

9a

Konstruktionen von Turingmaschinen und LOOP-Programme

Prof. Dr. Jasmin Blanchette

Lehr- und Forschungseinheit für
Theoretische Informatik und Theorembeweisen

Stand: 4. April 2024

Basiert auf Folien von PD Dr. David Sabel



Wiederholung: Turingberechenbarkeit

Definition

Eine Funktion $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ heißt **turingberechenbar**, falls es eine deterministische Turingmaschine $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \square, E)$ gibt, sodass für alle $u, v \in \Sigma^*$ gilt:

$$f(u) = v$$

g.d.w.

es gibt $z \in E$, sodass $Start_M(u) \vdash^* \square \dots \square z v \square \dots \square$

Wiederholung: Turingberechenbarkeit

Definition

Eine Funktion $f : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$ heißt **turingberechenbar**, falls es eine deterministische Turingmaschine $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \square, E)$ gibt, sodass für alle $n_1, \dots, n_k, m \in \mathbb{N}$ gilt:

$$f(n_1, \dots, n_k) = m$$

g.d.w.

es gibt $z \in E$, sodass $z_0 \text{bin}(n_1) \# \dots \# \text{bin}(n_k) \vdash^* \square \dots \square z \text{bin}(m) \square \dots \square$

wobei $\text{bin}(n)$ die Binärzahldarstellung von $n \in \mathbb{N}$ ist.

Wiederholung: Mehrband-Turingmaschinen

Definition

Eine k -Band-Turingmaschine (für $k \in \mathbb{N}_{>0}$) ist ein 7-Tupel $(Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \square, E)$ mit

- ▶ Z ist eine endliche Menge von Zuständen
- ▶ Σ ist das (endliche) Eingabealphabet
- ▶ $\Gamma \supset \Sigma$ ist das (endliche) Bandalphabet
- ▶ δ ist die Überföhrungsfunktion
 - ▶ für DTM: $\delta : Z \times \Gamma^k \rightarrow Z \times \Gamma^k \times \{L, R, N\}^k$
 - ▶ für NTM: $\delta : Z \times \Gamma^k \rightarrow \mathcal{P}(Z \times \Gamma^k \times \{L, R, N\}^k)$
- ▶ $z_0 \in Z$ ist der Startzustand
- ▶ $\square \in \Gamma \setminus \Sigma$ ist das Blank-Symbol
- ▶ $E \subseteq Z$ ist die Menge der Endzustände.

Konstruktion von Turingmaschinen und Notationen

Programme einer einfachen imperativen Programmiersprache mit Zuweisungen, Verzweigungen und Schleifen können durch TMs simuliert werden.

Notationen:

- ▶ Wenn M eine 1-Band-Turingmaschine ist, dann schreiben wir $M(i, k)$ für die k -Band-Turingmaschine (mit $i \leq k$), die die Operationen von M auf dem i -ten Band durchführt und alle anderen Bänder unverändert lässt.
- ▶ Wenn k nicht von Bedeutung (und groß genug gewählt werden kann), schreiben wir $M(i)$ statt $M(i, k)$.

Konstruktion von Turingmaschinen

Beispiel:

- ▶ Die TM, die 1 addiert nennen wir „ $\text{Band} := \text{Band} + 1$ “.
- ▶ Die k -Band-TM, die 1 auf dem i -ten Band addiert nennen wir „ $\text{Band} := \text{Band} + 1(i, k)$ “, „ $\text{Band} := \text{Band} + 1(i)$ “ oder sogar „ $\text{Band } i := \text{Band } i + 1$ “.

Konstruktion von Turingmaschinen

Beispiel:

- ▶ Die TM, die 1 addiert nennen wir „Band := Band + 1“.
- ▶ Die k -Band-TM, die 1 auf dem i -ten Band addiert nennen wir „Band := Band + 1“(i, k), „Band := Band + 1“(i) oder sogar „Band i := Band i + 1“.

Weitere Turingmaschinen folgen. Die Konstruktionen sind relativ einfach.

- ▶ „Band i := Band i - 1“:
 k -Band-TM ($k \geq i$), die eine angepasste Subtraktion von 1 auf Band i durchführt. Anpassung: $0 - 1 = 0$.
- ▶ „Band i := 0“:
 k -Band-TM ($k \geq i$), die Band i mit 0 überschreibt.
- ▶ „Band i := Band j “:
 k -Band-TM ($k \geq i$ und $k \geq j$), welche die Zahl von Band j auf Band i kopiert.

