

Tutorium 05: λ -Kalkül

David Kaufmann

30. November 2022

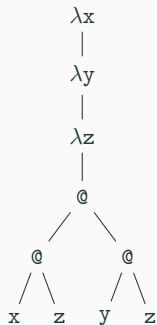
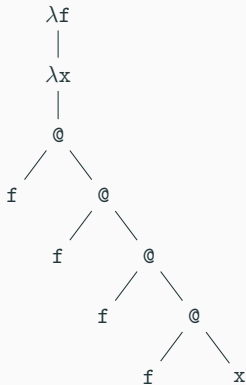
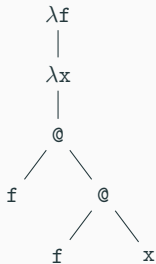
Tutorium Programmierparadigmen am KIT

Übungsblatt 4

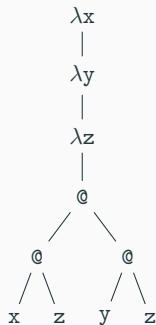
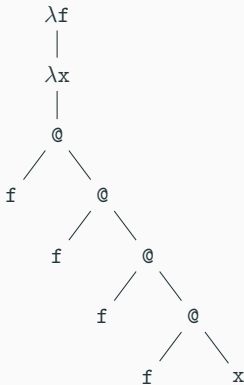
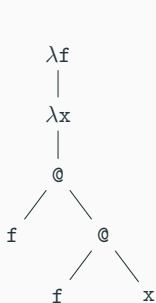
Wiederholung

- Terme t : Variable (x), Funktion ($\lambda x.t$), Anwendung ($t\ t$)
- α -Äquivalenz: Gleiche Struktur
- η -Äquivalenz: Unterversorgung
- *Freie Variablen, Substitution, RedEx*
- β -Reduktion:
 $(\lambda p.b)\ t \Rightarrow b[p \rightarrow t]$

λ -Terme sind Bäume

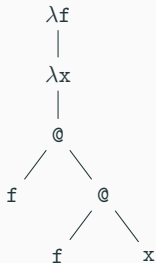


λ -Terme sind Bäume

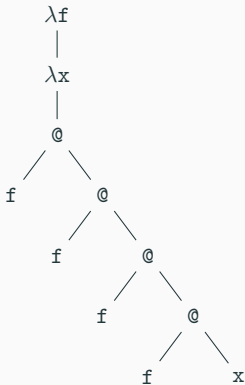


$\lambda f. \lambda x. f (f x)$

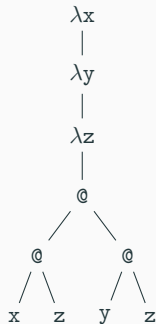
λ -Terme sind Bäume



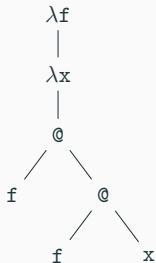
$\lambda f. \lambda x. f (f x)$



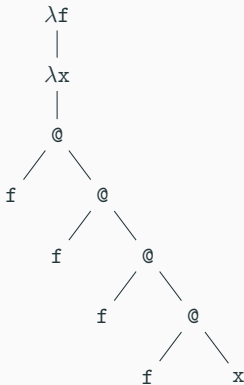
$\lambda f. \lambda x. f (f (f (f x)))$



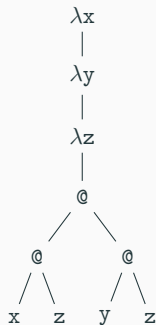
λ -Terme sind Bäume



$\lambda f. \lambda x. f (f x)$



$\lambda f. \lambda x. f (f (f (f x)))$



$\lambda x. \lambda y. \lambda z. x z (y z)$

Church-Zahlen

$$c_0 \quad \quad \quad = ?$$

$$c_1 \quad \quad \quad = s(c_0)$$

$$c_2 \quad \quad \quad = s(s(c_0))$$

$$c_3 \quad \quad \quad = s(s(s(c_0)))$$

$$c_8 \quad = s(s(s(s(s(s(s(s(s(c_0))))))))))$$

1. Die 0 ist Teil der natürlichen Zahlen
2. Wenn n Teil der natürlichen Zahlen ist,
ist auch $s(n) = n + 1$ Teil der natürlichen Zahlen

