

PROGRAMMIERUNG

ÜBUNG 6: λ -KALKÜL (TEIL 1)

Eric Kunze

`eric.kunze@mailbox.tu-dresden.de`

1. Funktionale Programmierung
 - 1.1 Einführung in Haskell: Listen
 - 1.2 Algebraische Datentypen
 - 1.3 Funktionen höherer Ordnung
 - 1.4 Typpolymorphie & Unifikation
 - 1.5 Beweis von Programmeigenschaften
 - 1.6 λ - **Kalkül**
2. Logikprogrammierung
3. Implementierung einer imperativen Programmiersprache
4. Verifikation von Programmeigenschaften
5. H_0 – ein einfacher Kern von Haskell

Der λ -Kalkül

- ▶ weitere funktionale Programmiersprache
- ▶ Programme = λ -Terme
- ▶ Vorstellung: *anonyme* Funktionen

Sei X eine Menge mit Variablen, Σ eine Menge mit Symbolen. Die gültigen λ -Terme sind *induktiv* definiert:

1. **Atome** (Variablen oder Symbole) sind gültige λ -Terme.

Sei X eine Menge mit Variablen, Σ eine Menge mit Symbolen. Die gültigen λ -Terme sind *induktiv* definiert:

1. **Atome** (Variablen oder Symbole) sind gültige λ -Terme.
2. **Abstraktion**: Ist t ein gültiger λ -Term und $x \in X$ eine Variable, dann ist auch $\lambda x.t$ ein gültiger λ -Term.

Sei X eine Menge mit Variablen, Σ eine Menge mit Symbolen. Die gültigen λ -Terme sind *induktiv* definiert:

1. **Atome** (Variablen oder Symbole) sind gültige λ -Terme.
2. **Abstraktion:** Ist t ein gültiger λ -Term und $x \in X$ eine Variable, dann ist auch $\lambda x.t$ ein gültiger λ -Term.
3. **Applikation:** Sind t_1 und t_2 gültige λ -Terme, dann ist auch $(t_1 \ t_2)$ ein gültiger λ -Term.

BEISPIELE (INFORMELL)

Vorstellung: Jeder λ -Term beschreibt eine anonyme Funktion.

- Abstraktion gibt das Argument an:

$$\lambda x.t \quad \leftrightarrow \quad f(x) = t$$

BEISPIELE (INFORMELL)

Vorstellung: Jeder λ -Term beschreibt eine anonyme Funktion.

- ▶ Abstraktion gibt das Argument an:

$$\lambda x.t \quad \leftrightarrow \quad f(x) = t$$

- ▶ Applikation beschreibt Funktionsanwendung (Einsetzen):

$$((\lambda x.t) \ 2) \quad \leftrightarrow \quad f(2)$$

BEISPIELE (INFORMELL)

Vorstellung: Jeder λ -Term beschreibt eine anonyme Funktion.

- ▶ Abstraktion gibt das Argument an:

$$\lambda x.t \quad \leftrightarrow \quad f(x) = t$$

- ▶ Applikation beschreibt Funktionsanwendung (Einsetzen):

$$((\lambda x.t) \ 2) \quad \leftrightarrow \quad f(2)$$

BEISPIELE (INFORMELL)

Vorstellung: Jeder λ -Term beschreibt eine anonyme Funktion.

- ▶ Abstraktion gibt das Argument an:

$$\lambda x.t \quad \leftrightarrow \quad f(x) = t$$

- ▶ Applikation beschreibt Funktionsanwendung (Einsetzen):

$$((\lambda x.t) \ 2) \quad \leftrightarrow \quad f(2)$$

Beispiel:

$$\begin{aligned}\text{quadriere} &= \lambda x. x * x \\ ((\lambda x. x * x) \ 2) &= 2 * 2 = 4\end{aligned}$$

- Applikation ist linksassoziativ:

$$((t_1 \ t_2) \ t_3) = t_1 \ t_2 \ t_3$$

- ▶ Applikation ist linksassoziativ:

$$((t_1 \ t_2) \ t_3) = t_1 \ t_2 \ t_3$$

- ▶ mehrfache Abstraktion:

$$(\lambda x_1. (\lambda x_2. (\lambda x_3. t))) = \lambda x_1 x_2 x_3. t$$

- ▶ Applikation ist linksassoziativ:

$$((t_1 \ t_2) \ t_3) = t_1 \ t_2 \ t_3$$

- ▶ mehrfache Abstraktion:

$$(\lambda x_1. (\lambda x_2. (\lambda x_3. t))) = \lambda x_1 x_2 x_3. t$$

- ▶ Applikation vor Abstraktion:

$$\begin{aligned} (\lambda x. x \ y) &= (\lambda x. (x \ y)) \\ &\neq ((\lambda x. x) \ y) \end{aligned}$$