Hintereinanderschaltung von Turingmaschinen

Seien $M_i = (Z_i, \Sigma, \Gamma_i, \delta_i, z_{0i}, \square, E_i)$ für $i \in \{1, 2\}$ k -Band-TMs.
O.B.d.A. $Z_1 \cap Z_2 = \emptyset$.

Hintereinanderschaltung von Turingmaschinen

Seien $M_i = (Z_i, \Sigma, \Gamma_i, \delta_i, z_{0i}, \square, E_i)$ für $i \in \{1, 2\}$ k -Band-TMs.

O.B.d.A. $Z_1 \cap Z_2 = \emptyset$.

Die TM $M_1; M_2$ führt M_1 und M_2 hintereinandergeschaltet aus:

$M_1; M_2 = (Z_1 \cup Z_2, \Sigma, \Gamma_1 \cup \Gamma_2, \delta, z_{01}, \square, E_2)$ mit

$$\delta(z, (a_1, \dots, a_k)) = \begin{cases} \delta_1(z, (a_1, \dots, a_k)) & \text{falls } z \in Z_1 \setminus E_1 \\ (z_{02}, (a_1, \dots, a_k), N^k) & \text{falls } z \in E_1 \\ \delta_2(z, (a_1, \dots, a_k)) & \text{falls } z \in Z_2 \end{cases}$$

Hintereinanderschaltung von Turingmaschinen

Seien $M_i = (Z_i, \Sigma, \Gamma_i, \delta_i, z_{0i}, \square, E_i)$ für $i \in \{1, 2\}$ k -Band-TMs.

O.B.d.A. $Z_1 \cap Z_2 = \emptyset$.

Die TM $M_1; M_2$ führt M_1 und M_2 hintereinandergeschaltet aus:

$M_1; M_2 = (Z_1 \cup Z_2, \Sigma, \Gamma_1 \cup \Gamma_2, \delta, z_{01}, \square, E_2)$ mit

$$\delta(z, (a_1, \dots, a_k)) = \begin{cases} \delta_1(z, (a_1, \dots, a_k)) & \text{falls } z \in Z_1 \setminus E_1 \\ (z_{02}, (a_1, \dots, a_k), N^k) & \text{falls } z \in E_1 \\ \delta_2(z, (a_1, \dots, a_k)) & \text{falls } z \in Z_2 \end{cases}$$

Die TM $M_1; M_2$

- ▶ führt erst M_1 aus
- ▶ wechselt im Endzustand $z \in E_1$ in Startzustand z_{02} von M_2
- ▶ führt anschließend M_2 aus.

Hintereinanderschaltung von Turingmaschinen

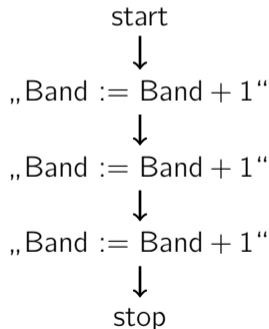
Flussdiagramm für $M_1; M_2$:



Hintereinanderschaltung von Turingmaschinen

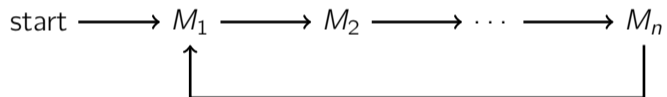
Beispiel: „Band := Band + 3“ wird konstruiert durch
„Band := Band + 1“; „Band := Band + 1“; „Band := Band + 1“

Flussdiagramm dazu:



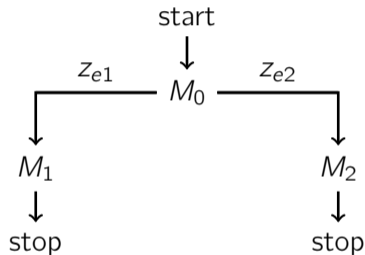
Hintereinanderschaltung von Turingmaschinen

Zyklische Verkettung von M_1, \dots, M_n :



