

## Lösungshinweise/-vorschläge zum Übungsblatt 12: Konzepte der Programmierung (WS 2025/26)

**Studie Darstellung Fehlermeldungen** Wir haben an einer alternativen Darstellung der Fehlermeldungen in ExClaim gearbeitet. Diese Woche bekommen Gruppen 2, 4, 6, 8, 10 Fehlermeldungen wie gewohnt dargestellt, während Gruppen 1, 3, 5, 7, 9 und 11 die alternative Darstellung bekommen. Wir aggregieren Daten über diese Gruppen zur Verwendung der Testfunktion in ExClaim.

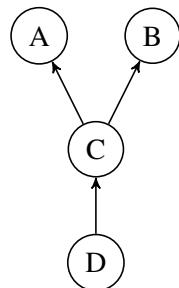
### Aufgabe 1 Untertypen (Präsenzaufgabe)

*Motivation:* In dieser Aufgabe sollen Sie sich mit Untertypbeziehungen beschäftigen. Sie können sich an den Vorlesungsfolien 901 bis 969 sowie an den Kapiteln 8.1 und 8.2 im Skript orientieren.

Es gelten die Untertypbeziehungen  $D \leq C$ ,  $C \leq A$  und  $C \leq B$ , die in der nebenstehenden Abbildung visualisiert sind.

In der folgenden Tabelle werden je zwei Typen in Relation gesetzt:

- $t_1 < t_2$  bedeutet, dass  $t_1$  ein Untertyp von  $t_2$  ist ( $t_1 \leq t_2$ ), nicht jedoch  $t_2$  ein Untertyp von  $t_1$ .
- $t_1 > t_2$  bedeutet, dass  $t_2$  ein Untertyp von  $t_1$  ist ( $t_2 \leq t_1$ ), nicht jedoch  $t_1$  ein Untertyp von  $t_2$ .
- $t_1 \parallel t_2$  bedeutet, dass  $t_1$  und  $t_2$  unvergleichbar sind, das heißt es gilt weder  $t_1 \leq t_2$  noch  $t_2 \leq t_1$ .



Füllen Sie die Lücken in der Tabelle aus. In der ersten und dritten Spalte müssen Sie einen Typ eintragen, in der zweiten Spalte eine Relation ( $<$  oder  $>$  oder  $\parallel$ ).

*Zur Erinnerung:* Die folgenden Deduktionsregeln gelten für die Relation  $\leq$ :

$$\frac{t_1 \leq t_2 \quad t_2 \leq t_3}{t_1 \leq t_3} \qquad \frac{t_1 \leq t'_1 \quad t_2 \leq t'_2}{t_1 * t_2 \leq t'_1 * t'_2} \qquad \frac{t'_1 \leq t_1 \quad t_2 \leq t'_2}{t_1 \rightarrow t_2 \leq t'_1 \rightarrow t'_2}$$

<b>t<sub>1</sub></b>	<b>Relation</b>	<b>t<sub>2</sub></b>
$D$	$\lhd$	$A$
$[A]$ oder $[B]$	$\succ$	$C$
$A * C$	$\prec$	$[A * A]$ oder $[A * B]$
$A * B$	$\parallel$	$B * A$
$C * D$	$\succ$	$[D * D]$
$A \rightarrow C$	$\lhd$	$C \rightarrow C$
$B \rightarrow D$	$\lhd$	$C \rightarrow C$
$C \rightarrow D$	$\succ$	$[A \rightarrow D]$ oder $[B \rightarrow D]$
$C \rightarrow A$	$\succ$	$B \rightarrow D$
$D \rightarrow A$	$\parallel$	$C \rightarrow B$

## Aufgabe 2 Mini CAS (Einreichaufgabe, 30 Punkte)

*Motivation:* In dieser Aufgabe sollen Sie ein Problem sowohl funktional als auch objektorientiert implementieren und beide Modelle miteinander vergleichen.

*Schreiben Sie Ihre Lösungen in die Datei calculus.fs aus der Vorlage Aufgabe-12-2.zip.*

Bei ihrem Job als Mathe-Nachhilfelehrerin muss Lisa Lista viele Aufgaben korrigieren. Um sich die Arbeit etwas zu erleichtern, beschließt sie ein kleines Computer Algebra System (CAS) zu entwickeln, mit dem sie Ableitungen von einigen eindimensionalen Funktionen symbolisch bestimmen kann.