Mengen $FV(t)$ und $GV(t)$ geben frei bzw. gebunden
vorkommende Variablen von t an — induktive Definition

Mengen $FV(t)$ und $GV(t)$ geben frei bzw. gebunden
vorkommende Variablen von t an — induktive Definition

- einzelne **Variablen** sind immer frei:

$$x \in X \Rightarrow FV(x) = \{x\}, GV(x) = \emptyset$$

Mengen $FV(t)$ und $GV(t)$ geben frei bzw. gebunden *vorkommende* Variablen von t an — induktive Definition

- ▶ einzelne **Variablen** sind immer frei:

$$x \in X \Rightarrow FV(x) = \{x\}, GV(x) = \emptyset$$

- ▶ **Symbole** sind weder frei noch gebunden

Mengen $FV(t)$ und $GV(t)$ geben frei bzw. gebunden *vorkommende* Variablen von t an — induktive Definition

- ▶ einzelne **Variablen** sind immer frei:

$$x \in X \Rightarrow FV(x) = \{x\}, GV(x) = \emptyset$$

- ▶ **Symbole** sind weder frei noch gebunden

- ▶ **Applikation:** Sei $t = (t_1 t_2)$. Dann

$$\Rightarrow FV(t) = FV(t_1) \cup FV(t_2), \quad GV(t) = GV(t_1) \cup GV(t_2)$$

Mengen $FV(t)$ und $GV(t)$ geben frei bzw. gebunden vorkommende Variablen von t an — induktive Definition

- ▶ einzelne **Variablen** sind immer frei:

$$x \in X \Rightarrow FV(x) = \{x\}, GV(x) = \emptyset$$

- ▶ **Symbole** sind weder frei noch gebunden

- ▶ **Applikation:** Sei $t = (t_1 t_2)$. Dann

$$\Rightarrow FV(t) = FV(t_1) \cup FV(t_2), \quad GV(t) = GV(t_1) \cup GV(t_2)$$

- ▶ **Abstraktion:** $t = \lambda x.t'$

$$\Rightarrow FV(t) = FV(t') \setminus \{x\}, \quad GV(t) = GV(t') \cup \{x\}$$

β -Reduktion

Seien $s, t \in \lambda(\Sigma)$ gültige λ -Terme und es gilt $GV(t) \cap FV(s) = \emptyset$.

$$(\lambda x. t) s \longrightarrow_{\beta} t[x/s]$$

β -Reduktion

Seien $s, t \in \lambda(\Sigma)$ gültige λ -Terme und es gilt $GV(t) \cap FV(s) = \emptyset$.

$$(\lambda x. t) s \longrightarrow_{\beta} t[x/s]$$

- ▶ Bedeutung von $t[x/s]$: Ersetze jedes *freie* Vorkommen von x in t durch s .
- ▶ Erinnerung: Vorstellung der Applikation als „Einsetzen“ in Funktionen
- ▶ beachte: Abstraktion λx entfällt

β -Reduktion

Seien $s, t \in \lambda(\Sigma)$ gültige λ -Terme und es gilt $GV(t) \cap FV(s) = \emptyset$.

$$(\lambda x. t) s \longrightarrow_{\beta} t[x/s]$$

- ▶ Bedeutung von $t[x/s]$: Ersetze jedes *freie* Vorkommen von x in t durch s .
- ▶ Erinnerung: Vorstellung der Applikation als „Einsetzen“ in Funktionen
- ▶ beachte: Abstraktion λx entfällt

Bsp.: Seien die Symbole gegeben durch $\Sigma = \{3, a\}$.

$$\underbrace{(\lambda x. +x3)}_{GV=\emptyset} \underbrace{(\lambda z. a)}_{FV=\emptyset} \longrightarrow_{\beta} +(\lambda z. a)3$$

- ▶ Was machen wir, wenn Voraussetzung $FV(t) \cap GV(t) = \emptyset$ für β -Reduktion nicht erfüllt ist?
- ▶ einfacher Ausweg: entsprechende Variablen umbenennen, sodass Bedingung erfüllt ist