- „Zahlen“ im λ -Kalkül werden durch Funktionen in Normalform dargestellt
- $c_n f x = f$ n -mal angewendet auf x
- Bspw. $(c_3 g y) = g (g (g y)) = g^3 y$
Mit $c_3 = \lambda f. \lambda x. f (f (f x))$
- Schreibt eine λ -Funktion *succ*, die eine Church-Zahl nimmt und zu deren Nachfolger auswertet

- „Zahlen“ im λ -Kalkül werden durch Funktionen in Normalform dargestellt
- $c_n f x = f$ n -mal angewendet auf x
- Bspw. $(c_3 g y) = g (g (g y)) = g^3 y$
Mit $c_3 = \lambda f. \lambda x. f (f (f x))$
- Schreibt eine λ -Funktion *succ*, die eine Church-Zahl nimmt und zu deren Nachfolger auswertet

$$\text{succ} = \lambda n. \lambda s. \lambda z. s (n s z)$$

Auswertungsstrategien

$$\begin{array}{c} \text{Redex 1} \\ \underbrace{\hspace{10em}} \\ \text{Redex 2} \\ \underbrace{\hspace{5em}} \\ \underline{\text{succ}} \ (\underline{\text{succ}} \ c_0) \end{array}$$

mit

$$\begin{aligned} c_0 &= \lambda s. \lambda z. z \\ \text{succ} &= \lambda n. \lambda s. \lambda z. s \ (n \ s \ z) \end{aligned}$$

- Welcher Redex soll zuerst ausgewertet werden?
- \rightsquigarrow verschiedene Auswertungsstrategien

$$\begin{aligned} & \underline{\text{succ}} (\underline{\text{succ}} c_0) \\ \Rightarrow_{\beta} & \lambda s. \lambda z. s ((\underline{\text{succ}} c_0) s z) \\ \Rightarrow_{\beta} & \lambda s. \lambda z. s (\underline{((\lambda s. \lambda z. s (\underline{c_0} s z))) s z}) \\ \Rightarrow_{\beta}^2 & \lambda s. \lambda z. s (s (\underline{c_0} s z)) \\ \Rightarrow_{\beta}^2 & \lambda s. \lambda z. s (s z) \not\Rightarrow \end{aligned}$$

Normalreihenfolge: Linkester Redex zuerst.

$$\begin{array}{c} \underline{\text{succ}} (\underline{\text{succ}} c_0) \\ \Rightarrow_{\beta} \quad \lambda s. \lambda z. s ((\underline{\text{succ}} c_0) s z) \not\Rightarrow_{\text{CbN}} \end{array}$$

Call-by-Name: Linkester Redex zuerst, aber:

- Funktionsinhalte werden nicht weiter reduziert
- \leadsto Betrachte nur Redexe, die nicht von einem λ umgeben sind
- So funktioniert auch Laziness in Haskell (grob)

$$\begin{aligned} & \underline{\text{succ}} (\underline{\text{succ}} c_0) \\ \Rightarrow_{\beta} & \underline{\text{succ}} (\lambda s. \lambda z. s (\underline{c_0} s z)) \\ \Rightarrow_{\beta} & \lambda s. \lambda z. \underline{(\lambda s. \lambda z. s (\underline{c_0} s z))} s z \not\Rightarrow_{\text{CbV}} \end{aligned}$$

Call-by-Value: Linkester Redex zuerst, aber:

- Funktionsinhalte werden nicht weiter reduziert
- \leadsto Betrachte nur Redexe, die nicht von einem λ umgeben sind
- Berechne Argumente vor dem Einsetzen
- \leadsto Betrachte nur Redexe, deren Argument *unter CbV* nicht weiter reduziert werden muss

