** Wie werden Berechnungen in Haskell angestoßen? Wie viel wird berechnet?

**Test 101** Gebe ein Beispiel an, das zeigt, dass die faule Auswertung berechnungsstärker ist.

**Test 102** Welche praktischen Vorteile ergeben sich aus der Lazy Evaluation?

**Test 103** Wie werden mehrfache Berechnungen in einer nicht-strikten Auswertungsstrategie vermieden?

**Test 104** Gegeben sei folgendes Haskell-Ausdruck.

```
let c = x == 0
    a = u `div` x
    b = 0
in if c then b else a
```

Der Teilausdruck `a = u `div` x` erscheint auf dem ersten Blick problematisch, da `x` Null sein könnte. Wieso stellt das mit Lazy Evaluation kein Problem dar?

**Test 105** Eine zyklische einfach-verkettete Liste können wir in Python z.B. so definieren.

```
class Node:
    def __init__(self, value):
        self.value = value
        self.next = None
```

```
one, two = Node(1), Node(2)
one.next, two.next = two, one
```

Wenn wir mit `one` starten, dann korrespondiert diese verkettete Liste mit der unendlichen Liste `[1, 2, 1, 2, ...]`.

Die Mutierbarkeit des `next`-Zeigers macht das Verlinken der Knoten in Python möglich. Wie können wir in Haskell, trotz der Abwesenheit von Mutierbarkeit, zyklische Datenstrukturen umsetzen? Versuche, dein Programm ähnlich zum Python-Programm aussehen zu lassen.<sup>17</sup>

**Challenge 11** Gegeben sei der Datentyp

```
data Tree a = Empty | Node (Tree a) a (Tree a).
```

---

<sup>17</sup>Für Interessierte: Die Technik ist als Tying the Knot bekannt.

- Implementiere eine Funktion `preorder :: Tree a → [a]`, die Knotenwerte in pre-order zurückgibt. Das heißt, zuerst wird ein Knoten betrachtet und anschließend dessen linker und danach dessen rechter Teilbaum.
- Implementiere einen unendlichen Baum `tree :: Tree Int`, der die Menge  $\{f(i, j) \mid i, j \in \mathbb{N}, i \leq j\}$  mit  $f(i, j) = i + j + 2ij$  darstellt. Die Wurzel soll den Wert  $f(1, 1)$  haben. Für einen beliebigen Knoten mit Beschriftung  $f(i, j)$  soll die Wurzel des linken Teilbaums mit  $f(i + 1, j)$  beschriftet sein und die Wurzel des rechten Teilbaums mit  $f(i, j + 1)$ . Falls  $i > j$  erreicht wird, soll in den Baum ein `Empty`-Knoten gesetzt werden.
- Wende `preorder` auf `tree` an. Welches Problem haben wir hinsichtlich der Werte, die wir den jeweiligen Teilbäumen von `tree` sehen und der Ergebnisliste von `preorder`? Wie hängt deine Beobachtung mit `[f i j | i <- [1..], j <- [i..]]` zusammen?
- Implementiere eine Abwandlung von `preorder`, die statt `(++)` die Funktion `merge` verwendet.
- Implementiere als Nächstes die Mengendifferenz als Funktion `diff :: Ord a ⇒ [a] → [a] → [a]`. Du darfst dabei annehmen, dass die Eingabelisten bereits sortiert sind.
- Was berechnet `2 : map (\x → 2 * x + 1) ([1..] `diff` preorder tree)?`<sup>18</sup>

**Test 106** Gegeben sei der Datentyp

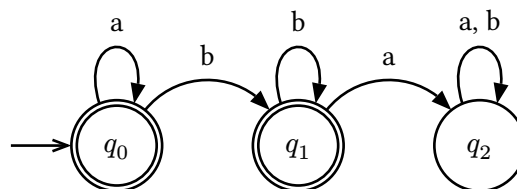
```
data Doubly a = Null | Node (Doubly a) a (Doubly a).
```

- Implementiere eine Funktion `fromList :: [a] → Doubly a`, die die gegebene Liste in eine doppelt-verkettete Liste umwandelt. `Null` soll sowohl das linke als auch das rechte Ende der Liste darstellen. Von diesem muss es nicht möglich sein, zum anderseitig verketteten Element zurückzukommen. `fromList` soll den Knoten zurückgeben, der mit dem ersten Listenelement korrespondiert.
- Weiter implementiere auch `prev :: Doubly a → Doubly a`, `value :: Doubly a → Maybe a` und `next :: Doubly a → Doubly a`, die den vorherigen Knoten, die Beschriftung eines Knoten, und den nächsten Knoten zurückgeben sollen.
- Angenommen du möchtest einen weiteren Wert in die doppelt-verkettete Liste einfügen, auf welches Problem stoßt du hinsichtlich Mutierbarkeit?

Der Wert des folgenden Ausdrucks soll **8** sein.

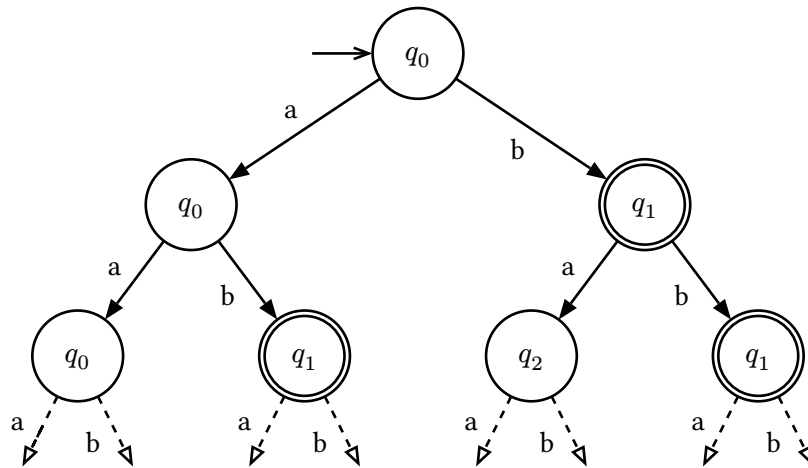
```
let xs = fromList [1, 6, 1, 8, 0, 3]
in value . prev . next . next . next $ xs
```

**Challenge 12** Wir können endliche Automaten als unendliche Bäume darstellen. Betrachte z.B. den endlichen Automaten für die reguläre Sprache  $a^*b^*$ .



Diesen können wir als unendlichen Baum wie folgt darstellen.

<sup>18</sup>Das Verfahren ist als [Sieb von Sundaram](#) bekannt. Die Konstruktion der oben angegebenen Menge mithilfe von unendlichen Bäumen ist nicht Teil des Verfahrens – sondern Willkür des Verfassers.



- Konstruiere diesen Baum als `asbs :: State Char` mithilfe des Typs

```
data State a = State Bool [(a, State a)].
```

Der Boolean gibt an, ob der Zustand akzeptiert, und `[(a, State a)]` gibt die ausgehenden Transitionen an.

- Implementiere eine Funktion `accept :: Eq a => [a] -> State a -> Bool`, die bestimmt, ob eine Eingabe akzeptiert wird.
- Implementiere eine Funktion `language :: State a -> [[a]]`, die die akzeptierte Sprache des Automaten zurückgibt. (Du kannst davon ausgehen, dass die Sprache nicht leer ist – wenn du Entscheidungsproblem trotzdem lösen möchtest, halten wir dich nicht auf.)
- Warum funktioniert die folgende Implementierung der Funktion `language` nicht?

```
language :: State a -> [[a]]
language (State False ts) = [c:ws | (c, q) <- ts, ws <- language q]
language (State True ts)  = [] : [c:ws | (c, q) <- ts, ws <- language q]
```

**Test 107** Wieso können wir mit `foldl` auf unendlichen Listen mit keinem Ergebnis rechnen?

**Test 108** `scanl :: (b -> a -> b) -> b -> [a] -> [b]` und

`scanr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> [b]` sind ähnlich zu `foldl` und `foldr`. Beide Funktionen speichern die Zwischenergebnisse der jeweiligen Funktion in Listen.

```
scanl :: (b -> a -> b) -> b -> [a] -> [b]
scanl _ e []      = [e]
scanl f e (x:xs) = e : scanl f (f e x) xs
```

```
-- scanl (+) 0 [1..4] = [0, 1, 3, 6, 10]
```

```
scanr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> [b]
scanr _ e []      = [e]
scanr f e (x:xs) = f x y : ys
  where ys@(y:_) = scanr f e xs
```

```
-- scanr (+) (0) [1..4] = [10, 9, 7, 4, 0]
```

- Welche der beiden Funktionen kann auf unendlichen Listen arbeiten?
- (Implementiere die Fibonacci-Folge `fibs :: [Integer]` mithilfe von einer der beiden Funktionen.)

**Challenge 13** Fixpunktverfahren sind iterative Methoden, bei denen eine Funktion wiederholt auf einen Wert angewendet wird, bis sich ein stabiler Punkt (ein sogenannter Fixpunkt) ergibt, der sich durch weitere Anwendungen nicht mehr verändert.

Dieses Berechnungsmuster wird durch die Funktion `iterate :: (a → a) → a → [a]` in der Prelude festgehalten. Sie berechnet eine unendliche Liste, bestehend aus den Ergebnissen der wiederholten Anwendungen der übergebenen Funktion auf den gegebenen Wert. Das erste Ergebnis ist der gegebene Wert, auf den die Funktion noch nicht angewendet wurde.

- Implementiere `iterate`.
- Ein klassisches Beispiel für ein Fixpunktverfahren aus der Numerik ist die Berechnung der Wurzel mithilfe des Heron-Verfahrens. Es ist gegeben durch

$$x_{n+1} = \frac{1}{2} \left( x_n + \frac{a}{x_n} \right)$$

Diese Folge nähert den Wert von  $\sqrt{a}$  mit jedem Folgenglied besser an. Implementiere das Verfahren mithilfe von `iterate`. Wähle die erste Näherung  $x_{n+1}$ , die  $|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon$  erfüllt, für ein gegebenes  $\varepsilon > 0$ .

- Implementiere die Fibonacci-Folge als unendliche Liste `fibs :: [Integer]` mithilfe von `iterate`. Du brauchst eine Hilfsfunktion, die die Elemente der Ergebnisliste von `iterate` projiziert.
- Solange eine Liste Inversionen enthält, d.h., es existieren  $i, j$  mit  $i < j$ , sodass  $a_i > a_j$  gilt, gilt eine Liste als unsortiert. Das schrittweise Entfernen solcher Fehlstellungen führt zu einer sortierten Liste.
  - Implementiere eine Funktion `resolve :: Ord a ⇒ [a] → [a]`, die eine Fehlstellung findet und sie auflöst, indem sie die Elemente an den entsprechenden Positionen tauscht.
  - Implementiere das daraus resultierende Sortierverfahren mithilfe von `iterate`.
- Mithilfe des Differenzenquotienten kannst du die erste Ableitung approximieren (oder mit der Lösung von [Challenge 2](#) oder [Challenge 10](#)). Diese benötigt man unter anderem für das Gradientenverfahren. Eine vereinfachte Iterationsvorschrift des Verfahrens ist gegeben durch

$$x_{k+1} = x_k - 10^{-4} f'(x_k) \quad \text{für alle } k \in \mathbb{N}$$

und einem Startpunkt  $x_0 \in \mathbb{R}$ . Implementiere das Verfahren mithilfe von `iterate`. Wähle als Ergebnis die erste Näherung  $x_{n+1}$ , die  $|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon$  für ein festes  $\varepsilon > 0$  erfüllt (z. B.  $\varepsilon = 10^{-5}$ ).