Lisa Lista schwebt folgende funktionale Modellierung vor:

```
type Function =
| Const of Nat           // Konstante Funktion   f(x) = c
| Id                     // Identität           f(x) = x
| Add of Function * Function // Addition           f(x) = g(x) + h(x)
| Mul of Function * Function // Multiplikation   f(x) = g(x) * h(x)
| Pow of Function * Nat    // Potenz             f(x) = g(x) ^ n
| Comp of Function * Function // Komposition      f(x) = g(h(x))
```

Die Idee ist, dass jedes Element vom Typ `Function` eine reelle Funktion in unserem CAS repräsentiert, die wir jedoch nur an den Stellen der natürlichen Zahlen ( $\mathbb{R} \cap \mathbb{N}$ ) auswerten (damit sind Ableitungen wie gewohnt definiert und wir vermeiden es in F# Fließkommazahlen zu verwenden).

So repräsentiert zum Beispiel `Constant 1N` die Funktion  $f(x) = 1$ , `Id` repräsentiert  $f(x) = x$ , `Add (Id, Constant 2N)` repräsentiert  $f(x) = x + 2$ , `Mul (Id, Constant 2N)` repräsentiert  $f(x) = x \cdot 2$  und `Add (Mul(Id, Id), Mul(Constant 2N, Id))` repräsentiert  $f(x) = x \cdot x + 2 \cdot x$ .

Außerdem können wir Funktionen mit `Comp` verketten, zum Beispiel repräsentiert `Mul(Comp(Pow(Id, 2N), Add(Id, Constant 3N)), Add(Id, Constant 4N))` die Funktion  $f(x) = (x + 3)^2 \cdot (x + 4)$ . Das erste Argument bezeichnet also die äußere Funktion, das zweite Argument die innere Funktion.

Lisa Lista möchte für ihr CAS drei Operationen (F#-Funktionen) implementieren:

- `toString: Function -> String` stellt die gegebene CAS-Funktion (korrekt geklammert) als String dar.
- `apply: Function -> Nat -> Nat` nimmt eine CAS-Funktion `f` sowie eine natürliche Zahl `n` und berechnet das Ergebnis von `f` angewendet auf `n`.
- `derive: Function -> Function` berechnet die Ableitung der gegebenen CAS-Funktion.

Harry Hacker schlägt eine objektorientierte Modellierung vor und präsentiert folgende Schnittstelle:

```
type IFunction =
abstract member ToString: unit -> string
abstract member Apply: Nat -> Nat
abstract member Derive: unit -> IFunction
```

Er möchte dann für jede Art von unterstützter CAS-Funktion einen Objektkonstruktor implementieren, also eine F#-Funktion die ein Objekt vom Typ `IFunction` zurückgibt.

Lisa Lista und Harry Hacker haben bereits begonnen, das CAS zu implementieren. Sie finden den unfertigen Code im Template zu dieser Aufgabe. Beide haben die Operationen zur Darstellung als String und zum Anwenden der Funktion für die konstante Funktion, die Identität und die Addition bereits umgesetzt. Es fehlen noch Multiplikation, Potenz und Verkettung sowie die Berechnung der Ableitung.

*Hinweis:* Wir testen in ExClaim auf Äquivalenz statt Gleichheit bezüglich unserer Referenzimplementierung. Insbesondere dürfen Sie bei `toString` überflüssige Klammern weglassen. Des Weiteren dürfen Sie bei `derive` arithmetische Simplifikationen durchführen.

- a) Erweitern Sie beide Modelle um Multiplikation, Potenz und Verkettung. Für Lisas funktionales Modell müssen Sie dazu zunächst in der Typdefinition die drei vorbereiteten Zeilen aktivieren.

*Hinweise:* Stellen Sie die Potenzfunktion mit dem Zeichen  $\wedge$  dar, die Funktion Pow (Id, 2N) demnach als  $x^2$ . Zur Implementierung von apply können Sie den F#-Operator  $^{**}$  verwenden. Zur Darstellung der Funktionskomposition wird üblicherweise das Zeichen  $\circ$  verwendet, nutzen Sie der Einfachheit halber den Kleinbuchstaben o.

