

## 9b

**WHILE- und GOTO-Programme**

Prof. Dr. Jasmin Blanchette

Lehr- und Forschungseinheit für  
Theoretische Informatik und Theorembeweisen

Stand: 18. Juni 2024

Basierend auf Folien von PD Dr. David Sabel



# Syntax von WHILE-Programmen

WHILE-Programme werden durch die kontextfreie Grammatik  $(V, \Sigma, P, Prg)$  erzeugt, wobei:

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

Beachte: WHILE-Programme [erweitern](#) LOOP-Programme um das **WHILE**-Konstrukt.

## Definition

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

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

## Definition

- ▶  $(\rho, \mathbf{WHILE } x_i \neq 0 \mathbf{ DO } P \mathbf{ END}) \xrightarrow{\text{WHILE}} (\rho, \varepsilon)$  wenn  $\rho(x_i) = 0$
- ▶  $(\rho, \mathbf{WHILE } x_i \neq 0 \mathbf{ DO } P \mathbf{ END}) \xrightarrow{\text{WHILE}} (\rho, P; \mathbf{WHILE } x_i \neq 0 \mathbf{ DO } P \mathbf{ END})$  wenn  $\rho(x_i) \neq 0$

# Semantik von WHILE-Programmen

## Definition

- ▶  $(\rho, \mathbf{WHILE } x_i \neq 0 \mathbf{ DO } P \mathbf{ END}) \xrightarrow{\text{WHILE}} (\rho, \varepsilon)$  wenn  $\rho(x_i) = 0$
- ▶  $(\rho, \mathbf{WHILE } x_i \neq 0 \mathbf{ DO } P \mathbf{ END}) \xrightarrow{\text{WHILE}} (\rho, P; \mathbf{WHILE } x_i \neq 0 \mathbf{ DO } P \mathbf{ END})$  wenn  $\rho(x_i) \neq 0$

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

## Definition

Eine Funktion  $f : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$  heißt **WHILE-berechenbar**, wenn es ein WHILE-Programm  $P$  gibt, das die folgenden Bedingungen erfüllt:

- ▶ Für alle  $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{N}$ , sodass  $f(n_1, \dots, n_k)$  definiert ist, gilt  $(\rho, P) \xrightarrow[\text{WHILE}]^* (\rho', \varepsilon)$ , wobei  $\rho = \{x_1 \mapsto n_1, \dots, x_k \mapsto n_k\}$  und  $\rho'(x_0) = f(n_1, \dots, n_k)$ .
- ▶ Falls  $f(n_1, \dots, n_k)$  nicht definiert ist, stoppt das Programm  $P$  nicht, d.h. für alle  $i \in \mathbb{N}$  gibt es  $\rho'$  und  $P'$ , sodass  $(\rho, P) \xrightarrow[\text{WHILE}]^i (\rho', P')$ .

# LOOP-berechenbar impliziert WHILE-berechenbar

---

## Satz

Jede LOOP-berechenbare Funktion ist auch WHILE-berechenbar.

# LOOP-berechenbar impliziert WHILE-berechenbar

---

## Satz

Jede LOOP-berechenbare Funktion ist auch WHILE-berechenbar.

**Beweis** Das ist offensichtlich, da jedes LOOP-Programm auch ein WHILE-Programm mit derselben Semantik ist. □



## LOOP-Schleife durch WHILE-Schleife ersetzen

---

Das **LOOP**-Konstrukt ist überflüssig in **WHILE**: Ersetze

**LOOP**  $x_j$  **DO**  $P$  **END**

durch

$x_m := x_j$ ;

**WHILE**  $x_m \neq 0$  **DO**  $x_m := x_m - 1$ ;  $P$  **END**

wobei  $x_m$  nirgends sonst vorkommt.

# WHILE-berechenbar impliziert turingberechenbar

---

## Theorem

Jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch turingberechenbar.

# WHILE-berechenbar impliziert turingberechenbar

---

## Theorem

Jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch turingberechenbar.

**Beweis** Wir haben bereits gezeigt, dass Zuweisung, Hintereinanderschaltung und **WHILE** durch Turingmaschinen darstellbar sind.

# WHILE-berechenbar impliziert turingberechenbar

---

## Theorem

Jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch turingberechenbar.

**Beweis** Wir haben bereits gezeigt, dass Zuweisung, Hintereinanderschaltung und **WHILE** durch Turingmaschinen darstellbar sind.

Dabei liegen die Variablen  $x_i$  jeweils auf Band  $i$  einer Mehrband-Turingmaschine.

# WHILE-berechenbar impliziert turingberechenbar

---

## Theorem

Jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch turingberechenbar.

**Beweis** Wir haben bereits gezeigt, dass Zuweisung, Hintereinanderschaltung und **WHILE** durch Turingmaschinen darstellbar sind.

Dabei liegen die Variablen  $x_i$  jeweils auf Band  $i$  einer Mehrband-Turingmaschine.