**Challenge 14** Eine Editierdistanz zwischen zwei Wörtern  $u \in \Sigma^m, v \in \Sigma^n$  können wir mithilfe der folgenden Rekurrenz bestimmen:

$$\text{ed}(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{falls } (i, j) = (0, 0) \\ i & \text{falls } j = 0 \\ j & \text{falls } i = 0 \\ \text{ed}(i-1, j-1) & \text{falls } u_{i-1} = v_{j-1} \\ \min(\text{ed}(i-1, j-1), \text{ed}(i, j-1), \text{ed}(i-1, j)) + 1 & \text{sonst} \end{cases}$$

für alle  $0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n$ . Um  $\text{ed}(m, n)$  effizient auszurechnen, nutzt man dynamische Programmierung. Das heißt, wir merken uns die Zwischenergebnisse und nutzen diese, wenn wir sie erneut brauchen, anstatt sie neu zu berechnen und ohne die Optimalität des Ergebnisses zu gefährden.

In Haskell können wir memoization mithilfe von Lazy Evaluation umsetzen. Hier ist ein unvollständiges Haskell-Programm, dass die Editierdistanz berechnen soll.

```
editdist :: Eq a => [a] -> [a] -> Int
editdist u v = table !! m !! n
  where
    (m, n) = (length u, length v)
    table = [[ed i j | j <- [0..n]] | i <- [0..m]]
```

Die Berechnungen sind in `table` gespeichert.

- Definiere die Funktion `ed :: Int -> Int -> Int` lokal in `editdist`. `ed` soll hier die zwischengespeicherten Ergebnisse aus `table` verwenden und dadurch die Berechnungen anstoßen.
- Überlege dir wie hier laziness und memoization zusammenspielen.
- Welche worst-case Laufzeit hat deine Lösung, wenn du annimmst, dass die Laufzeit von `(!!)` konstant ist?

**Challenge 15** Bevor du dich dieser Challenge stellst, bietet es sich an, sich [Challenge 14](#) anzunehmen, da in dieser der technische Teil der Lösungsidee vorgestellt wird.

Gegeben sei ein Gitter  $G \in \mathbb{Z}^{m \times n}$ . Ein Pfad durch das Gitter startet oben links und endet unten rechts. In jedem Schritt kannst du von einer Zelle in die rechtsanschließende oder darunteranschließende Zelle gehen. Die Pfadsumme ist die Summe aller Zellenwerte, durch die der Pfad führt.

Hier ist ein Beispiel für ein solches Gitter. Der Pfad der minimalen Pfadsumme ist durch die Pfeile angedeutet. Für dieses Beispiel ist die minimale Pfadsumme 6.

1	2	3	4
↓			
-8	→ 4	6	1
	↓		
5	2	→ 3	→ 4

Implementiere eine Funktion `pathsum :: (Num a, Ord a) => [[a]] -> a`, die die minimale Pfadsumme berechnet.

**Test 109** Gegeben sei der Datentyp

```
data Direction = North | East | South | West.
```

- Implementiere eine `Enum`-Instanz für `Direction`, die sich wie die vom GHC abgeleitete Instanz verhält.
- Implementiere eine `Bounded`-Instanz für `Direction`, die sich wie die vom GHC abgeleitete Instanz verhält.
- Implementiere die Funktionen `turnLeft :: Direction -> Direction` und `turnRight :: Direction -> Direction`, die die Himmelsrichtungen entsprechend ihrer Bezeichnung durchgehen.
- Implementiere eine Funktion `allDirections :: [Direction]`, die alle Himmelsrichtungen auflistet. Nutze dafür Funktionen, die dir durch die vorherigen Typklassen bereitgestellt werden.

**Test 110** Implementiere Funktion `cycleFrom :: (Enum a, Bounded a) => a -> [a]`, die ab einem gegebenen Wert alle Werte des Typen nicht absteigend durchläuft. Wenn der größte Wert erreicht ist, soll die Liste wieder beim kleinsten Wert des Typen beginnen.

**Test 111** An welches mathematische Konzept sind list comprehensions angelehnt?

**Test 112** Aus welchen Teilen besteht eine list comprehension?

**Test 113** Implementiere die Funktionen `map`, `filter` und `concatMap` mithilfe von list comprehensions.

**Test 114** Was ist referenzielle Transparenz?

**Test 115** Welche Rolle spielt der Typ `IO a` bzgl. Seiteneffekte? Was beschreibt ein Wert vom Typ `IO a`?

**Test 116** Wie können wir zwei `IO`-Aktionen zu einer neuen `IO`-Aktion kombinieren?

**Test 117** Betrachte die `IO`-Aktion `act1 >> act2`.

- Welche der beiden Aktionen wird zuerst ausgeführt?
- Warum erscheint das bei Lazy Evaluation kontraintuitiv?
- Welche Rolle spielt der Typ `RealWorld -> (RealWorld, a)` bei der Sequenzierung?

**Test 118** Implementiere ein Programm, das Zahlen aus einer Datei aufsummiert, bzw. implementiere eine Funktion `sumFile :: FilePath -> IO Int`. In jeder Zeile einer Datei steht eine nicht-negative Zahl.

**Test 119** Implementiere folgendes Rate-Spiel als `IO`-Programm. Es soll eine Zahl erraten werden.

- Du bekommst ein Orakel vom Typ `a -> Ordering`, das dir verrät, ob dein Rateversuch kleiner als, gleich oder größer als der Wert ist, den das Orakel festgelegt hat.
- In jeder Runde des Spiels ratest du eine Zahl.
- Wenn die Zahl kleiner als die unbekannte Zahl ist, dann soll der Hinweis „Die gesuchte Zahl ist kleiner.“ ausgegeben werden. Wenn die unbekannte Zahl größer ist, soll ebenso eine entsprechende Nachricht ausgegeben werden.
- Wenn die korrekte Zahl erraten wurde, bricht das Spiel ab.

Implementiere das Spiel als Funktion `game :: Read a => (a -> Ordering) -> IO ()`.

Du kannst das Spiel gerne ausschmücken und erweitern. Zum Beispiel kannst du die Anzahl der Rateversuche begrenzen oder eine weitere Zahl festlegen, die vorzeitig das Spiel beendet und das Orakel gewinnen lässt.

**Test 120** Wie lauten die `Functor`-Gesetze?

**Test 121** Die `Functor`-Typkonstruktorklasse ist wie folgt definiert.

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

Welchen kind hat `f`?

**Test 122** Wie sind die `Functor`-Instanzen für `Identity`, `Maybe`, `Either e`, `[]` und `((->) r)` definiert?

**Test 123** Wie lauten die `Applicative`-Gesetze?

**Test 124** Wie sind die `Applicative`-Instanzen für `Identity`, `Maybe`, `Either e`, `[]` und `((->) r)` definiert?

**Test 125** Wie lauten die **Monad**-Gesetze?

**Test 126** Wie sind die **Monad**-Instanzen für **Identity**, **Maybe**, **Either** `e`, `[]` und `((→) r)` definiert?

**Test 127** Die **Applicative**-Typkonstruktorklasse erlaubt es uns, `fmap` auf Funktionen mit mehreren Argumenten zu verallgemeinern. Dadurch können wir

`(+) <$> Just 1 <*> Just 2` oder `Just (+) <*> Just 1 <*> Just 2`

schreiben. Die Operatoren `(<$>)` und `(<*>)` funktionieren dabei ähnlich wie `(<$)` – mit `(<$>)` muss die Funktion nicht explizit in den entsprechenden **Applicative** gehoben werden.

Ein Typ, der uns konzeptionell noch näher an die gewöhnliche Funktionsapplikation heranführt, ist

```
newtype Identity a = Identity { runIdentity :: a }.
```

Implementiere **Functor**-, **Applicative**- und **Monad**-Instanzen für **Identity**.

Wenn du die Instanzen definierst, solltest du feststellen, dass du im Wesentlichen nur den enthaltenden Wert aus der **Identity** holst, verarbeitest und anschließend wieder hereinpäckst.

**Test 128** Um zu verifizieren, dass die **Functor**-Gesetze für z.B. den Typ **Maybe** `a` gelten, müssen wir

- das Identitätsgesetz `fmap id = id` und
- das Kompositionsgesetz `fmap f . fmap g = fmap (f . g)`

zeigen. Wie gehen wir konkret für den gegebenen Typ vor? Wie zeigen wir die Gleichheit von Funktionen? Wenn die Gesetze nun für den Listendatentypen `[a]` zeigen wollen, was ändert sich an deinem Vorgehen?

**Test 129** Warum gilt

`(1 +) <$> Just 1 == Just (1 +) <*> Just 1 == pure (1 +) <*> Just 1?`

Wie ergibt sich aus deinen Beobachtungen eine Definition für `fmap`? Wie können wir die Berechnung für beliebige applikative Funktoren verallgemeinern? Wie wird dann festgelegt, was während der Berechnung tatsächlich passiert?

**Test 130** Monaden sind ausdrucksstärker als applikative Funktoren, und applikative Funktoren sind ausdrucksstärker als Funktoren.

- Implementiere `fmap`, `pure` und `(<*>)` mithilfe von `return` und `(>=)`.
- Implementiere `fmap` mithilfe von `pure` und `(<*>)`.

**Test 131** Betrachten wir die Typen von `fmap` und `(>=)`, dann sehen wir gewisse Ähnlichkeiten.

```
fmap :: (a → b) → f a → f b
(>=) :: m a → (a → m b) → m b
```

Wie können wir bereits an den Typen sehen, dass `(>=)` die mächtigere Funktionen der beiden ist? Beziehe in deine Überlegungen ein, dass

`fmap f (Right x) = Left y`

nie gelten kann. Kann `fmap`, die Struktur in Abhängigkeit des Wertes vom Typ `a` verändern?

**Test 132** Gegeben sei diese fehlerhafte Definition einer sicheren Division:

```
safeDiv :: Int → Int → Maybe Int
safeDiv x y = pure (div x) <*> pure y
```

Wie können wir diese Implementierung reparieren, ohne (`>=>`) zu verwenden und die rechte Seite soweit wie möglich zu erhalten? Wie siehst du an diesem Beispiel, dass Monaden ausdrucksstärker als applikative Funktoren sind?

**Test 133** Monaden bieten uns die Möglichkeit, Berechnungen als Folge von kleineren Berechnungen zu sequenzieren. Je nachdem welche Monade wir betrachten, beobachten wir verschiedene Effekte.