## Funktionales Modell

Zusätzliche Fälle für `toString`:

```
| Mul (f1, f2)  -> "(" + toString f1 + " * " + toString f2 + ")"
| Pow (f1, n)   -> toString f1 + " ^ " + show n
| Comp (f1, f2) -> "(" + toString f1 + " o " + toString f2 + ")"
```

Zusätzliche Fälle für `apply`:

```
| Mul (f1, f2)  -> apply f1 x * apply f2 x
| Pow (f1, n)   -> apply f1 x ** n
| Comp (f1, f2) -> apply f1 (apply f2 x)
```

## Objektorientiertes Modell (die `Derive` members sind bereits für die nächste Teilaufgabe)

```
let rec mul (f1: IFunction, f2: IFunction): IFunction =
  { new IFunction with
    member self.ToString (): String =
      "(" + f1.ToString () + " * " + f2.ToString () + ")"
    member self.Apply (x: Nat): Nat =
      f1.Apply(x) * f2.Apply(x)
    member self.Derive (): IFunction =
      add (mul (f1.Derive(), f2), mul (f1, f2.Derive()))
  }

let rec pow (f1: IFunction, n: Nat): IFunction =
  { new IFunction with
    member self.ToString (): String =
      f1.ToString () + " ^ " + show n
    member self.Apply (x: Nat): Nat =
      f1.Apply(x) ** n
    member self.Derive (): IFunction =
      mul (mul (constant n, pow (f1, (n-1N))), f1.Derive())
  }

let rec comp (f1: IFunction, f2: IFunction): IFunction =
  { new IFunction with
    member self.ToString (): String =
      "(" + f1.ToString () + " o " + f2.ToString () + ")"
    member self.Apply (x: Nat): Nat =
      f1.Apply(f2.Apply(x))
    member self.Derive (): IFunction =
      mul (comp (f1.Derive(), f2), f2.Derive())
  }
```

- b) Erweitern Sie beide Modelle um die Berechnung der Ableitung. Für Harrys objektorientiertes Modell müssen Sie dazu zunächst in der Schnittstellendefinition die vorbereitete Zeile aktivieren.

*Hinweise:* Für die Ableitungsregeln können Sie Ihr altes Mathematik-Schulbuch oder eine Formelsammlung konsultieren. Denken Sie an die Produktregel und die Kettenregel!

## Funktionales Modell

```
let rec derive (f: Function): Function =
  match f with
  | Const n    -> Const 0N
  | Id          -> Const 1N
  | Add (f1, f2) -> Add (derive f1, derive f2)
  | Mul (f1, f2) -> Add (Mul (derive f1, f2), Mul (f1, derive f2))
  | Pow (f1, n)  -> Mul (Mul (Const n, Pow (f1, n - 1N)), derive f1)
  | Comp (f1, f2) -> Mul (Comp (derive f1, f2), derive f2)
```

## Objektorientiertes Modell (siehe auch Lösung der vorherigen Teilaufgabe)

Erweiterung von const

```
  member self.Derive (): IFunction = constant 0N
```

Erweiterung von id

```
  member self.Derive (): IFunction = constant 1N
```

Erweiterung von add

```
  member self.Derive (): IFunction = add (f1.Derive(), f2.Derive())
```

c) Nachdem Sie sowohl das funktionale als auch das objektorientierte Modell erweitert haben, beantworten Sie dazu folgende Fragen. Begründen Sie Ihre Antworten (jeweils maximal 50 Wörter).

1. Welches der Modelle lässt sich leichter um zusätzliche Operationen (apply, toString, derive) erweitern?

Das funktionale Modell, weil man hier lediglich neue F#-Funktionen hinzufügen muss und keine Änderung der bisherigen Definitionen notwendig ist.

2. Welches der Modelle lässt sich leichter um zusätzliche Arten von CAS-Funktionen (constant, id, add, mul, pow, comp) erweitern?

Das objektorientierte Modell, weil man hier lediglich neue Objektkonstruktoren hinzufügen muss und keine Änderung der bisherigen Definitionen notwendig ist.