- Auswertungsstrategien (von lässig nach streng):
 - *Volle β -Reduktion*
 - *Normalreihenfolge*
 - *Call-by-Name*
 - *Call-by-Value*
- Datenstrukturen:
 - *Church-Booleans*
 - *Church-Zahlen*
 - *Church-Listen*
- Rekursion durch *Y-Kombinator*

Klausuraufgaben zum λ -Kalkül

$$S = \lambda x. \lambda y. \lambda z. x z (y z)$$

$$K = \lambda x. \lambda y. x$$

$$I = \lambda x. x$$

- SKI-Kalkül kann alles, was λ -Kalkül auch kann, allein mit den Kombinatoren S , K und I
- Definiere $U = \lambda x. x S K$
- Aufgabe: Beweise, dass man S , K und I durch U darstellen kann:

$$S = \lambda x. \lambda y. \lambda z. x z (y z)$$

$$K = \lambda x. \lambda y. x$$

$$I = \lambda x. x$$

- SKI-Kalkül kann alles, was λ -Kalkül auch kann, allein mit den Kombinatoren S , K und I
- Definiere $U = \lambda x. x S K$
- Aufgabe: Beweise, dass man S , K und I durch U darstellen kann:

- $U U x \xRightarrow{?} x$
- $U (U (U U)) = U (U I) \xRightarrow{?} K$
- $U (U (U (U U))) = U K \xRightarrow{?} S$

$$\text{pair} = \lambda a. \lambda b. \lambda f. f \ a \ b$$

$$\text{fst} = \lambda p. p \ (\lambda x. \lambda y. x)$$

$$\text{snd} = \lambda p. p \ (\lambda x. \lambda y. y)$$

$$\text{fst} \ (\text{pair} \ a \ b) = \quad \quad \quad a$$

$$\text{snd} \ (\text{pair} \ a \ b) = \quad \quad \quad b$$

- Schreibe `curry` und `uncurry`, sodass:
 - $(\text{curry } f) \ a \ b = f \ (\text{pair } a \ b)$
 - $(\text{uncurry } g) \ (\text{pair } a \ b) = g \ a \ b$

$$\text{nil} = \lambda n. \lambda c. n$$

$$\text{cons} = \lambda x. \lambda xs. \lambda n. \lambda c. (c \times xs)$$

- Schreibe *head* und *tail*, sodass:

- $\text{head} (\text{cons } A \ B) \xRightarrow{*} A$
- $\text{tail} (\text{cons } A \ B) \xRightarrow{*} B$

$$\text{nil} = \lambda n. \lambda c. n$$

$$\text{cons} = \lambda x. \lambda xs. \lambda n. \lambda c. (c \ x \ xs)$$

- Schreibe *head* und *tail*, sodass:

- $\text{head} (\text{cons } A \ B) \xRightarrow{*} A$

- $\text{tail} (\text{cons } A \ B) \xRightarrow{*} B$

- Schreibe *replicate*, sodass:

- $\text{replicate } c_n \ A = \underbrace{\text{cons } A \ (\text{cons } A \ \dots (\text{cons } A \ \text{nil}))}_{n \text{ mal}}$

- Erinnerung: $c_n \ f \ x = \underbrace{f \ (f \ \dots (f \ x))}_{n \text{ mal}}$

$$\text{nil} = \lambda n. \lambda c. n$$

$$\text{cons} = \lambda x. \lambda xs. \lambda n. \lambda c. (c \ x \ xs)$$

- Schreibe *head* und *tail*, sodass:

- $\text{head} (\text{cons } A \ B) \xRightarrow{*} A$

- $\text{tail} (\text{cons } A \ B) \xRightarrow{*} B$

- Schreibe *replicate*, sodass:

- $\text{replicate } c_n \ A = \underbrace{\text{cons } A \ (\text{cons } A \ \dots (\text{cons } A \ \text{nil}))}_{n \text{ mal}}$

- Erinnerung: $c_n \ f \ x = \underbrace{f \ (f \ \dots (f \ x))}_{n \text{ mal}}$

- Werte aus: $\text{replicate } c_3 \ A \xRightarrow{*} ?$