- Welche Monade drückt eine Berechnung aus, die kein oder genau ein Ergebnis liefern kann?
- Welche Monade drückt eine Berechnung aus, die kein Ergebnis oder beliebig viele Ergebnisse liefern kann?
- Welche Monade drückt eine Berechnung aus, die entweder fehlschlägt oder erfolgreich ist? Welche kann im Fall eines Fehlschlag zusätzliche Information hervorbringen?

**Test 134** Wir nutzen Monaden zur Sequenzierung von Berechnungen. Identifiziere diese Sequenzierung in den folgenden **Monad**-Instanzen bzw. stelle fest, dass `m in m >=> k` zuerst berechnet wird, bevor die Berechnung mit `k` fortgesetzt wird.

```
instance Monad Maybe where
  return x = Just x

  Nothing >=> _ = Nothing
  Just x   >=> k = k x

instance Monad [] where
  return x = [x]

  []      >=> _ = []
  (x:xs) >=> k = k x ++ (xs >=> k)
```

**Test 135** Die **Reader**-Monade ermöglicht es, eine gemeinsame Umgebung mit vielen Berechnungen zu teilen.

```
newtype Reader r a = Reader { runReader :: r → a }

instance Monad (Reader r) where
  return y = Reader (\_ → y)

  r >=> k = Reader (\s → let x = runReader r s
                        y = runReader (k y) s
                        in y)
```

Woran kannst du erkennen, dass die Berechnung `r` vor dessen Weiterführung mit `k` und dem Ergebnis `r` stattfindet?

**Test 136** Das Pendant zur **Reader**-Monade aus Test 135 ist die **Writer**-Monade. Eine Spezialisierung der Monade soll hier die **ListWriter**-Monade sein. Diese Monade kann genutzt werden, um Zwischenergebnisse oder Logging-Informationen einer Berechnung zu speichern.

```
newtype ListWriter w a = ListWriter { runListWriter :: (a, [w]) }
```

Implementiere diese Monade. Mache dir insbesondere Gedanken darüber, wie du Berechnungen dieses Typens sequenzierst und wie du die Zwischenergebnisse von zwei Berechnungen kombinierst.



**Test 137** Argumentiere anhand der Gesetze, die für eine **Functor**-Instanzen gelten sollen, dass die folgenden **Functor**-Instanzen keine gültigen Instanzen sind. Gebe auch Beispiele an, die zeigen, dass die Gesetze nicht erfüllt sind.

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

data Tree a = Empty | Leaf a | Tree a :+: Tree a

instance Functor Tree where
  fmap _ Empty = Empty
  fmap f (Leaf _) = Leaf (f _)
  fmap f (l :+: r) = fmap f l :+: fmap f r
```

**Challenge 16** Gegeben sei der Datentyp

```
newtype ZipList a = ZipList { getZipList :: [a] }.19
```

Das Ziel ist es, **ZipList** als  $n$ -stellige Generalisierung von `zipWith` zu verwenden:

```
f <$> ZipList xs1 <*> ... <*> ZipList xsN
```

- Implementiere eine **Functor**-Instanz für **ZipList**.
- Bevor du eine **Applicative**-Instanz für **ZipList** implementierst, überlege warum

```
pure :: a -> ZipList a
pure x = ZipList [x]
```

keine gültige Definition ist? Welche Gesetze wären verletzt, würde man `pure` so definieren?

- Implementiere eine **Applicative**-Instanz für **ZipList**.
- Zeige, dass sowohl die **Functor**- als auch die **Applicative**-Instanz die üblichen geforderten Gesetze erfüllen.

**Test 138** `guard :: MonadZero m => Bool -> m ()` kann genutzt werden, um eine Berechnung bedingt fehlschlagen zu lassen.<sup>20</sup> Zum Beispiel können wir mithilfe von `guard` eine sichere Division definieren.

```
safeDiv :: (Integral a, MonadZero m) => a -> a -> m a
safeDiv a b = guard (b /= 0) >> return (a `div` b)
```

- Implementiere die Funktion `guard :: Bool -> Maybe ()` mit `Maybe ()` als konkreten Ergebnistypen.
- Die Typklasse **MonadZero** wird gängigerweise wie folgt definiert.

```
class Monad m => MonadZero m where
  mzero :: m a
```

Implementiere `guard` nun allgemein.

- Berechne `1 `safeDiv` 0 :: m Int` für **Maybe** und `[]`. Bevor das möglich ist, benötigst du entsprechende **MonadZero**-Instanzen.

Die Typklasse **MonadZero** wird so genannt, weil sie eine „monadische Null“ definiert. Bzgl. der Operation `(>>=)` verhält sich `mzero` absorbierend. Für Instanzen dieser Typklasse sollen diese Gesetze gelten.

```
mzero >>= f = mzero
m >>= mzero = mzero
```

<sup>19</sup>Das Umwickeln eines Typen mit `newtype`, für den wir bereits Typklasseninstanzen haben, ist ein gängiger Trick, um alternative Instanzen für diese Typklassen bereitzustellen.

<sup>20</sup>Für Interessierte: `guard` ist auf Basis von **Alternative** bzw. **MonadPlus** implementiert. **MonadZero** ist nicht Teil der Standardbibliothek, aber es ist definiert als Teil von **MonadPlus**.

**Test 139** In [Test 138](#) haben wir eine Typkonstruktorklasse definiert, die es uns erlaubt hat, einen Fehlschlag bzw. die Abwesenheit eines Ergebnisses auszudrücken. Diese können wir auch eine Abstraktionsebene früher einführen. Definiere eine weitere Typkonstruktorklasse `AlternativeZero` auf Ebene der applikativen Funktoren mit einer Funktion `empty :: f a`.

Folgende Ausdrücken sollen die gegebenen Werte haben:

- `guard (y /= 0) *> pure y = pure y` für `y /= 0` und
- `guard (y /= 0) *> pure y = empty` für `y == 0`.

`(>*) :: Applicative f => f a -> f b -> f b` ist ein Kombinator, der sich wie `(>>)` für applikative Funktoren verhält.

**Test 140** Als motivierendes Beispiel für Monaden hast du die Auswertung eines arithmetischen Ausdrucks, gegeben als Termstruktur, kennengelernt. Dort haben wir die `Maybe`-Monade verwendet, um fehlschlagende Berechnung aufzufangen. Der Typ für die arithmetischen Ausdrücke ist gegeben durch:

```
data Exp a = Num a
           | Exp a :+: Exp a
           | Exp a :-: Exp a
           | Exp a :*: Exp a
           | Exp a :/: Exp a
```

- Implementiere `eval :: Exp Int -> Maybe Int` mit dem `Maybe`-Applicative. Warum ist die Division, ohne eine weitere Hilfsfunktion nicht möglich? Was müsste diese Hilfsfunktion tun, damit die Regel für die Division funktioniert?<sup>21</sup>
- Implementiere `eval :: Exp Int -> Maybe Int` mit der `Maybe`-Monade. Benötigst du hier die Hilfsfunktion aus der vorherigen Teilaufgabe? Warum ja oder nein?
- Wie kannst du mit [Test 138](#) `eval` zu einer Funktion `eval :: MonadZero m => Exp Int -> m Int` verallgemeinern?
- `MonadZero` erlaubt es uns, einen Fehlschlag allgemein auszudrücken. Allerdings können wir anhand des Fehlschlags alleine nicht feststellen, warum es zum Fehlschlag kam. Verallgemeinere die Typkonstruktorklasse `MonadZero` zu einer Typkonstruktorklasse `MonadFail`, die es erlaubt, eine Beschreibung des Fehlschlags anzugeben. Sie soll also eine Funktion `fail :: String -> m a` definieren. Verallgemeinere `eval` erneut mit der neuen Typkonstruktorklasse. Gebe zusätzlich eine Instanz für den Typ `Either String a` – alternativ, implementiere eine `Functor`-, `Applicative`-, `Monad`- und `MonadFail`-Instanz für den Typen `data Result a = Failure String | Success a`.

**Test 141** Wie hängen die Listenmonade und list comprehensions zusammen?

- Schreibe den folgenden Ausdruck

```
do
  x <- [1..10]
  y <- [1..10]
  guard (x + y == 10)
  return (x, y)
```

mithilfe von list comprehensions. Der Wert des ausgerechneten Ausdrucks ist

```
[(0, 10), (1, 9), (2, 8), (3, 7), (4, 6), (5, 5),
 (6, 4), (7, 3), (8, 2), (9, 1), (10, 0)]
```

<sup>21</sup>Der applikativen Funktor wird dadurch nicht ausdrucksstärker! Das, was der applikative Funktor nicht leisten kann, wird in die Hilfsfunktion ausgelagert.

Anhand des Ergebnisses kannst du dir die Semantik von `guard` herleiten (oder schau dir vorher [Test 138](#) an).

- Schreibe den folgenden Ausdruck

```
[f | n <- [0..], let f = fib n, f `mod` 2 == 0]
```

mithilfe der Listenmonade.

**Test 142** Die `do`-Notation erlaubt es uns, statements der Form  $p \leftarrow e$  zu schreiben, wobei  $p$  ein beliebiges Muster sein kann. Zum Beispiel ist folgender Ausdruck valide und berechenbar.

```
do
  Just x <- [Just 1, Nothing, Just 2]
  return x
```

Der Wert dieses Ausdrucks ist `[1, 2]`.

- In welches Problem läufst du, wenn du diesen Ausdruck mithilfe von `(>>=)` und `(>>)` ausdrücken möchtest?
- Wie kannst du das Problem beheben in diesem konkreten Fall beheben?
- Fällt dir möglicherweise ein allgemeine Übersetzungsvorschrift für statements dieser Form unter der Verwendung von `MonadFail` aus [Test 140](#) ein?

**Test 143** Wie übersetzen wir

```
do x <- e1; e2    und    do e1; e2
```

in einen äquivalente Ausdrücke mithilfe von `(>>=)` und `(>>)`?

Wie übersetzen wir diesen etwas größeren Ausdruck?

```
do
  x <- getInt
  y <- getInt
  print (x + y)
  return (x + y)
```

**Test 144** Wie übersetzen wir die Ausdrücke

```
eval e1 >>= \x → eval e2
>>= \y → if y == 0
        then Nothing
        else return (x + y)
```

und

```
getLine >> read <$> getLine
>>= \x → case f x of
          Nothing → return 0
          Just _  → return x
```

in einen äquivalenten Ausdruck mithilfe der `do`-Notation?

**Test 145** Gegeben sei folgendes Haskell-Programm.

```
main :: IO ()
main = do
  putStr "Hello"
  return ()
  putStrLn ", world!"
  return ()
```

Was ist die Ausgabe des Programm und warum?

**Test 146** Gegeben sei folgendes fehlerhafte Haskell-Programm.