3. Welches der Modelle ist im Bezug auf künftige Erweiterungen unseres CAS die bessere Wahl?

Es ist wahrscheinlicher, dass zusätzliche Arten von Funktionen ergänzt werden (denkbar wären beispielsweise trigonometrische Funktionen wie Sinus und Cosinus), daher ist das objektorientierte Modell die bessere Wahl.

## Aufgabe 3 Untertypen (Trainingsaufgabe)

*Motivation:* In dieser Aufgabe sollen Sie die Regeln der statischen Semantik von Schnittstellen und Untertypen einüben. Sie können sich an den Vorlesungsfolien 899 bis 967 sowie an den Kapiteln 8.1 und 8.2 im Skript orientieren.

```

type A =
  interface
    abstract member f: Unit -> Nat
  end

type B =
  interface
    inherit A
    abstract member g: Nat -> String
  end

type C =
  interface
    inherit A
    abstract member h: String -> Nat
  end

type D =
  interface
    inherit C
    abstract member i: Nat -> Unit
  end

```

Verwenden Sie die Schnittstellentypdefinitionen von oben, um den Typ der folgenden Ausdrücke mit einem vollständigen Beweisbaum anzugeben. Benutzen Sie die Regeln der **statischen Semantik** aus der Vorlesung.

a) **fun** (s : B \* D) -> ((snd s) :> C).h ((fst s).g 1N)

Verwende  $\Sigma := \{s \mapsto B * D\}$

$$\frac{\frac{\frac{\Sigma \vdash s : B * D}{\Sigma \vdash \text{snd } s : D} \quad D \leq C}{\Sigma \vdash (\text{snd } s) :> C : C} \quad \frac{\Sigma \vdash s : B * D}{\Sigma \vdash \text{fst } s : B} \quad \frac{\Sigma \vdash 1N : \text{Nat}}{\Sigma \vdash 1N : \text{String}}}{\Sigma \vdash (\text{fst } s).g : \text{Nat} \rightarrow \text{String}} \quad \frac{\Sigma \vdash (\text{fst } s).g : \text{Nat} \rightarrow \text{String}}{\Sigma \vdash (\text{fst } s).g 1N : \text{String}}
 }{\Sigma \vdash ((\text{snd } s) :> C).h : \text{String} \rightarrow \text{Nat}}$$

$$\frac{\Sigma \vdash ((\text{snd } s) :> C).h : \text{String} \rightarrow \text{Nat}}{\Sigma \vdash ((\text{snd } s) :> C).h ((\text{fst } s).g 1N) : \text{Nat}}$$

$$\frac{}{\emptyset \vdash \text{fun} (s : B * D) -> ((\text{snd } s) :> C).h ((\text{fst } s).g 1N) : B * D \rightarrow \text{Nat}}$$

b) **fun** (s: A -> D) -> (**fun** (b: B) -> (s b).f ())

Verwende  $\Sigma := \{s \mapsto A \rightarrow D, b \mapsto B\}$

$$\frac{\frac{\frac{\Sigma \vdash s : A \rightarrow D}{\frac{\frac{B \leq A}{\Sigma \vdash A \rightarrow D} \quad \frac{\frac{D \leq C}{\Sigma \vdash A \rightarrow D \leq B \rightarrow A} \quad \frac{C \leq A}{\Sigma \vdash s : B \rightarrow A}}{\Sigma \vdash s : B \rightarrow A}}{\Sigma \vdash b : B}}{\Sigma \vdash s \ b : A} \quad \frac{\Sigma \vdash () : \text{Unit}}{\Sigma \vdash () : \text{Unit} \rightarrow \text{Nat}}}{\Sigma \vdash (s \ b).f : \text{Unit} \rightarrow \text{Nat}} \quad \frac{\Sigma \vdash () : \text{Unit}}{\Sigma \vdash () : \text{Nat}}
 }{\Sigma \vdash (s \ b).f () : \text{Nat}}$$

$$\frac{\Sigma \vdash (s \ b).f () : \text{Nat}}{\{s \mapsto A \rightarrow D\} \vdash \text{fun} (b : B) -> (s b).f () : A \rightarrow D \rightarrow \text{Nat}}$$

$$\frac{}{\emptyset \vdash \text{fun} (s : A \rightarrow D) -> (\text{fun} (b : B) -> (s b).f ()) : (A \rightarrow D) \rightarrow (B \rightarrow \text{Nat})}$$