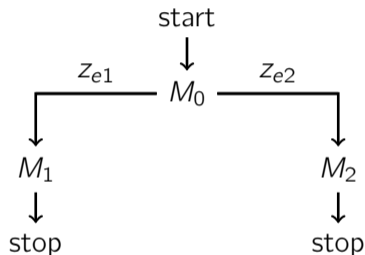
Verzweigende Fortsetzung

Seien M_0, M_1, M_2 TMs und seien z_{e1} und z_{e2} die Endzustände von M_0 .
Verzweigende Fortsetzung von M_0 :



Verzweigende Fortsetzung

Seien M_0, M_1, M_2 TMs und seien z_{e1} und z_{e2} die Endzustände von M_0 .
Verzweigende Fortsetzung von M_0 :



Die Konstruktion fügt Übergänge

$$\delta(z_{e1}, (a_1, \dots, a_k)) = (z_{01}, (a_1, \dots, a_k), N)$$

$$\delta(z_{e2}, (a_1, \dots, a_k)) = (z_{02}, (a_1, \dots, a_k), N)$$

ein, wobei z_{0i} der Startzustand von M_i ist (für $i \in \{1, 2\}$).

Beispiel für Test auf 0

Folgende TM M_0 prüft, ob das Band eine 0 enthält oder nicht.

M_0 hat die Zustände $\{z_0, z_1, ja, nein\}$ und

$$\delta(z_0, a) = (nein, a, N) \quad \text{für } a \neq 0$$

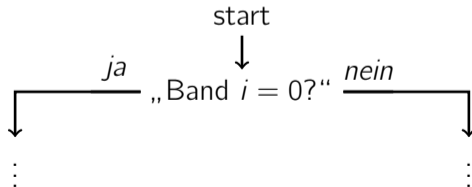
$$\delta(z_0, 0) = (z_1, 0, R)$$

$$\delta(z_1, a) = (nein, a, L) \quad \text{für } a \neq \square$$

$$\delta(z_1, \square) = (ja, \square, L)$$

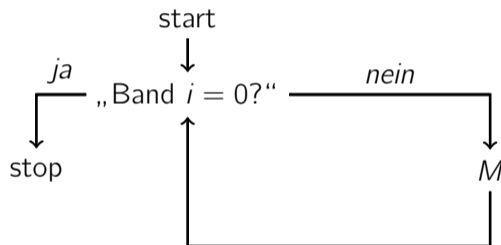
mit z_0 Startzustand und ja und $nein$ Endzustände.

Notationen: „Band = 0?“ und „Band $i = 0$?“.



Schleife

Mit Verzweigung, „Band $i = 0$?“, zyklischer Hintereinanderschaltung und einer TM M erstellen wir die Schleife



Die TM M wird solange wieder aufgerufen, bis das i -te Band die Zahl 0 enthält.

Die Maschine nennen wir „**WHILE** Band $i \neq 0$ **DO** M “.

LOOP-, WHILE-, GOTO-Programme

Ziel:

- ▶ Betrachte drei einfache imperative Programmiersprachen
 - ▶ LOOP-Programme
 - ▶ WHILE-Programme
 - ▶ GOTO-Programme

und die dazugehörigen Berechenbarkeitsbegriffe.

- ▶ Welche Berechenbarkeitsbegriffe sind gleich bzw. verschieden (untereinander aber auch bezüglich Turingberechenbarkeit)?

Syntax von LOOP-Programmen

LOOP-Programme werden durch die kontextfreie Grammatik (V, Σ, P, Prg) erzeugt, wobei:

$$\begin{aligned}V &= \{Prg, Var, Id, Const\} \\ \Sigma &= \{\mathbf{LOOP}, \mathbf{DO}, \mathbf{END}, x, 0, \dots, 9, ,, :=, +, -\} \\ P &= \{Prg \rightarrow \mathbf{LOOP} Var \mathbf{DO} Prg \mathbf{END} \\ &\quad | Prg; Prg \\ &\quad | Var := Var + Const \\ &\quad | Var := Var - Const, \\ Var &\rightarrow x_{Id}, \\ Const &\rightarrow Id, \\ Id &\rightarrow 0 | 1 | \dots | 9 | 1Id | 2Id | \dots | 9Id\}\end{aligned}$$

Beachte:

- ▶ *Var* erzeugt Variablen x_0, x_1, x_2, \dots
- ▶ *Const* erzeugt alle natürlichen Zahlen.