```
main :: IO ()
main = do
  q ← read <$> getLine
  if q == 0
  then main
  else
    p ← read <$> getLine
    print (p `div` q)
```

Warum ist das Programm fehlerhaft? Um den Fehler zu identifizieren, klammere alle validen Haskell-Teilausdrücke. (Du kannst davon ausgehen, dass alle Eingaben valide sind und deshalb keine weitere Fehlerbehandlung der Eingaben stattfinden muss.)

**Test 147** Gegeben sei der Datentyp `Tree a = Leaf a | Tree a :+: Tree a`.

- Implementiere eine Funktion `splits :: [a] → [[a], [a]]`, die alle nicht-leeren Aufteilungen der Eingabeliste berechnet.

Zum Beispiel soll `splits [1..4]` die Liste

`[[1], [2, 3, 4]], [[1, 2], [3, 4]], [[1, 2, 3], [4]]`

ergeben.

- Implementiere eine Funktion `allTrees :: [a] → [Tree a]`, die alle Binärbäume generiert, deren Blätter von links nach rechts die Eingabeliste lesen. Versuche, `allTrees` mithilfe von list comprehensions oder der Listenmonade zu implementieren.

**Test 148** Gegeben ist der Typ `data Deep a b = Deep [Maybe (Either a (Deep a b))]`. Die Faltungsfunktion sieht im Wesentlichen so aus.

```
foldDeep :: ([Maybe (Either a r)] → r) → Deep a b → r
foldDeep fdeep (Deep x) = fdeep (f x)
  where fold = foldDeep fdeep
```

Wie können wir `f :: [Maybe (Either a (Deep a b))] → [Maybe (Either a r)]` definieren?

**Test 149** Oft kommt es vor, dass Berechnungen zustandsabhängig verschiedene Ergebnisse liefern. Zum Beispiel merken wir uns in einer Tiefensuche durch einen Graph, welche Knoten bereits besucht wurden, damit die Tiefensuche sich nicht in einem Kreis verläuft. Allgemein können wir solche Berechnungen als Funktionen vom Typ `s → (a, s)` auffassen. Sie bekommen ein Zustand vom Typ `s` und liefern ein Ergebnis vom Typ `a` und einen (möglicherweise) neuen Zustand (ebenso vom Typ `s`).

Implementiere eine Funktion `sequence :: [s → (a, s)] → s → ([a], s)`, die Liste zustandsabhängiger Berechnungen nimmt und der Reihe nach ausführt. Es wird dabei ein erster Zustand übergeben, der die erste Berechnung anstößt. Das Ergebnis soll der letzte Zustand mit allen Ergebnissen der Berechnungen sein.<sup>22</sup>

Betrachte folgendes Beispiel:

```
--      Zustand      Ergebnis  neuer Zustand
fib :: (Int, Int) → (Int      , (Int, Int) )
fib (f0, f1) = (f0, (f1, f0 + f1))
```

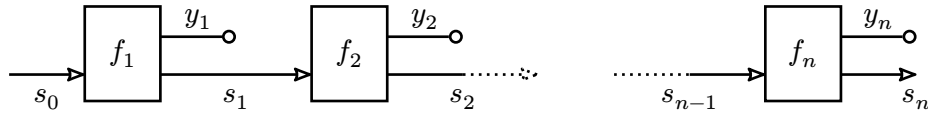
---

<sup>22</sup>Für Interessierte: Diese Implementierung von `sequence` ist ein Spezialfall für die `State-Monade`. Mit der Intuition, dass wir hier Berechnungen sequenzieren, sollte es nicht überraschend sein, dass `s → (a, s)` eine Monade ist. Alternativ kannst du die `State-Monade` implementieren und das vorimplementierte (oder von dir implementierte) `sequence` verwenden.

```
fibs :: Int → [Int]
fibs n = fst (sequence (replicate n fib) (0, 1))
```

Hier wird der erste Zustand mit den ersten beiden Fibonacci-Zahlen initialisiert, also  $(0, 1)$ . In jedem Schritt wird der Zustand mit der nächsten Fibonacci-Zahl aktualisiert und die kleinere Fibonacci-Zahl des Zustands zurückgegeben. Zuletzt projizieren wir mit `fst` das Ergebnis von `sequence` und verwerfen so den letzten Zustand.

Hier ist der Datenfluss von `sequence` nochmal visualisiert:



Es soll also `sequence [f1, f2, ..., fn] s0 = ([y1, y2, ..., yn], sn)` gelten.

**Challenge 17** Im Folgenden modellieren wir einen Graph als Paar  $(V, E)$  mit einer Knoten- und Kantenbewertung  $w_v : V \rightarrow A$  und  $w_e : E \rightarrow B$ , und  $E \subseteq V \times V$ .

Gegeben sei der Datentyp

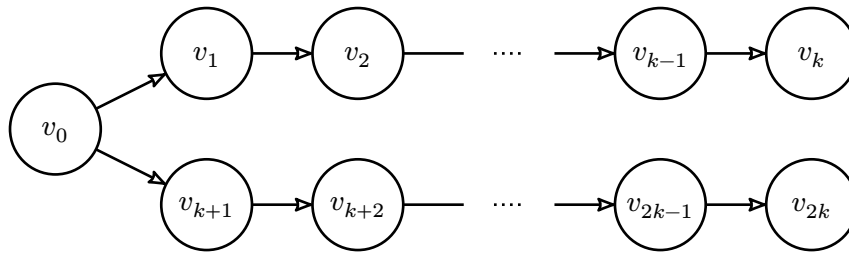
```
data Graph a b = Graph [(Int, a)] [(Int, b, Int)].
```

Hier entspricht der erste Parameter des Datenkonstruktors  $w_v$  und der zweite  $w_e$ .

- Implementiere eine Funktion `succs :: Int → Graph a b → [Int]`, die zu einem gegebenen Knoten die direkten Nachfolger berechnet.
- Implementiere eine Funktion `reachable :: Int → Int → Graph a b → Bool`, die entscheidet, ob zwischen zwei Knoten ein gerichteter Pfad existiert. Starte zuerst mit einfachen Graphen und betrachte immer komplexer werdende Graphen. Wie musst du (oder kannst du) deine Implementierung anpassen?
  - Nehme zuerst an, dass ein gegebener Graph immer ein Baum ist? Wenn also ein Pfad existiert, dann ist er eindeutig.
  - Nehme jetzt an, dass ein gegebener Graph immer azyklisch ist. Das heißt, falls ein Pfad existiert, muss dieser nicht mehr eindeutig sein. Nutze deine Erkenntnisse aus [Test 149](#), um eine Liste aller besuchten Knoten zu verwalten.
  - Was musst du in deiner Implementierung anpassen, wenn der gegebene Graph auch zyklisch sein kann?
- Je nachdem wie du `reachable` implementiert hast, könnte es denn Anschein erwecken, dass deine Lösung alle Knoten besucht. Wieso ist das nicht unbedingt der Fall? Wieso passiert das nur, wenn wir uns die Liste aller besuchten Knoten anschauen? Welche Beobachtungen machst du, wenn du `reachable 0 k (yGraph k)` berechnest?

```
yGraph :: Int → Graph () ()
yGraph k = Graph [(v, ()) | v <- [0..2 * k]]
              (let left = [(v, (), v + 1) | v <- [1..k]]
                right = [(v, (), v + 1) | v <- [k + 1..2 * k]]
                in (0, (), 1) : (0, (), k + 1) : (left ++ right))
```

Hier ist der Graph visualisiert.



**Test 150** Es kommt häufiger vor, dass zufällig generierte Werte bestimmte Eigenschaften erfüllen sollen. QuickCheck bietet auf Generatoren-Ebene z.B. die Funktion `suchThat :: Gen a → (a → Bool) → Gen a` dafür an. Diese nimmt einen Generator und generiert solange neue Werte, bis eine gewünschte Eigenschaft erfüllt ist. Diese Eigenschaft wird durch ein Prädikat formuliert.

Implementiere `suchThat`.

Es gibt ein paar QuickCheck-spezifische Fallstricke, die mit dem `size`-Parameter der Generatoren zu tun haben, die du bei deiner Implementierung nicht beachten brauchst. Falls es dich interessiert, ist hier die [suchThat-Implementierung von QuickCheck](#).

**Test 151** Wenn du folgende (etwas künstliche) Eigenschaft mithilfe von QuickCheck prüfst, muss im Durchschnitt jeder zweite Test verworfen werden, weil die Vorbedingung der Eigenschaft nicht erfüllt ist.

```
prop_prop :: Int → Property
prop_prop k = k > 0 ==> True
```

Um dieses Verhalten zu unterbinden, können wir die Eigenschaft leicht abändern.<sup>23</sup>

```
prop_prop :: Positive Int → Property
prop_prop (Positive k) = k > 0 ==> True
```

Jetzt werden keine Tests verworfen.

Überlege dir, wie die Lösung des Problems funktioniert und implementiere sie.

**Challenge 18** Eigenschaften lassen sich mit QuickCheck z.B. mithilfe der Funktion `quickCheck` prüfen.

Hier sind ein paar Eigenschaften.

```
prop_comm :: Int → Int → Bool
prop_comm x y = x + y == y + x
```

```
prop_inv :: Int → Bool
prop_inv x = x + (-x) == 0
```

- Welchen Typ muss `quickCheck` scheinbar haben, damit wir `prop_comm` prüfen können? Wie steht das im Konflikt mit `prop_inv`?
- Um `quickCheck` zu implementieren, benötigen wir die Möglichkeit, beliebig stellige Funktionen anwenden zu können. Das ist mithilfe von Typklassen möglich. Hier ist eine vereinfachte Variante der Typklasse `Testable`, wie sie in QuickCheck zu finden ist.

```
newtype Property = Property { unProperty :: Bool }

class Testable a where
  property :: a → Property
```

<sup>23</sup>QuickCheck hat viele solche type-level modifiers, die das Generatoren-Verhalten verändern.

- Implementiere **Testable**-Instanzen für **Bool** und **Property**, und anschließend eine Instanz für den Typ  $a \rightarrow b$ , wobei  $a$  eine **Arbitrary**-Instanz haben soll und  $b$  wieder **Testable** sein soll.
- Welche Instanzen übernehmen die Rolle eines Basisfalls und welche Instanzen übernehmen die Rolle einer induktiven Regel?
- Wie ist es möglich, dass wir Eigenschaften definieren können, die entweder ein **Bool** oder eine **Property** als Rückgabewert haben?
- Als Nächstes betrachten wir eine Vereinfachung der **Arbitrary**-Typklasse und eine Instanz für den Typ **Int**, damit wir **quickCheck** implementieren und verwenden können.

```
class Arbitrary a where
  arbitrary :: a
```

```
instance Arbitrary Int where
  arbitrary = 42 -- Hier werden normalerweise zufällige Werte generiert.
```

Implementiere eine Funktion `quickCheck :: Testable a  $\Rightarrow$  a  $\rightarrow$  Bool`, die eine Eigenschaft nimmt und prüft.

In QuickCheck werden Generatoren genutzt, um zufällige Werte zu generieren. Diese nutzen alle einen Zufallszahlengenerator, der als Zustand mit weiteren Parametern durch alle **arbitrary**-Aufrufe durchgetragen wird. Das haben wir uns durch die Vereinfachungen vernachlässigt.

**Test 152** Implementiere Arrays als nicht-mutierende Datenstruktur in Python. Die Klasse soll so funktionieren, dass der folgende Beispielcode lauffähig ist und die angegebene Ausgabe erzeugt.