α – KONVERSION

- ▶ Was machen wir, wenn Voraussetzung $FV(t) \cap GV(t) = \emptyset$ für β -Reduktion nicht erfüllt ist?
- ▶ einfacher Ausweg: entsprechende Variablen umbenennen, sodass Bedingung erfüllt ist

α -Konversion

Sei $t \in \lambda(\Sigma)$ und $z \notin GV(t) \cup FV(t)$.

$$(\lambda x.t) \longrightarrow_{\alpha} \lambda z.t[x/z]$$

α – KONVERSION

- ▶ Was machen wir, wenn Voraussetzung $FV(t) \cap GV(t) = \emptyset$ für β -Reduktion nicht erfüllt ist?
- ▶ einfacher Ausweg: entsprechende Variablen umbenennen, sodass Bedingung erfüllt ist

α -Konversion

Sei $t \in \lambda(\Sigma)$ und $z \notin GV(t) \cup FV(t)$.

$$(\lambda x.t) \longrightarrow_{\alpha} \lambda z.t[x/z]$$

Bsp.: Seien die Symbole gegeben durch $\Sigma = \{3, a\}$.

$$\underbrace{(\lambda x.(\lambda y. + xy))}_{GV=\{y\}} \underbrace{(\underbrace{y}_{FV=\{y\}})}_{FV=\{y\}} \longrightarrow_{\alpha} \underbrace{(\lambda x.(\lambda z. + xz))}_{GV=\{z\}} \underbrace{(\underbrace{y}_{FV=\{y\}})}_{FV=\{y\}}$$

Übungsblatt 6

Aufgabe 1

AUFGABE 1 — TEIL (A)

► $t_1 = (\lambda x.xy) (\lambda y.y)$:

AUFGABE 1 — TEIL (A)

- ▶ $t_1 = (\lambda x.xy) (\lambda y.y)$:
 - ▶ $FV(t_1) = \{y\}$

AUFGABE 1 — TEIL (A)

- ▶ $t_1 = (\lambda x.xy) (\lambda y.y)$:
 - ▶ $FV(t_1) = \{y\}$
 - ▶ $GV(t_1) = \{x, y\}$

AUFGABE 1 — TEIL (A)

- ▶ $t_1 = (\lambda x.xy) (\lambda y.y)$:
 - ▶ $FV(t_1) = \{y\}$
 - ▶ $GV(t_1) = \{x, y\}$
- ▶ $t_2 = (\lambda x.(\lambda y.z(\lambda z.z(\lambda x.y))))$

AUFGABE 1 — TEIL (A)

- ▶ $t_1 = (\lambda x.xy) (\lambda y.y)$:
 - ▶ $FV(t_1) = \{y\}$
 - ▶ $GV(t_1) = \{x, y\}$
- ▶ $t_2 = (\lambda x.(\lambda y.z(\lambda z.z(\lambda x.y))))$
 - ▶ $FV(t_2) = \{z\}$

AUFGABE 1 — TEIL (A)

- ▶ $t_1 = (\lambda x.xy) (\lambda y.y)$:
 - ▶ $FV(t_1) = \{y\}$
 - ▶ $GV(t_1) = \{x, y\}$
- ▶ $t_2 = (\lambda x.(\lambda y.z(\lambda z.z(\lambda x.y))))$
 - ▶ $FV(t_2) = \{z\}$
 - ▶ $GV(t_2) = \{x, y, z\}$

AUFGABE 1 — TEIL (A)

- ▶ $t_1 = (\lambda x.xy) (\lambda y.y)$:
 - ▶ $FV(t_1) = \{y\}$
 - ▶ $GV(t_1) = \{x, y\}$
- ▶ $t_2 = (\lambda x.(\lambda y.z(\lambda z.z(\lambda x.y))))$
 - ▶ $FV(t_2) = \{z\}$
 - ▶ $GV(t_2) = \{x, y, z\}$
- ▶ $t_3 = (\lambda x.(\lambda y.z(yz)))(\lambda x.y(\lambda y.y))$

AUFGABE 1 — TEIL (A)

- ▶ $t_1 = (\lambda x.xy) (\lambda y.y)$:
 - ▶ $FV(t_1) = \{y\}$
 - ▶ $GV(t_1) = \{x, y\}$
- ▶ $t_2 = (\lambda x.(\lambda y.z(\lambda z.z(\lambda x.y))))$
 - ▶ $FV(t_2) = \{z\}$
 - ▶ $GV(t_2) = \{x, y, z\}$
- ▶ $t_3 = (\lambda x.(\lambda y.z(yz)))(\lambda x.y(\lambda y.y))$
 - ▶ $FV(t_3) = \{y, z\}$