Definition (Variablenbelegung)

Eine **Variablenbelegung** ρ ist eine endliche Abbildung mit Einträgen $x_i \mapsto n$ mit x_i ist Variable und $n \in \mathbb{N}$.

Wir definieren

$$\rho(x_i) := \begin{cases} n & \text{wenn } x_i \mapsto n \in \rho \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Definition (Variablenbelegung)

Eine **Variablenbelegung** ρ ist eine endliche Abbildung mit Einträgen $x_i \mapsto n$ mit x_i ist Variable und $n \in \mathbb{N}$.

Wir definieren

$$\rho(x_i) := \begin{cases} n & \text{wenn } x_i \mapsto n \in \rho \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Wir definieren auch

$$\rho\{x_i \mapsto m\}(x_j) := \begin{cases} m & \text{wenn } x_j = x_i \\ \rho(x_j) & \text{wenn } x_j \neq x_i \end{cases}$$

Definition (Variablenbelegung)

Eine **Variablenbelegung** ρ ist eine endliche Abbildung mit Einträgen $x_i \mapsto n$ mit x_i ist Variable und $n \in \mathbb{N}$.

Wir definieren

$$\rho(x_i) := \begin{cases} n & \text{wenn } x_i \mapsto n \in \rho \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Wir definieren auch

$$\rho\{x_i \mapsto m\}(x_j) := \begin{cases} m & \text{wenn } x_j = x_i \\ \rho(x_j) & \text{wenn } x_j \neq x_i \end{cases}$$

Die Notation $\rho\{x_i \mapsto m\}$ steht also für die Variablenbelegung, die überall mit ρ übereinstimmt außer bei x_i , wofür m ausgegeben wird.

Definition

Die Berechnungsschritte $(\rho, P) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', P')$, wobei ρ, ρ' Variablenbelegungen und P, P' LOOP-Programme oder das leere Programm ε sind, sind durch folgende Regeln definiert:

- ▶ $(\rho, x_i := x_j + c) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', \varepsilon)$, wobei $\rho' = \rho\{x_i \mapsto \rho(x_j) + c\}$
- ▶ $(\rho, x_i := x_j - c) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', \varepsilon)$, wobei $\rho' = \rho\{x_i \mapsto \max(0, \rho(x_j) - c)\}$
- ▶ $(\rho, P_1; P_2) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', P_2)$ wenn $(\rho, P_1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', \varepsilon)$
- ▶ $(\rho, P_1; P_2) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', P'_1; P_2)$ wenn $(\rho, P_1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', P'_1)$ und $P'_1 \neq \varepsilon$
- ▶ $(\rho, \mathbf{LOOP} \ x_i \ \mathbf{DO} \ P \ \mathbf{END}) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho, \underbrace{P; \dots; P}_{\rho(x_i)\text{-mal}})$

Definition

Die Berechnungsschritte $(\rho, P) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', P')$, wobei ρ, ρ' Variablenbelegungen und P, P' LOOP-Programme oder das leere Programm ε sind, sind durch folgende Regeln definiert:

- ▶ $(\rho, x_i := x_j + c) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', \varepsilon)$, wobei $\rho' = \rho\{x_i \mapsto \rho(x_j) + c\}$
- ▶ $(\rho, x_i := x_j - c) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', \varepsilon)$, wobei $\rho' = \rho\{x_i \mapsto \max(0, \rho(x_j) - c)\}$
- ▶ $(\rho, P_1; P_2) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', P_2)$ wenn $(\rho, P_1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', \varepsilon)$
- ▶ $(\rho, P_1; P_2) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', P'_1; P_2)$ wenn $(\rho, P_1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho', P'_1)$ und $P'_1 \neq \varepsilon$
- ▶ $(\rho, \mathbf{LOOP} \ x_i \ \mathbf{DO} \ P \ \mathbf{END}) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho, \underbrace{P; \dots; P}_{\rho(x_i)\text{-mal}})$

Wir schreiben $\xrightarrow{\text{LOOP}}^i$ für i Schritte und $\xrightarrow{\text{LOOP}}^*$ für 0 oder beliebig viele Schritte.