```
a = Array.fromList(5, [(2, 4), (3, 3)])

b = a.update([(1, 3), (2, 2)])
for i in range(len(a)):
    print(a[i], b[i])
```

Die Ausgabe des Programms soll

```
None None
None 3
4 2
3 3
None None
```

sein.

# Logische Programmierung

**Test 153** Was ist das Berechnungsprinzip von Prolog bzw. wie leitet Prolog aus gegebenen Informationen ab?

**Test 154** Formuliere folgende Aussage als Prolog-Programm: Seien  $A$  und  $B$ . Dann gilt  $C$ , wenn  $A$  und  $B$  gelten.

**Test 155** Wie können wir Funktionen, wie wir sie aus Haskell kennen, in Prolog umsetzen? Erkläre es mithilfe eines Beispiels (wie z.B. `(++) :: [a] → [a] → [a]`).

**Test 156**  $n$ -stellige Funktionen können wir in Prolog als  $(n + 1)$ -stellige Relation umsetzen. Dabei nimmt die letzte Position der Relation die Rolle des Ergebnisses ein. Gehen wir mit Funktionen vom Typ  $a_1 \rightarrow \dots \rightarrow a_n \rightarrow \text{Bool}$  besonders um?

**Test 157** Wie hängen die Syntax von Prolog und die der Aussagenlogik zusammen? Welche Symbole entsprechen sich?

**Test 158** In Prolog können wir Termstrukturen erzeugen. Der Haskell-Typ

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

kann z.B. wie folgt in Prolog umgesetzt werden.

```
maybe(nothing).  
maybe(just(_)).
```

Übersetze mit der gleichen Idee den Datentyp

```
data Tree a = Empty | Node (Tree a) a (Tree a).
```

**Test 159** Wie viele Ergebnisse liefern die folgenden Anfragen?

- `?- append(_, [X|_], [1, 2, 3, 4]).`
- `?- append(_, [_|X], [1, 2, 3, 4]).`
- `?- member(X, [1, 2, 3]), member(Y, [2, 3, 4]), X \= Y.`
- `?- append(_, [X|Ys], [1, 2, 3, 4]), append(_, [Y|_], Ys).`

**Test 160** Ordne die Begriffe Atom, Fakt, Regel und Variable dem folgenden Prolog-Programm zu?

```
semitone(c, cis). semitone(cis, d). semitone(d, dis). semitone(dis, e).  
semitone(e, f). semitone(f, fis). semitone(fis, g). semitone(g, gis).  
semitone(gis, a). semitone(a, ais). semitone(ais, b). semitone(b, c).
```

```
minor_third(P1, Mi3) :-  
    semitone(P1, Mi2), semitone(Mi2, Ma2), semitone(Ma2, Mi3).
```

```
major_third(P1, Ma3) :- minor_third(P1, Mi3), semitone(Mi3, Ma3).
```

```
chord(minor(P1, Mi3, P5)) :- minor_third(P1, Mi3), major_third(Mi3, P5).  
chord(major(P1, Ma3, P5)) :- major_third(P1, Ma3), minor_third(Ma3, P5).
```

**Test 161** In Test 160 sind die Halbtonschritte als Fakten definiert. Um diese etwas kompakter zu schreiben, können wir `append/3` verwenden. Implementiere `semitone/2` mithilfe von `append/3`.

**Test 162** Warum ergibt es Sinn, beim Prolog-Programmieren in Relationen statt Funktionen zu denken? Betrachte z.B. das Prädikat `append/3` gemeinsam mit den Anfragen

- `?- append(Xs, Ys, [1, 2, 3]).`



- `?- append(Xs, [2, 3], Zs).`,
- `?- append([1, 2], Xs, Zs).` und
- `?- append([1, 2], Ys, [1, 2, 3]).`

**Test 163** Wenn wir Haskell um die Möglichkeit erweitern könnten, mehrere Regeln auszuprobieren und mehrere Lösungen zu kombinieren, hätten wir trotz der Abwesenheit logischer Variablen bereits viele Möglichkeiten der Modellierung, wie wir sie in Prolog haben. Es stellt sich heraus, dass die Listenmonade den Nichtdeterminismus schon sehr gut abbilden kann, und erlaubt damit einen weiteren abstrakten Blick auf die Listenmonade - anstatt z.B. der Blick der imperativen Programmierung als Verschachtelung von Schleifen.

Als kleines Beispiel wollen wir einen fairen Münzenwurf modellieren. Wir kodieren die Ereignisse binär, wobei 0 für Kopf und 1 für Zahl stehen soll. Weiter ist auch ein Beispiel angegeben für zwei unabhängige Münzenwürfe.

In Prolog:

```
coin(0).
coin(1).

coin2(X, Y) :-
    coin(X),
    coin(Y).
```

In Haskell:

```
coin :: [Int]
coin = [0] ++ [1]

coin2 :: [(Int, Int)]
coin2 = do
    x <- coin
    y <- coin
    return (x, y)
```

Bewaffnet mit diesen Ideen, modelliere einen fairen 6-seitigen Würfel. Berechne alle Möglichkeiten, wie man drei Würfel werfen kann, um die Augenzahl 11 zu erhalten.

**Test 164** Implementiere das Prädikat `zip/3`, das zwei Liste bekommt und eine Liste von Paaren zurückliefert – so wie du es aus Haskell kennst. Es soll

```
?- zip([1, 2], [3, 4, 5], [(1, 3), (2, 4)]).
```

gelten. Wie gewinnst du aus deiner Implementierung das Prädikat `unzip/3`, also die Umkehrfunktion `zip/3`, wenn diese auf Listen gleicher Länge eingeschränkt ist.

**Test 165** Mithilfe von `append/3` lassen sehr viele andere Prädikate auf Listen definieren. Überlege dir, wie du folgende Prädikate unter dessen Nutzung implementieren kannst. Die Prädikate sollen sich wie deren entsprechenden Haskell-Funktionen verhalten, wenn dir der Name des Prädikats bekannt vorkommt.

- `head/2` und `tail/2`,
- `last/2`,
- `member/2` (entspricht `elem` in Haskell)
- `dups/2` soll alle Elemente in einer Liste finden, die genau zweimal vorkommen. Du darfst `not_member/2` als Hilfsfunktion verwenden.
- `sublist/2` soll erfüllbar sein, wenn eine Liste in einer anderen ohne Lücken enthalten ist.
- `subsequence/2` soll erfüllbar sein, wenn eine Liste in einer anderen mit möglichen Lücken enthalten ist.

Warum ist `member/2` hier zweistellig?

**Test 166** Das Prädikat `sublist/2` soll genau dann erfüllbar sein, wenn eine gegebene Liste in einer anderen gegebenen Liste enthalten ist. Eine mögliche Implementierung sieht wie folgt aus:

```
is_prefix([], _).
is_prefix([X|Xs], [X|Ys]) :- is_prefix(Xs, Ys).

sublist(Xs, Ys) :- is_prefix(Xs, Ys).
sublist(Xs, [_|Ys]) :- sublist(Xs, Ys).
```

Was sind die Ergebnisse der Anfrage `?- sublist(Xs, [1, 2]).?`

**Test 167** Warum ist `not_member(X, Xs) :- append(_, [Y|_], Xs), X \= Y.` keine korrekte Implementierung des Prädikates, das testet, ob ein Element nicht einer Liste enthalten ist?

**Test 168** In diesem Selbsttest wollen wir die Peano-Arithmetik wiederholen. Implementiere folgende Prädikate:

- `peano/1` soll beweisbar sein, wenn der übergebene Term eine Peano-Zahl ist, also z.B. die Form `o`, `s(o)`, `s(s(o))`, ... hat.
- `add/3` soll die Addition auf Peano-Zahlen implementieren.
- Die Multiplikation kann wie folgt definiert werden:

```
mult(o, _, o).
mult(s(X), Y, Z) :- add(U, Y, Z), mult(X, Y, U).
```

Eine alternative Implementierung könnte so aussehen:

```
mult(o, _, o).
mult(s(X), Y, Z) :- mult(X, Y, U), add(U, Y, Z).
```

Welcher der beiden Implementierungen ist besser? Betrachte während deiner Überlegungen auch folgende Anfrage `?- mult(s(s(o)), Y, s(s(s(s(o))))).` – also sinngemäß die Anfrage  $2 \cdot y = 4$ .

- Implementiere weiter die Prädikate `lt/2`, `eq/2` für Peano-Zahlen, also die  $<$ -Relation und Gleichheit auf Peano-Zahlen.

**Test 169** Das Sieb des Eratosthenes ist ein Algorithmus zur Bestimmung von Primzahlen. Dieses wollen wir nun in Prolog implementieren – mit Peano-Zahlen natürlich.

- Implementiere zuerst ein Prädikat `range/3`, das eine Liste berechnet, die alle Ganzzahlen in einem vorgegebenen Intervall enthält. Zum Beispiel soll `?- range(s(o), s(s(s(o))), [s(o), s(s(o))]).` beweisbar sein.
- Als Nächstes implementiere ein Prädikat `filter_by_prime/3`, das alle Elemente einer Liste entfernt, die durch eine gegebene Primzahl teilbar sind.
- Zuletzt benötigen wir noch `primes/2`, dass alle Primzahlen bis zu einer angegebenen Zahl berechnen soll. Implementiere dieses mithilfe der bereits vorbereiteten Prädikate.
- Mit **Test 170** und einem weiteren Prädikat `map_to_nat/2` kannst du die Liste der Primzahlen in eine lesbare Form bringen – du kannst auch ein allgemeines `map/3` mithilfe des Prädikats höherer Ordnung `call` implementieren.

**Test 170** Implementiere ein Prädikat `to_nat/2`, das eine Peano-Zahl in eine natürliche Zahl konvertiert. Nutze dafür `is/2`. Wieso terminiert die Anfrage `?- to_nat(P, 3).` nicht?

**Test 171** Ein Graph sei dargestellt als eine Liste von Kanten. Die Kanten seien wiederum als Tupel dargestellt.

Implementiere ein Prädikat `reachable/3`, das bestimmt, ob ein Knoten von einem anderen Knoten aus erreichbar ist. Du benötigst voraussichtlich ein weiteres vierstelliges Hilfsprädikat.

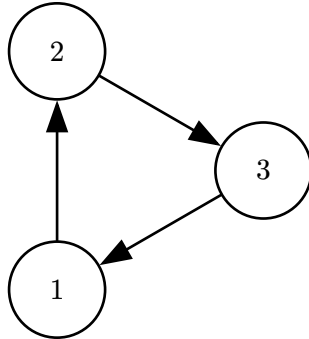
Dein Programm soll sich wie folgt verhalten:

```
?- reachable(1, 3, [(1, 2), (2, 3), (3, 1)]).
true ;
```

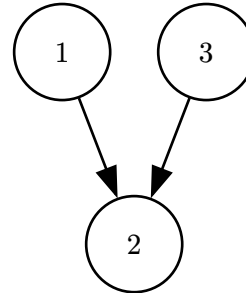
false.