AUFGABE 1 — TEIL (A)

- ▶ $t_1 = (\lambda x.xy) (\lambda y.y)$:
 - ▶ $FV(t_1) = \{y\}$
 - ▶ $GV(t_1) = \{x, y\}$
- ▶ $t_2 = (\lambda x.(\lambda y.z(\lambda z.z(\lambda x.y))))$
 - ▶ $FV(t_2) = \{z\}$
 - ▶ $GV(t_2) = \{x, y, z\}$
- ▶ $t_3 = (\lambda x.(\lambda y.z(yz)))(\lambda x.y(\lambda y.y))$
 - ▶ $FV(t_3) = \{y, z\}$
 - ▶ $GV(t_3) = \{x, y\}$

AUFGABE 2 — TEIL (B)

$$\begin{aligned}
 & (\lambda x. \underbrace{(\lambda y. x \ z \ (y \ z))}_{\text{GV}=\{y\}}) \underbrace{(\lambda x. y \ (\lambda y. y))}_{\text{FV}=\{y\}} \\
 \Rightarrow_{\alpha} & (\lambda x. \underbrace{(\lambda y_1. x \ z \ (y_1 \ z))}_{\text{GV}=\{y\}}) \underbrace{(\lambda x. y \ (\lambda y. y))}_{\text{FV}=\{y\}} \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda y_1. \underbrace{(\lambda x. y \ (\lambda y. y))}_{\text{GV}=\{y\}}) \underbrace{z}_{\text{FV}=\{z\}} (y_1 \ z) \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda y_1. (y \ (\lambda y. y)) (y_1 \ z)) \\
 = & (\lambda y_1. y \ (\lambda y. y) (y_1 \ z))
 \end{aligned}$$

AUFGABE 2 — TEIL (B)

$$\begin{aligned} & (\lambda x. (\underbrace{\lambda y. (\lambda z. z)}_{\text{GV}=\{y,z\}})) \underbrace{x}_{\text{FV}=\{x\}} (+ y 1) \\ \Rightarrow_{\beta} & (\lambda y. (\underbrace{\lambda z. z}_{\text{GV}=\{z\}})) \underbrace{(+ y 1)}_{\text{FV}=\{y\}} \\ \Rightarrow_{\beta} & (\lambda z. z) \end{aligned}$$

AUFGABE 2 — TEIL (B)

$$\begin{aligned}
 & (\lambda x. (\lambda y. x (\lambda z. y z))) (((\lambda x. (\lambda y. y)) \underbrace{8}_{\substack{\text{GV}=\{y\} \\ \text{FV}=\emptyset}}) (\lambda x. (\lambda y. y) x)) \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda x. (\lambda y. x (\lambda z. y z))) ((\lambda y. y)) (\lambda x. (\lambda y. y) x)) \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda x. (\lambda y. x (\lambda z. y z))) ((\lambda y. y) (\lambda x. (\lambda y. \underbrace{y}_{\substack{\text{GV}=\emptyset}} \underbrace{x}_{\substack{\{x\}}})) \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda x. (\lambda y. x (\lambda z. y z))) ((\lambda y. \underbrace{y}_{\substack{\text{GV}=\emptyset}}) (\lambda x. \underbrace{x}_{\substack{\text{FV}=\emptyset}})) \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda x. (\lambda y. x (\lambda z. y z))) (\underbrace{\lambda x. x}_{\substack{\text{GV}=\{y,z\} \\ \text{FV}=\emptyset}}) \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda y. (\lambda x. \underbrace{x}_{\substack{\text{GV}=\emptyset}}) (\lambda z. y z)) \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda y. (\lambda z. y z)) = (\lambda y z. y z)
 \end{aligned}$$

AUFGABE 2 — TEIL (B)