Beispiel für die Semantik von LOOP-Programmen

Programm: $x_2 := x_1 + 1;$
LOOP x_2 **DO** $x_3 := x_3 + 1$ **END**

Variablenbelegung: $\{x_1 \mapsto 2\}$

Beispiel für die Semantik von LOOP-Programmen

Programm: $x_2 := x_1 + 1;$

Variablenbelegung: $\{x_1 \mapsto 2\}$

LOOP x_2 **DO** $x_3 := x_3 + 1$ **END**

Ausführung:

$(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1; \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$

Beispiel für die Semantik von LOOP-Programmen

Programm: $x_2 := x_1 + 1;$

Variablenbelegung: $\{x_1 \mapsto 2\}$

LOOP x_2 **DO** $x_3 := x_3 + 1$ **END**

Ausführung:

$(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1; \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$

da $(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, \epsilon)$

Beispiel für die Semantik von LOOP-Programmen

Programm: $x_2 := x_1 + 1;$

Variablenbelegung: $\{x_1 \mapsto 2\}$

LOOP x_2 **DO** $x_3 := x_3 + 1$ **END**

Ausführung:

$(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1; \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$

da $(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, \epsilon)$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1)$

Beispiel für die Semantik von LOOP-Programmen

Programm: $x_2 := x_1 + 1;$

Variablenbelegung: $\{x_1 \mapsto 2\}$

LOOP x_2 **DO** $x_3 := x_3 + 1$ **END**

Ausführung:

$(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1; \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$

da $(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, \epsilon)$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1)$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 1\}, x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1)$

da $(\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, x_3 := x_3 + 1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 1\}, \epsilon)$

Beispiel für die Semantik von LOOP-Programmen

Programm: $x_2 := x_1 + 1;$

Variablenbelegung: $\{x_1 \mapsto 2\}$

LOOP x_2 **DO** $x_3 := x_3 + 1$ **END**

Ausführung:

$(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1; \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$
 $\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$
da $(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, \epsilon)$
 $\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1)$
 $\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 1\}, x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1)$
da $(\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, x_3 := x_3 + 1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 1\}, \epsilon)$
 $\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 2\}, x_3 := x_3 + 1)$
da $(\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 1\}, x_3 := x_3 + 1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 2\}, \epsilon)$

Beispiel für die Semantik von LOOP-Programmen

Programm: $x_2 := x_1 + 1;$

Variablenbelegung: $\{x_1 \mapsto 2\}$

LOOP x_2 **DO** $x_3 := x_3 + 1$ **END**

Ausführung:

$(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1; \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, \text{LOOP } x_2 \text{ DO } x_3 := x_3 + 1 \text{ END})$

da $(\{x_1 \mapsto 2\}, x_2 := x_1 + 1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, \epsilon)$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1)$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 1\}, x_3 := x_3 + 1; x_3 := x_3 + 1)$

da $(\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3\}, x_3 := x_3 + 1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 1\}, \epsilon)$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 2\}, x_3 := x_3 + 1)$

da $(\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 1\}, x_3 := x_3 + 1) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 2\}, \epsilon)$

$\xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_1 \mapsto 2, x_2 \mapsto 3, x_3 \mapsto 3\}, \epsilon)$

Definition (LOOP-berechenbare Funktion)

Eine Funktion $f : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$ heißt **LOOP-berechenbar**, wenn es ein LOOP-Programm P gibt, sodass für alle $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{N}$ gilt $(\rho, P) \xrightarrow[\text{LOOP}]{}^* (\rho', \varepsilon)$, wobei $\rho = \{x_1 \mapsto n_1, \dots, x_k \mapsto n_k\}$ und $\rho'(x_0) = f(n_1, \dots, n_k)$.

Definition (LOOP-berechenbare Funktion)

Eine Funktion $f : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$ heißt **LOOP-berechenbar**, wenn es ein LOOP-Programm P gibt, sodass für alle $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{N}$ gilt $(\rho, P) \xrightarrow[\text{LOOP}]{}^* (\rho', \varepsilon)$, wobei $\rho = \{x_1 \mapsto n_1, \dots, x_k \mapsto n_k\}$ und $\rho'(x_0) = f(n_1, \dots, n_k)$.