```
?- reachable(1, 3, [(1, 2), (3, 2)]).  
false.
```

Hier sind die Eingabe-Graphen nochmal visualisiert.



Eingabe-Graph der ersten Anfrage mit unendlich vielen gerichteten Pfaden von 1 bis 3



Eingabe-Graph der zweiten Anfrage mit keinem gerichteten Pfad von 1 nach 3

**Test 172** Wie unterscheiden sich die Gleichheit `==/2` in Prolog und die Gleichheit in Haskell?

**Test 173** Welche Konzepte, die Haskell verwendet, stecken hinter den Anfragen

- `?- just((X, Y)) = just((1, 2))` und
- `?- to(X, to(X, list(X))) = to(int, to(int, list(int)))`?

**Test 174** Eine Dur-Tonleiter hat folgendes Muster relativ zum vorherigen Ton in Halbtonschritten:

+2, +2, +1, +2, +2, +2, +1

Zum Beispiel erhalten wir mit dem Grundton C, so die C-Dur Tonleiter

C - D - E - F - G - A - B - C.

D ist zwei Halbtöne von C entfernt, E ist zwei Halbtöne von D entfernt, F ist einen Halbton von E entfernt und so weiter.

Schreibe ein Prädikat `all_major/2`, dass alle diatonischen Dur-Akkorde (wie in [Test 160](#) definiert) einer Dur-Tonleiter mit gegebenen Grundton berechnet. Diatonisch bedeutet, dass der Akkord nur aus Tönen der gegebenen Tonleiter bestehen darf. Für die C-Dur Tonleiter sind die gesuchten Akkorde C-Dur, F-Dur und G-Dur.

**Test 175** Entwickle ein Prädikat `nth/3`, dass das  $n$ -te Element einer Liste zurückgibt. Zum Beispiel soll folgende Anfrage beweisbar sein.

```
?- nth([3, 1, 4, 1, 5], s(s(o)), X).  
X = 4.
```

**Test 176** Aus welchen Teilen besteht das generate-and-test Schema?

**Test 177** Wie hängen musterorientierte Prädikate und induktiv definierte Funktionen miteinander zusammen?

**Challenge 19** Das Erfüllbarkeitsproblem der Aussagenlogik fragt, ob es für eine gegebene aussagenlogische Formel eine Belegung der Variablen mit wahr oder falsch gibt, sodass die Formel insgesamt wahr ist.

Zur Erinnerung, die Syntax aussagenlogischer Formeln ist wie folgt beschrieben:

- $\top$  (true),  $\perp$  (false) und Variablen sind aussagenlogische Formeln.
- Seien  $F, G$  aussagenlogische Formeln, dann sind
  - $\neg F$  (Negation),
  - $F \wedge G$  (Konjunktion) und
  - $F \vee G$  (Disjunktion)

aussagenlogische Formeln.

Die Semantik der atomaren Formeln und der Junktoren wird durch die entsprechenden booleschen Funktionen und eine Belegung der Variablen definiert.

- Implementiere zuerst `bool/1`, das den Wertebereich festlegen soll, und die booleschen Funktionen `and/3`, `or/3`, `neg/2`.
- Implementiere ein Prädikat `get_vars/2`, das alle Bezeichner von (freien) Variablen einer gegebenen Formel zurückgibt. Eine Variable soll in einer Formel als Term `var(X)` gekennzeichnet werden.  $X$  ist dann der Bezeichner der Variable. Stelle dabei sicher, dass die Liste der Bezeichner keine Duplikate enthält – dafür kannst du z.B. `list_to_set/2` verwenden.
- Implementiere als Nächstes ein Prädikat `assignment/2`, das alle Belegungen generiert. Eine Zuweisung soll als Liste von Tupeln dargestellt werden (vgl. Beispielanfragen).
- Implementiere ein Prädikat `eval/3`, das beweisbar ist, wenn die gegebene Formel erfüllbar unter der gegebenen Belegung ist. Hier sind ein paar Beispielanfragen:

```
?- eval(and(true, var(x)), [(x, true)], false).
false.
```

```
?- eval(and(true, var(x)), [(x, B)], false).
B = false.
```

- Implementiere ein Prädikat `sat/2`, das alle belegten Formeln berechnet. Hier sind ein paar weitere Beispielanfragen:

```
?- sat(or(var(x), neg(var(x))), A).
A = [(x, true)] ;
A = [(x, false)] ;
false.
```

```
?- sat(and(var(x), or(neg(var(y)), neg(var(z))))), A).
A = [(x, true), (y, true), (z, false)] ;
A = [(x, true), (y, false), (z, true)] ;
A = [(x, true), (y, false), (z, false)] ;
false.
```

```
?- sat(and(var(x), neg(var(x))), A).
false.
```

**Test 178** In diesem Test ergänzen wir den SAT-Löser aus [Challenge 19](#) um die Implikation und Äquivalenz. Anstatt das `eval`-Prädikat entsprechend zu erweitern, wollen wir diese Terme in andere Terme übersetzen, die wir bereits auswerten können. Das können wir mit folgenden Regeln erreichen:

$$(A \Rightarrow B) \Leftrightarrow (\neg A \vee B) \quad \text{und} \quad (A \Leftrightarrow B) \Leftrightarrow (A \Rightarrow B \wedge B \Rightarrow A)$$

Implementiere dafür ein Prädikat `desugar/2`. Als Konstruktoren kannst du z.B. `impl/2` und `iff/2` verwenden.

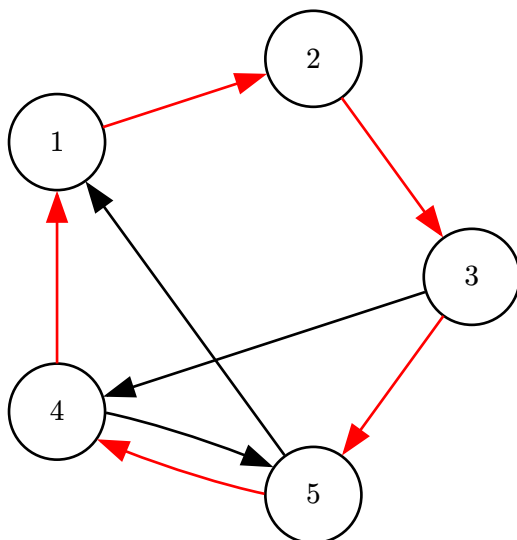
**Test 179** Wir machen uns auf in die Kombinatorik und wollen ein paar nützliche Prädikate definieren, die uns helfen Suchräume zu durchlaufen.

- Implementiere ein Prädikat `varia_rep/3`, das genau dann beweisbar ist, wenn eine über gegebene Liste eine Variation einer anderen ist und aus  $k$  Elementen besteht – es soll z.B. `?- varia_rep([0, 1], 4, [1, 0, 0, 1])` beweisbar sein.
- Implementiere ein Prädikat `perms/2`, dass genau dann beweisbar ist, wenn zwei übergebene Listen Permutationen voneinander sind.

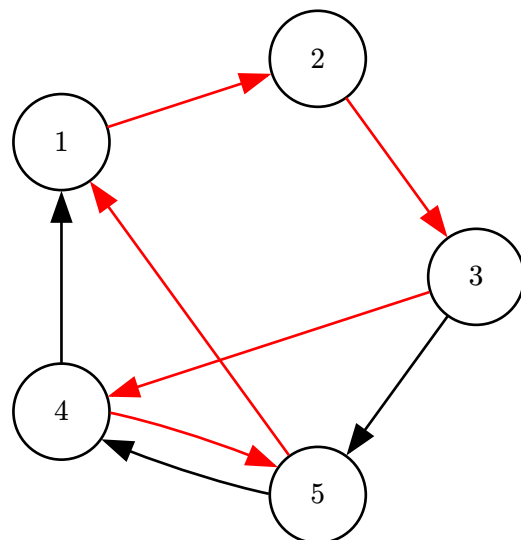
**Challenge 20** Oft eignet sich in Prolog gut, um Algorithmen für Entscheidungsprobleme, die in NP liegen, zu implementieren. Als Methode dafür hast du generate-and-test kennengelernt – wir generieren mögliche (also korrekte oder falsche) Lösungen und entscheiden dann, ob sie korrekt sind.

Ein Hamiltonkreis ist ein Kreis in einem Graph, der jeden Knoten genau einmal enthält. Wir wollen diese als Listen darstellen. Durch Rotation dieser Liste erhalten wir äquivalente Hamiltonkreise. Diese wollen wir ignorieren und wählen stattdessen einen kanonischen Repräsentanten, indem wir uns auf die Liste beschränken, die mit dem kleinsten Knoten beginnt.

Im folgenden Graph gibt es zwei Hamiltonkreise.



Hamiltonkreis 1: (1, 2, 3, 5, 4)



Hamiltonkreis 2: (1, 2, 3, 4, 5)

Um Hamiltonkreise zu bestimmen, arbeiten wir uns von einem naiven Pfad-Generator zu einem, der versucht nach und nach den Suchraum durch vorhandene Informationen zu verkleinern (auch pruning genannt). Danach verifizieren wir, ob ein gegebener Pfad ein Hamiltonkreis ist. Graphen kannst du z.B. als Liste von Kanten darstellen.