$$\begin{aligned} & (\lambda h. (\lambda x. h (x x)) (\lambda x. h (x x))) ((\lambda x. \underbrace{x}_{GV=\emptyset}) \underbrace{(+ 1 5)}_{FV=\emptyset}) \\ \Rightarrow_{\beta} & (\lambda h. (\lambda x. \underbrace{h (x x)}_{GV=\emptyset}) \underbrace{(\lambda x. h (x x))}_{FV=\{h\}}) (+ 1 5) \\ \Rightarrow_{\beta} & (\lambda h. h ((\lambda x. \underbrace{h (x x)}_{GV=\emptyset}) \underbrace{(\lambda x. h (x x))}_{FV=\{h\}})) (+ 1 5) \\ \Rightarrow_{\beta} & (\lambda h. hh ((\lambda x. \underbrace{h (x x)}_{GV=\emptyset}) \underbrace{(\lambda x. h (x x))}_{FV=\{h\}})) (+ 1 5) \\ \longrightarrow & \text{endlose Rekursion, bei der } h \text{ durch } (+ 1 5) \text{ noch} \\ & \text{reduziert werden könnte} \\ \Rightarrow_{\beta} & (+ 1 5) (+ 1 5) ((\lambda x. h (x x)) (\lambda x. h (x x))) \end{aligned}$$

AUFGABE 2 — TEIL (B)

$$\begin{aligned}
 & (\lambda f. \underbrace{(\lambda a. (\lambda b. f \ a \ b))}_{GV=\{a,b\}} \underbrace{(\lambda x. (\lambda y. x))}_{FV=\emptyset}) \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda a. (\lambda b. (\lambda x. \underbrace{(\lambda y. x)}_{GV=\{y\}} \underbrace{a}_{FV=\{a\}} \ b))) \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda a. (\lambda b. (\lambda y. \underbrace{a}_{GV=\emptyset} \ \underbrace{b}_{FV=\{b\}}))) \\
 \Rightarrow_{\beta} & (\lambda a. (\lambda b. a)) \\
 = & (\lambda a b. a)
 \end{aligned}$$

Übungsblatt 6

Aufgabe 2

AUFGABE 2

(a) A mit $A t s u \Rightarrow^* s$:

AUFGABE 2

(a) A mit $A \text{ t s } u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda xyz . y)$

AUFGABE 2

(a) A mit $A \text{ t s } u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda xyz . y)$

(b) B mit $B \text{ t s } \Rightarrow^* s \text{ t}$:

AUFGABE 2

(a) A mit $A \text{ t s } u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda xyz . y)$

(b) B mit $B \text{ t s } \Rightarrow^* s \text{ t}$: $B = (\lambda xy . yx)$

AUFGABE 2

(a) A mit $A t s u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda xyz . y)$

(b) B mit $B t s \Rightarrow^* s t$: $B = (\lambda xy . yx)$

(c) C mit $C C \Rightarrow^* C C$:

AUFGABE 2

(a) A mit $A t s u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda x y z . y)$

(b) B mit $B t s \Rightarrow^* s t$: $B = (\lambda x y . y x)$

(c) C mit $C C \Rightarrow^* C C$: $C = (\lambda x . x x)$

AUFGABE 2

(a) A mit $A t s u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda x y z . y)$

(b) B mit $B t s \Rightarrow^* s t$: $B = (\lambda x y . y x)$

(c) C mit $C C \Rightarrow^* C C$: $C = (\lambda x . x x)$

denn: $(\lambda x . \underbrace{xx}_{GV=\emptyset}) (\underbrace{\lambda x . xx}_{FV=\emptyset}) \Rightarrow^\beta (\lambda x . xx)(\lambda x . xx)$

AUFGABE 2

(a) A mit $A t s u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda x y z . y)$

(b) B mit $B t s \Rightarrow^* s t$: $B = (\lambda x y . y x)$

(c) C mit $C C \Rightarrow^* C C$: $C = (\lambda x . x x)$

denn: $(\lambda x . \underbrace{xx}_{GV=\emptyset}) (\underbrace{\lambda x . xx}_{FV=\emptyset}) \Rightarrow^\beta (\lambda x . xx)(\lambda x . xx)$

(d) D mit $D \Rightarrow^* D$:

AUFGABE 2

(a) A mit $A t s u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda x y z . y)$

(b) B mit $B t s \Rightarrow^* s t$: $B = (\lambda x y . y x)$

(c) C mit $C C \Rightarrow^* C C$: $C = (\lambda x . x x)$

denn: $(\lambda x . \underbrace{xx}_{GV=\emptyset}) (\underbrace{\lambda x . xx}_{FV=\emptyset}) \Rightarrow^\beta (\lambda x . xx)(\lambda x . xx)$

(d) D mit $D \Rightarrow^* D$: $D = (C C)$

AUFGABE 2

(a) A mit $A t s u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda x y z . y)$

(b) B mit $B t s \Rightarrow^* s t$: $B = (\lambda x y . y x)$

(c) C mit $C C \Rightarrow^* C C$: $C = (\lambda x . x x)$

denn: $(\lambda x . \underbrace{xx}_{GV=\emptyset}) (\underbrace{\lambda x . xx}_{FV=\emptyset}) \Rightarrow^\beta (\lambda x . xx)(\lambda x . xx)$