D.h. das LOOP-Programm

- ▶ empfängt die Eingaben über die Variablen x_1, \dots, x_k
- ▶ liefert sein Ergebnis in Variable x_0 .

Beispiel für die LOOP-Berechenbarkeit

Die Funktion $f(n_1) = n_1 + c$ ist LOOP-berechenbar.

Das Programm $x_0 := x_1 + c$ belegt dies, denn für alle $n_1 \in \mathbb{N}$:

$$(\{x_1 \mapsto n_1\}, x_0 := x_1 + c) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\{x_0 \mapsto n_1 + c, x_1 \mapsto n_1\}, \epsilon)$$

Terminierung von LOOP-Programmen

Satz

Alle LOOP-Programme terminieren. Daher sind alle LOOP-berechenbaren Funktionen total.

Terminierung von LOOP-Programmen

Satz

Alle LOOP-Programme terminieren. Daher sind alle LOOP-berechenbaren Funktionen total.

Beweis Zeige für alle (ρ, P) : es gibt $j \in \mathbb{N}$ und ρ' , sodass $(\rho, P) \xrightarrow[\text{LOOP}]{}^j (\rho', \varepsilon)$.
Durch Induktion über die Größe von P .

Terminierung von LOOP-Programmen

Satz

Alle LOOP-Programme terminieren. Daher sind alle LOOP-berechenbaren Funktionen total.

Beweis Zeige für alle (ρ, P) : es gibt $j \in \mathbb{N}$ und ρ' , sodass $(\rho, P) \xrightarrow[\text{LOOP}]{}^j (\rho', \varepsilon)$.
Durch Induktion über die Größe von P .

- ▶ Fall $(\rho, x_j := x_j \pm c)$: Es wird genau 1 Schritt benötigt.

Terminierung von LOOP-Programmen

Satz

Alle LOOP-Programme terminieren. Daher sind alle LOOP-berechenbaren Funktionen total.

Beweis Zeige für alle (ρ, P) : es gibt $j \in \mathbb{N}$ und ρ' , sodass $(\rho, P) \xrightarrow[\text{LOOP}]{}^j (\rho', \varepsilon)$.
Durch Induktion über die Größe von P .

- ▶ Fall $(\rho, x_i := x_j \pm c)$: Es wird genau 1 Schritt benötigt.
- ▶ Fall $P_1; P_2$: Die Induktionshypothese liefert j_1 und j_2 mit $(\rho, P_1; P_2) \xrightarrow[\text{LOOP}]{}^{j_1} (\rho', P_2) \xrightarrow[\text{LOOP}]{}^{j_2} (\rho'', \varepsilon)$.
Es werden genau $j_1 + j_2$ Schritte benötigt.

Terminierung von LOOP-Programmen

Satz

Alle LOOP-Programme terminieren. Daher sind alle LOOP-berechenbaren Funktionen total.

Beweis Zeige für alle (ρ, P) : es gibt $j \in \mathbb{N}$ und ρ' , sodass $(\rho, P) \xrightarrow{\text{LOOP}}^j (\rho', \varepsilon)$.
Durch Induktion über die Größe von P .

► Fall $(\rho, x_i := x_j \pm c)$: Es wird genau 1 Schritt benötigt.

► Fall $P_1; P_2$: Die Induktionshypothese liefert j_1 und j_2 mit

$$(\rho, P_1; P_2) \xrightarrow{\text{LOOP}}^{j_1} (\rho', P_2) \xrightarrow{\text{LOOP}}^{j_2} (\rho'', \varepsilon).$$

Es werden genau $j_1 + j_2$ Schritte benötigt.

► Fall **LOOP** x_i **DO** P **END**: Die Induktionshypothese j_i 's und ρ_i 's mit

$$(\rho_1, \mathbf{LOOP} \ x_i \ \mathbf{DO} \ P \ \mathbf{END}) \xrightarrow{\text{LOOP}} (\rho_1, P; P; \dots; P) \xrightarrow{\text{LOOP}}^{j_1} (\rho_2, P; \dots; P) \xrightarrow{\text{LOOP}}^{j_2}$$

$$\dots \xrightarrow{\text{LOOP}}^{j_n} (\rho_{n+1}, \varepsilon) \text{ mit } n = \rho_1(x_i).$$

Es werden genau $1 + j_1 + j_2 + \dots + j_n$ Schritte benötigt. □

- ▶ Da es partielle turingberechenbare Funktionen gibt, gilt:
Es gibt **turingberechenbare Funktionen**, die **nicht LOOP-berechenbar** sind.
Ein Beispiel ist die überall undefinierte Funktion.