```
graph([(1, 2), (2, 3), (3, 4), (3, 5), (4, 5), (4, 1), (5, 1), (5, 4)]).
```

Es lohnt sich, [Test 179](#) vor dieser Challenge gemacht zu haben, wenn du mit den naiveren Pfad-Generatoren starten möchtest.

- Implementiere zuerst einen (polynomiellen) Verifizierer, also ein Prädikat `is_hamilton/2`, das bestimmt, ob ein gegebener Pfad in einem gegebenen Graphen einem Hamiltonkreis entspricht.
- Implementiere ein Prädikat `path/2` und verbessere sukzessiv mit den folgenden Ideen:
  - Prüfe jede beliebige Knotenfolge bestehend aus  $|V|$  Knoten. Das heißt, der Suchraum entspricht zu Beginn  $V^{|V|}$  für einen Graphen  $(V, E)$ .
  - Jede zwei Knoten dieser Folge müssen paarweise unterschiedlich sein.

- Jede zwei aufeinanderfolgenden Knoten entsprechen einer Kante in dem Eingabegraphen. Die Knotenfolge ist also ein Pfad.
- Implementiere zuletzt das Prädikat `hamilton/2`, das Hamiltonpfade bzw. -kreise berechnet.

Beobachte experimentell, wie sich die Laufzeit durch die einzelnen Pruning-Schritte verändert.

Im Folgenden stehen Großbuchstaben für Variablen und Kleinbuchstaben für atomare Ausdrücke – wenn nicht anders in Test oder Challenge eingeführt.

**Test 180** Was besagt die Abtrennungsregel (modus ponens)?

**Test 181** Was ist das (einfache) Resolutionsprinzip?

**Test 182** Wann ist eine Anfrage mithilfe des Resolutionsprinzips beweisbar?

**Test 183** Mithilfe welcher Methode stellen wir fest, ob ein Literal zu einer linken Regelseite passt?

**Test 184** Wie sind Terme definiert?

**Test 185** Welche der folgenden Terme sind syntaktisch korrekt?

- $X$
- $a$
- $XX$
- $f(X, a)$
- $f(f(X))$
- $g(f(X)(Y))$

**Test 186** Mithilfe welcher Methode ersetzen wir Variablen in Termen?

**Test 187** Wie ist die Substitution auf Termen definiert? Was wird insbesondere durch eine Substitution verändert und was nicht?

**Test 188** Falls du Challenge 19 gemeistert hast – an welcher Stelle deines Programms führst du eine Substitution durch?

**Test 189** Sei  $\sigma = \{X \mapsto 1, Y \mapsto 2\}$  eine Substitution. Welche Anwendungen oder Aussagen sind korrekt?

- $\sigma(\text{add}(X, Y)) = \text{add}(1, 2)$
- $\sigma(\text{eq}(X, X)) = \text{eq}(1, X)$
- $\sigma(f(g(X, Y), Z))$  ist nicht definiert.

**Test 190** Welche der folgenden Substitutionen sind wohldefiniert?

- $\sigma = \{X \mapsto 1\}$
- $\sigma = \{X \mapsto X\}$
- $\sigma = \{f(X) \mapsto f(Y)\}$
- $\sigma = \{X \mapsto Y, Y \mapsto X\}$
- $\sigma = \{[X|Y] \mapsto [1|[]]\}$

**Test 191** Sind  $[X]$  und  $[1, 2]$  unifizierbar?

**Test 192** Wende die Substitution  $\sigma = \{X \mapsto 1, Y \mapsto f(X)\}$  auf den Term  $g(X, h(Y))$  an, ohne einen Zwischenschritt auszulassen.

**Test 193** Was ist ein Unifikator? Was ist ein allgemeinster Unifikator?

**Test 194** Was sind die Ergebnisse der folgenden Kompositionen von Substitutionen?

- $\{Y \mapsto X\} \circ \{Z \mapsto 1\}$

- $\{Y \mapsto X\} \circ \{Z \mapsto Y\}$
- $\{Z \mapsto Y\} \circ \{Y \mapsto X\}$

**Test 195** Beim Durchführen des Unifikationsalgorithmus treten in zwei verschiedenen Iterationen  $i, j$  mit  $i < j$  die Substitutionen

$$\sigma_i = \{X \mapsto f(Y)\} \text{ und } \sigma_j = \{X \mapsto a\}$$

auf. Ist ein solcher Verlauf korrekt? Begründe deine Antwort. Dabei kann angenommen werden, dass  $X$  nicht in  $Y$  vorkommt.

**Test 196** Warum gilt  $\{Y \mapsto X\} \circ \{Z \mapsto Y\} = \{Z \mapsto Y\} \circ \{Y \mapsto X\}$  nicht?

**Test 197** Warum ist  $\{Y \mapsto X\} \circ \{Y \mapsto 2\} = \{Y \mapsto 2\}$ ?

**Test 198** Warum ist die Komposition von Substitutionen im Allgemeinen nicht die Vereinigung der jeweiligen Mengendarstellungen?

**Test 199** Wann existiert ein allgemeinsten Unifikator?

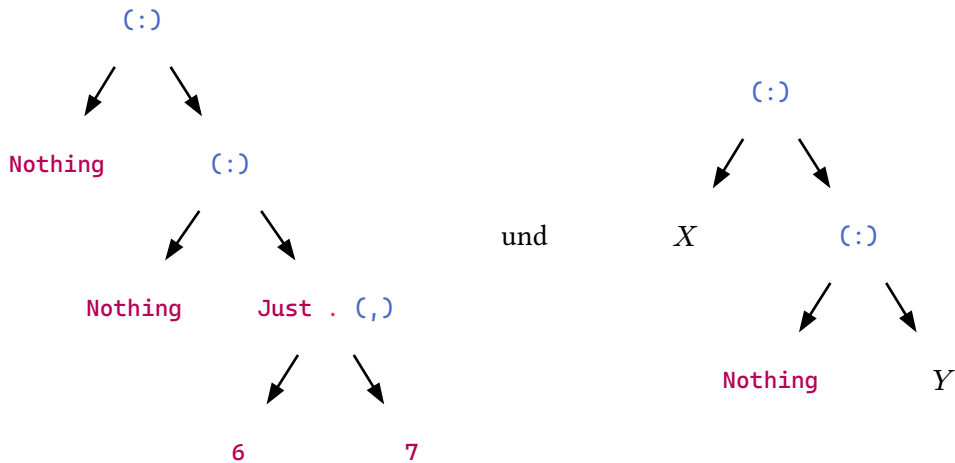
**Test 200** Was ist die Unstimmigkeitsmenge zweier Terme, was gibt sie an und wie ist sie definiert?

**Test 201** Welche Unstimmigkeitsmengen sind korrekt berechnet?

- $ds(f(X), f(1)) = \{X, 1\}$
- $ds(1, 2) = \{1, 2\}$
- $ds(g(1, 2), h(1, 2)) = \emptyset$
- $ds(X, Y) = \emptyset$
- $ds(f(X, Y), f(1, 2)) = \{Y, 2\}$

**Test 202** Finde Unifikatoren für die folgende Terme:

- $(X + 1) \cdot Y + Z$  und  $((3 + Z) + 1) \cdot Z + 3$ , und
- 



**Test 203** Unter welchen Umständen terminiert der Unifikationsalgorithmus?

**Test 204** Aus welcher Eigenschaft des Unifikationsalgorithmus folgt, dass ein berechneter Unifikator ein allgemeinsten Unifikator ist?

**Test 205** Seien  $t_1, t_2$  Terme. Wenn  $ds(\sigma(t_1), \sigma(t_2)) = \emptyset$  gilt, was können wir über  $\sigma$  folgern?

**Test 206** Welche Arten von Fehlschlägen können während des Unifikationsalgorithmus auftreten? Unter welchen Umständen treten diese auf?

**Test 207** In welches Problem laufen wir, wenn wir mit einer Substitution, die sich aus  $ds(t_1, t_2) = \{X, f(X)\}$  ergibt, naiv weiter rechnen würden, wobei  $t_1$  und  $t_2$  Terme sind?

**Test 208** Was bedeutet es, wenn der Vorkommenstest (occurs check) positiv ist?

**Test 209** Gebe ein Beispiel für eine Eingabe an, für das der Unifikationsalgorithmus exponentielle Laufzeit bzgl. der Größe der Eingabeterme hat.

Die Größe eines Terms  $|\cdot|$  wir z.B. wie folgt berechnen:

- $|X| = 1$ , falls  $X$  Variable ist,
- $|a| = 1$ , falls  $a$  Konstante ist und
- $|f(t_1, \dots, t_n)| = 1 + \sum_{i=1}^n |t_i|$  für Terme  $t_1, \dots, t_n$  und  $n$ -stelligen Funktor  $f$ .

**Test 210** Wieso kommt der Fall der exponentiellen Laufzeit in der Größe der Eingabeterme überhaupt zustande?

**Test 211** Aus welchen Komponenten setzt sich das allgemeine Resolutionsprinzip zusammen? Wie wird es auch genannt?

**Test 212** Was legt die Selektionsfunktion der SLD-Resolution fest? Welche verwendet Prolog?

**Test 213** Gegeben sei die Anfrage  $?- A_1, \dots, A_m$ . Du stellst fest, dass  $A_1$  mit der linken Seite der Regel  $L :- L_1, \dots, L_n$  unifizierbar ist. Welche Anfrage ist in einem SLD-Resolutionsschritt daraus ableitbar.

**Test 214** Wieso benennen wir Variablen einer Regel um, bevor wir eine Unifikation als Teil eines SLD-Resolutionsschritt durchführen?

**Test 215** Wodurch ergibt sich die Struktur eines SLD-Baums?

**Test 216** Welche Auswertungsstrategie findet immer eine Lösung, falls eine existiert?

**Test 217** Warum wird die Tiefensuche als Auswertungsstrategie der Breitensuche bevorzugt?

**Test 218** Wie ergibt sich die Reihenfolge der Kindknoten eines Knoten in einem SLD-Baum?

**Test 219** Welche Rolle spielt Backtracking in Prolog?

**Test 220** Wie werden Variablen in Prolog gebunden?

**Test 221** Wieso wird empfohlen, dass Klauseln für Spezialfälle vor allgemeineren Klauseln stehen sollten?

**Test 222** Gegeben sei das Prolog-Programm.

```
fruit(apple).  
fruit(banana).  
fruit(cranberry).
```

```
salad(F1, F2, F3) :- fruit(F1), fruit(F2), fruit(F3).
```

Was sind die ersten vier Lösungen, die Prolog berechnet? Warum verändern sich die Belegungen für F2 und F3 zuerst?

**Test 223** Gegeben sei das Prolog-Programm:

```
nth(0, [X|_], X).  
nth(N, [_|Xs], X) :- N > 0, M is N - 1, nth(M, Xs, X).
```



Wir beginnen, eine Lösungen zu berechnen, wie Prolog sie berechnen würde, für die Anfrage

`?- nth(1, [3, 1, 4, 1])..`

`?- nth(1, [3, 1, 4, 1]).`

`| - (2. Regel)`

`?- 1 > 0, M is 1 - 1, nth(M, [1, 4, 1], X).`

`| - (2. Regel)`

`?- 1 > 0, M is 1 - 1, M > 0, M is M - 1, nth(M, [4, 1], X).`

`| -`

`...`

Was ist hier schief gelaufen?

**Test 224** Begründe warum die folgende Aussage korrekt oder falsch ist: Beim Berechnen der Unstimmigkeitsmenge kann folgendes Ergebnis herauskommen:

$$\{g(X, Y), g(Y, X)\}.$$

**Test 225** Gegeben sei folgendes Prolog-Programm.

`append([], L, L).`

`append([E|R], L, [E|RL]) :- append(R, L, RL).`

Es wird die Anfrage `?- append(X, Y, [1, 2]).` gestellt. Beim Anwenden der zweiten Regel wurde die Substitution

$$\sigma_1 = \{X \mapsto [E_1, R_1], Y \mapsto L_1, E_1 \mapsto 1, RL_1 \mapsto [2]\}$$

berechnet. Ist diese Substitution ein Unifikator für `append(X, Y, [1, 2])` und

`append([E1|R1], L1, [E1|RL1])`, der aus dem Unifikationsalgorithmus entstanden ist?

**Test 226** Was verbirgt sich hinter dem Begriff „Negation als Fehlschlag“?

**Test 227** Wann ist `\+ p` beweisbar?

**Test 228** Wieso stimmt die Negation als Fehlschlag nicht mit der prädikatenlogischen Negation überein?

**Test 229** Warum sollte `p` keine freien Variablen enthalten, wenn wir `\+ p` beweisen wollen? Wieso ergibt sich daraus die Empfehlung, dass Negationen soweit wie möglich rechts in einer Regel stehen sollten?

**Test 230** Wie sind die Variablen `X`, `Y` in der folgenden Regel quantifiziert?

`p(X) :- q(X, Y).`

**Test 231** Nutze  $\forall x : p \Leftrightarrow \neg(\exists x : \neg p)$ , um ein Prädikat `forall/2` zu definieren.

Mithilfe dieses Prädikates soll es möglich sein, folgende Anfrage auszudrücken.

`?- forall(member(X, [1, 2, 3]), X > 0).`

Die Anfrage bedeutet, für alle  $x \in \{1, 2, 3\}$  gilt  $x > 0$ .

Wie können wir mit `forall` die Definition von `not_member` aus [Test 167](#) reparieren?

**Test 232** Wofür verwenden wir den Cut-Operator konzeptionell?

**Test 233** Wann ist `p` in `p :- q, !, r.` beweisbar? Was ist insbesondere der Fall, wenn `q` beweisbar ist?

**Test 234** Wir ergibt sich aus der Semantik des Cut-Operators ein Fallunterscheidungs-Konstrukt?

**Test 235** Wie können wir mithilfe des Cut-Operators die Negation als Fehlschlag implementieren?

**Test 236** Wie wirkt sich der Cut-Operator auf die Struktur eines SLD-Baums aus?

Hier sind ein paar Logik-Puzzle, die zu deiner Belustigung dienen. Der Lerneffekt ist voraussichtlich sehr gering.

**Challenge 21** Das Zebra-Rätsel ist ein Logikpuzzle.

So wird es auf Wikipedia wiedergegeben:

1. Es gibt fünf Häuser.
2. Der Engländer wohnt im roten Haus.
3. Der Spanier hat einen Hund.
4. Kaffee wird im grünen Haus getrunken.
5. Der Ukrainer trinkt Tee.
6. Das grüne Haus ist direkt rechts vom weißen Haus.
7. Der Raucher von Old-Gold-Zigaretten hält Schnecken als Haustiere.
8. Die Zigaretten der Marke Kools werden im gelben Haus geraucht.
9. Milch wird im mittleren Haus getrunken.
10. Der Norweger wohnt im ersten Haus.
11. Der Mann, der Chesterfield raucht, wohnt neben dem Mann mit dem Fuchs.
12. Die Marke Kools wird geraucht im Haus neben dem Haus mit dem Pferd.
13. Der Lucky-Strike-Raucher trinkt am liebsten Orangensaft.
14. Der Japaner raucht Zigaretten der Marke Parliaments.
15. Der Norweger wohnt neben dem blauen Haus.

Wer trinkt Wasser? Wem gehört das Zebra?

Löse dieses Puzzle mithilfe von Prolog und übersetze dabei so wenig logische Schlüsse, die du selbst in deinem Kopf machst, in deinem Programm.

**Challenge 22** Ein Logikpuzzle, das einst viral ging, ist bekannt als „Cheryl’s Geburtstag“. Es ist das erste Puzzle aus dem paper Cheryl’s Birthday. Löse dieses Puzzle mithilfe von Prolog und übersetze dabei so wenig logische Schlüsse, die du selbst in deinem Kopf machst, in deinem Programm.

## Hinweise zu Tests und Challenges

### Hinweis zu Challenge 1

- Zur Darstellung der Multimengen eignen sich sortierte Listen gut.
- Zur Berechnung des Schnittes können zwei sortierte Listen parallel durchlaufen werden. Wenn zwei gleiche Elemente zu Beginn der Liste stehen, wird eines der Elemente zum Ergebnis hinzugefügt. Im anderen Fall überspringen wir das jeweils kleinere Element der beiden.

**Hinweis zu Challenge 5** Nach  $n$  enqueue-Operationen in eine leere queue sieht diese wie folgt aus

`Q [] [xn, ..., x1].`

Wenn als Nächstes dequeue-Operationen naiv ausgeführt werden, müssten wir die enqueue-Liste jedes Mal vollständig durchlaufen. Wenn wir die dequeue-Liste entsprechend verändern, können wir mindestens die nächsten  $n$  dequeue-Operationen effizient durchführen.

**Hinweis zu Challenge 10** Wenn du Anlaufschwierigkeiten hast, helfen dir möglicherweise diese ersten Implementierungen weiter.

```
instance Num a => Num (D a) where
  D x1 d1 + D x2 d2 = D (x1 + x2) (d1 + d2) -- Summenregel
  -- ...

instance Fractional a => Fractional (D a) where
  -- ...

instance Floating a => Floating (D a) where
  exp (D x d) = D (exp x) (d * exp x) -- Kettenregel und exp'(x) = exp(x)
  -- ...
```

**Hinweis zu Challenge 15** Die Rekursionsvorschrift ist gegeben durch

$$\text{pathsum}(i, j) = \begin{cases} G_{0,0} & \text{falls } (i, j) = (0, 0) \\ G_{i,0} + \text{pathsum}(i-1, 0) & \text{falls } j = 0 \\ G_{0,j} + \text{pathsum}(0, j-1) & \text{falls } i = 0 \\ G_{i,j} + \min(\text{pathsum}(i-1, j), \text{pathsum}(i, j-1)) & \text{sonst} \end{cases}$$

für  $i \in \{0, \dots, m-1\}, j \in \{0, \dots, n-1\}$ . Die minimale Pfadsumme ist dann  $\text{pathsum}(m-1, n-1)$ .

**Hinweis zu Test 136** Die Implementierung dieser Monade ist sehr ähnlich zu der Implementierung der **Reader**-Monade, wie sie in [Test 135](#) angegeben ist.

**Hinweis zu Challenge 16** Das Identitätsgesetz wäre verletzt, wenn man `pure` wie gegeben definieren würde. Betrachte folgendes Gegenbeispiel.

```
pure id      <*> ZipList [1, 2]
== ZipList [id] <*> ZipList [1, 2]
== ZipList [1]
/= ZipList [1, 2]
```

Es muss also dafür gesorgt sein, dass es genügend `ids` in der linken **ZipList** gibt.

**Hinweis zu Challenge 17** Falls du es nicht geschafft hast, in [Test 149](#) `sequence` zu implementieren, kannst du diese Implementierung verwenden.

```
sequence :: [s -> (a, s)] -> s -> ([a], s)
sequence []      s = ([], s)
sequence (f:fs) s = let (y, s') = f s
```

```
(ys, s'') = sequence fs s'  
in (y:ys, s'')
```

## Weitere Ressourcen

Wenn du auf der Suche nach weiteren Übungsaufgaben bist, mit denen du deine Programmierkenntnisse in Prolog verbessern möchtest, bietet sich die Liste [P-99: Ninety-Nine Prolog Problems](#) an. Lösungen sind ebenso auf der Seite verfügbar. Für Haskell gibt es eine ähnliche Seite [H-99: Ninety-Nine Haskell Problems](#).

Weitere Links:

- [Learn You A Haskell](#)
- [Haskelite](#): Ein Schritt-für-Schritt Interpreter für (eine Teilmenge von) Haskell
- [Functors, Applicatives, And Monads In Pictures](#)
- [Haskell Cheatsheet](#)
- [Prolog Cheatsheet](#)

## Appendix

Bisher findest du hier im Anhang des Dokuments Bemerkungen zu verschiedenen Tests oder Challenges. Du kannst alles ignorieren, was hier steht. Die Bemerkungen sind aus Neugier entstanden und sollen letztendlich in dir höchstens ein „Interessant! 🤔“ auslösen. Danach darfst du direkt wieder vergessen, was hier steht.

**Bemerkung 1** In [Challenge 10](#) wurden Funktionen `d1`, `d2` und `d3` definiert. Diese ver- und entschachteln `D`-Werte unterschiedlich tief. Mit verschiedenen Haskell-Spracherweiterungen können wir eine allgemeinere Funktion angeben. Mit `derive @3 cos (2.0 :: Double)` können wir jetzt z.B. die dritte Ableitung des Cosinus an der Stelle 2 berechnen.

```
{-# LANGUAGE TypeFamilies #-}
{-## LANGUAGE DataKinds #-}
{-## LANGUAGE UndecidableInstances #-}
{-## LANGUAGE AllowAmbiguousTypes #-}
{-## LANGUAGE FunctionalDependencies #-}

import Data.Kind
import GHC.TypeLits

data D a = D a a

-- Hier könnten deine Num-, Fractional- und Floating-Typklasseninstanzen
-- stehen!

class Derivable (n :: Nat) b where
  type Derivative n b
  derive :: (Derivative n b → Derivative n b) → b → b

instance (Wrap (NatToPeano n) b, Unwrap (DK (NatToPeano n) b) b) ⇒ Derivable n b
where
  type Derivative n b = DK (NatToPeano n) b
  derive f x = unwrap (f (wrap @(NatToPeano n) x))

data Peano = Z | S Peano

type family NatToPeano (n :: Nat) where
  NatToPeano 0 = Z
  NatToPeano k = S (NatToPeano (k - 1))

type family DK p a where
  DK Z a = a
  DK (S k) a = D (DK k a)

class Wrap n t where
  wrap :: t → DK n t

instance Wrap Z t where
  wrap x = x

instance (Wrap n t, Num (DK n t)) ⇒ Wrap (S n) t where
  wrap x = D (wrap @n x) 1

class Unwrap a b | a → b where
  unwrap :: a → b

instance (Num a) ⇒ Unwrap a a where
```

```
unwrap x = x
```

```
instance (Unwrap a b, Num a) => Unwrap (D a) b where
  unwrap (D _ d) = unwrap d
```

**Bemerkung 2** In [Test 72](#) haben wir gesehen, wie deklarative Programmierkonzepte aus Haskell in Python verwendet werden können. In Java haben diese über die letzten Jahre auch einen Platz gefunden. Hier ist das Programm in Java (ohne gecurryte Funktionen und partielle Applikation).

```
import java.util.*;
import java.util.function.*;

interface Numeric<T> {
  T zero();
  T add(T a, T b);

  public static Numeric<Integer> integer() {
    return new Numeric<>() {
      public Integer zero() { return 0; }
      public Integer add(Integer a, Integer b) { return a + b; }
    };
  }
}

interface Foldable<T> {
  <R> R foldr(R initial, BiFunction<T, R, R> function);

  default List<T> toList() {
    return foldr(new LinkedList<>(), (value, list) -> {
      list.add(value);
      return list;
    });
  }

  default int length() { return foldr(0, (_, result) -> result + 1); }

  default boolean contains(T value) {
    return foldr(false, (other, result) -> result || other.equals(value));
  }

  default T sum(Numeric<T> numeric) {
    return foldr(numeric.zero(), numeric::add);
  }
}

sealed interface Tree<T> extends Foldable<T>
  permits Empty, Node {}

record Empty<T>() implements Tree<T> {
  @Override
  public <R> R foldr(R initial, BiFunction<T, R, R> function) {
    return initial;
  }
}

record Node<T>(Tree<T> left, T value, Tree<T> right) implements Tree<T> {
  @Override
  public <R> R foldr(R initial, BiFunction<T, R, R> function) {
```

```

    R x = right.foldr(initial, function);
    R y = function.apply(value, x);
    return left.foldr(y, function);
}
}

public class Main {
    public static void main(String[] args) {
        Tree<Integer> tree = new Node<>(
            new Empty<>(),
            3,
            new Node<>(new Node<>(new Empty<>(), 7, new Empty<>()), 4, new Empty<>())
        );

        System.out.println(tree.sum(Numeric.integer())); // 14
        System.out.println(tree.toList()); // [4, 7, 3]
        System.out.println(tree.length()); // 3
        System.out.println(tree.contains(3)); // true
        System.out.println(tree.contains(9)); // false
    }
}

```