(d) D mit $D \Rightarrow^* D$: $D = (C C)$

(e) E mit $E E t \Rightarrow^* E t E$:

AUFGABE 2

(a) A mit $A t s u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda x y z . y)$

(b) B mit $B t s \Rightarrow^* s t$: $B = (\lambda x y . y x)$

(c) C mit $C C \Rightarrow^* C C$: $C = (\lambda x . x x)$

denn: $(\lambda x . \underbrace{xx}_{GV=\emptyset}) (\underbrace{\lambda x . xx}_{FV=\emptyset}) \Rightarrow^\beta (\lambda x . xx)(\lambda x . xx)$

(d) D mit $D \Rightarrow^* D$: $D = (C C)$

(e) E mit $E E t \Rightarrow^* E t E$: $E = (\lambda x y . x y x)$

AUFGABE 2

(a) A mit $A t s u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda x y z . y)$

(b) B mit $B t s \Rightarrow^* s t$: $B = (\lambda x y . y x)$

(c) C mit $C C \Rightarrow^* C C$: $C = (\lambda x . x x)$

denn: $(\lambda x . \underbrace{xx}_{GV=\emptyset}) (\underbrace{(\lambda x . xx)}_{FV=\emptyset}) \Rightarrow^\beta (\lambda x . xx)(\lambda x . xx)$

(d) D mit $D \Rightarrow^* D$: $D = (C C)$

(e) E mit $E E t \Rightarrow^* E t E$: $E = (\lambda x y . x y x)$

denn:

$$\begin{aligned} (\lambda x y . x y x) (\lambda x y . x y x) t &\Rightarrow^\beta (\lambda y . (\lambda x y . x y x) y (\lambda x y . x y x)) t \\ &\Rightarrow^\beta (\underbrace{(\lambda x y . x y x)}_{=E} t \underbrace{(\lambda x y . x y x)}_{=E}) \end{aligned}$$

AUFGABE 2

(a) A mit $A \ t \ s \ u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda x y z . y)$

(b) B mit $B \ t \ s \Rightarrow^* s \ t$: $B = (\lambda x y . y x)$

(c) C mit $C \ C \Rightarrow^* C \ C$: $C = (\lambda x . x x)$

denn: $(\lambda x . \underbrace{xx}_{GV=\emptyset}) (\underbrace{\lambda x . xx}_{FV=\emptyset}) \Rightarrow^\beta (\lambda x . xx)(\lambda x . xx)$

(d) D mit $D \Rightarrow^* D$: $D = (C \ C)$

(e) E mit $E \ E \ t \Rightarrow^* E \ t \ E$: $E = (\lambda x y . x y x)$

denn:

$$\begin{aligned}
 & (\underbrace{\lambda x y . x y x}_{GV=\{y\}}) (\underbrace{\lambda x y . x y x}_{FV=\emptyset}) t \\
 & \Rightarrow^\beta \underbrace{(\lambda x y . x y x)}_{=E} t \underbrace{(\lambda x y . x y x)}_{=E}
 \end{aligned}$$

AUFGABE 2

(a) A mit $A \ t \ s \ u \Rightarrow^* s$: $A = (\lambda x y z . y)$

(b) B mit $B \ t \ s \Rightarrow^* s \ t$: $B = (\lambda x y . y x)$

(c) C mit $C \ C \Rightarrow^* C \ C$: $C = (\lambda x . x x)$
 denn: $(\lambda x . \underbrace{xx}_{GV=\emptyset}) (\underbrace{\lambda x . x x}_{FV=\emptyset}) \Rightarrow^\beta (\lambda x . x x) (\lambda x . x x)$

(d) D mit $D \Rightarrow^* D$: $D = (C \ C)$

(e) E mit $E \ E \ t \Rightarrow^* E \ t \ E$: $E = (\lambda x y . x y x)$
 denn:

$$\begin{aligned} (\lambda x y . x y x) (\lambda x y . x y x) \ t &\Rightarrow^\beta (\lambda y . (\lambda x y . x y x) \ y \ (\lambda x y . x y x)) \ t \\ &\Rightarrow^\beta \underbrace{(\lambda x y . x y x)}_{=E} \ t \ \underbrace{(\lambda x y . x y x)}_{=E} \end{aligned}$$

Fragen?