- ▶ Da es partielle turingberechenbare Funktionen gibt, gilt:
Es gibt **turingberechenbare Funktionen**, die **nicht LOOP-berechenbar** sind.
Ein Beispiel ist die überall undefinierte Funktion.
- ▶ Es gilt sogar:
Es gibt **intuitiv berechenbare Funktionen**, die **total** sind, aber trotzdem **nicht LOOP-berechenbar** sind.
Ein Beispiel ist die Ackermannfunktion (später heute).

Kodierung weiterer Befehle mit LOOP-Programmen

Befehl: $x_i := c$

Kodierung: $x_i := x_n + c$

wobei x_n keine der Eingabevariablen ist und
an keiner anderen Stelle im Programm verwendet wird
(und daher $\rho(x_n) = 0$)

Kodierung weiterer Befehle mit LOOP-Programmen

Befehl: $x_i := c$

Kodierung: $x_i := x_n + c$

wobei x_n keine der Eingabevariablen ist und
an keiner anderen Stelle im Programm verwendet wird
(und daher $\rho(x_n) = 0$)

Befehl: $x_i := x_j$

Kodierung: $x_i := x_j + 0$

Kodierung weiterer Befehle mit LOOP-Programmen

Befehl: $x_i := c$

Kodierung: $x_i := x_n + c$

wobei x_n keine der Eingabevariablen ist und
an keiner anderen Stelle im Programm verwendet wird
(und daher $\rho(x_n) = 0$)

Befehl: $x_i := x_j$

Kodierung: $x_i := x_j + 0$

Befehl: **IF** $x_i = 0$ **THEN** P **END**

Kodierung: $x_n := 1$;
LOOP x_i **DO** $x_n := 0$ **END**;
LOOP x_n **DO** P **END**

wobei x_n nicht in der Eingabe und nicht in P vorkommt

Kodierung weiterer Befehle mit LOOP-Programmen

Befehl: **IF** $x_i = 0$ **THEN** P_1 **ELSE** P_2 **END**

Kodierung: $x_m := 1$;
 $x_n := 1$;
LOOP x_i **DO** $x_m := 0$ **END**;
LOOP x_m **DO** $x_n := 0$; P_1 **END**;
LOOP x_n **DO** P_2 **END**

wobei x_m, x_n nicht in der Eingabe
und nicht sonst irgendwo im Programm vorkommen

Kodierung weiterer Befehle mit LOOP-Programmen

Befehl: **IF** $x_i = 0$ **THEN** P_1 **ELSE** P_2 **END**

Kodierung: $x_m := 1;$
 $x_n := 1;$
LOOP x_i **DO** $x_m := 0$ **END;**
LOOP x_m **DO** $x_n := 0; P_1$ **END;**
LOOP x_n **DO** P_2 **END**

wobei x_m, x_n nicht in der Eingabe
und nicht sonst irgendwo im Programm vorkommen

Kompliziertere if-Bedingungen gehen auch.

Kodierung weiterer Befehle mit LOOP-Programmen

Befehl: $x_i := x_j + x_k$

Kodierung: $x_\ell := x_j$;
LOOP x_k **DO** $x_\ell := x_\ell + 1$ **END**;
 $x_i := x_\ell$

wobei x_ℓ nicht in der Eingabe
und nicht sonst irgendwo im Programm vorkommt

Kodierung weiterer Befehle mit LOOP-Programmen

Befehl: $x_i := x_j + x_k$

Kodierung: $x_\ell := x_j$;
LOOP x_k **DO** $x_\ell := x_\ell + 1$ **END**;
 $x_i := x_\ell$

wobei x_ℓ nicht in der Eingabe
und nicht sonst irgendwo im Programm vorkommt

Dies zeigt auch, dass die Additionsfunktion $f(x_1, x_2) = x_1 + x_2$ LOOP-berechenbar ist.
Andere Rechenoperationen (wie $*$, mod , div) gehen analog.