**LOOP** wird vorher in **LOOP**-freies WHILE-Programm transformiert. □

# Syntax von GOTO-Programmen

GOTO-Programme werden durch die kontextfreie Grammatik  $(V, \Sigma, P, Prg)$  erzeugt, wobei:

$$\begin{aligned} V &= \{Prg, Var, Id, Const\} \\ \Sigma &= \{\mathbf{GOTO}, \mathbf{HALT}, \mathbf{IF}, \mathbf{THEN}, x, 0, \dots, 9, ;;, :=, +, -\} \\ P &= \{Prg \rightarrow M_{Id}: \mathbf{GOTO} M_{Id} \\ &\quad | M_{Id}: \mathbf{IF} x_i = 0 \mathbf{THEN GOTO} M_{Id} \\ &\quad | M_{Id}: \mathbf{HALT} \\ &\quad | M_{Id}: Var := Var + Const \\ &\quad | M_{Id}: Var := Var - Const \\ &\quad | Prg; Prg, \\ Var &\rightarrow x_{Id}, \\ Const &\rightarrow Id, \\ Id &\rightarrow 0 | 1 | \dots | 9 | 1Id | 2Id | \dots 9Id\} \end{aligned}$$

Befehle sind mit **verschiedenen**  $M_i$ : markiert. Wir lassen sie manchmal weg.

# Semantik von GOTO-Programmen

## Definition

Seien  $P_0$  ein normalisiertes GOTO-Programm,  $P$  ein GOTO-Programm und  $\rho$  eine Variablenbelegung. Dann sind die Berechnungsschritte  $\frac{P_0}{\text{GOTO}}$  durch folgende Regeln definiert:

- ▶  $(\rho, M_i: x_j := x_k + c; P) \xrightarrow{\text{GOTO}} (\rho', P)$ , wobei  $\rho' = \rho\{x_j \mapsto \rho(x_k) + c\}$
- ▶  $(\rho, M_i: x_j := x_k + c) \xrightarrow{\text{GOTO}} (\rho', \varepsilon)$ , wobei  $\rho' = \rho\{x_j \mapsto \rho(x_k) + c\}$
- ▶  $(\rho, M_i: x_j := x_k - c; P) \xrightarrow{\text{GOTO}} (\rho', P)$ , wobei  $\rho' = \rho\{x_j \mapsto \max(0, \rho(x_k) - c)\}$
- ▶  $(\rho, M_i: x_j := x_k - c) \xrightarrow{\text{GOTO}} (\rho', \varepsilon)$ , wobei  $\rho' = \rho\{x_j \mapsto \max(0, \rho(x_k) - c)\}$
- ▶  $(\rho, M_i: \mathbf{GOTO} M_k; P) \xrightarrow{\text{GOTO}} (\rho, M_k: A_k; \dots; M_n: A_n)$  wenn  $1 \leq k \leq n$
- ▶  $(\rho, M_i: \mathbf{GOTO} M_k) \xrightarrow{\text{GOTO}} (\rho, M_k: A_k; \dots; M_n: A_n)$  wenn  $1 \leq k \leq n$

## Definition

- ▶  $(\rho, M_i: \mathbf{IF } x_r = 0 \mathbf{ THEN GOTO } M_k; P) \xrightarrow[\text{GOTO}]{M_1: A_1; \dots; M_n: A_n} (\rho, M_k: A_k; \dots; M_n: A_n)$   
wenn  $1 \leq k \leq n$  und  $\rho(x_r) = 0$
- ▶  $(\rho, M_i: \mathbf{IF } x_r = 0 \mathbf{ THEN GOTO } M_k) \xrightarrow[\text{GOTO}]{M_1: A_1; \dots; M_n: A_n} (\rho, M_k: A_k; \dots; M_n: A_n)$   
wenn  $1 \leq k \leq n$  und  $\rho(x_r) = 0$
- ▶  $(\rho, M_i: \mathbf{IF } x_r = 0 \mathbf{ THEN GOTO } M_k; P) \xrightarrow[\text{GOTO}]{P_0} (\rho, P)$  wenn  $\rho(x_r) \neq 0$
- ▶  $(\rho, M_i: \mathbf{IF } x_r = 0 \mathbf{ THEN GOTO } M_k) \xrightarrow[\text{GOTO}]{P_0} (\rho, \varepsilon)$  wenn  $\rho(x_r) \neq 0$
- ▶  $(\rho, M_i: \mathbf{HALT}; P) \xrightarrow[\text{GOTO}]{P_0} (\rho, M_i: \mathbf{HALT})$
- ▶  $(\rho, \varepsilon) \xrightarrow[\text{GOTO}]{P_0} (\rho, \varepsilon)$



# Semantik von GOTO-Programmen

## Definition

- ▶  $(\rho, M_j: \text{IF } x_r = 0 \text{ THEN GOTO } M_k; P) \xrightarrow[\text{GOTO}]{M_1: A_1; \dots; M_n: A_n} (\rho, M_k: A_k; \dots; M_n: A_n)$   
wenn  $1 \leq k \leq n$  und  $\rho(x_r) = 0$
- ▶  $(\rho, M_j: \text{IF } x_r = 0 \text{ THEN GOTO } M_k) \xrightarrow[\text{GOTO}]{M_1: A_1; \dots; M_n: A_n} (\rho, M_k: A_k; \dots; M_n: A_n)$   
wenn  $1 \leq k \leq n$  und  $\rho(x_r) = 0$
- ▶  $(\rho, M_j: \text{IF } x_r = 0 \text{ THEN GOTO } M_k; P) \xrightarrow[\text{GOTO}]{P_0} (\rho, P)$  wenn  $\rho(x_r) \neq 0$
- ▶  $(\rho, M_j: \text{IF } x_r = 0 \text{ THEN GOTO } M_k) \xrightarrow[\text{GOTO}]{P_0} (\rho, \varepsilon)$  wenn  $\rho(x_r) \neq 0$
- ▶  $(\rho, M_j: \text{HALT}; P) \xrightarrow[\text{GOTO}]{P_0} (\rho, M_j: \text{HALT})$
- ▶  $(\rho, \varepsilon) \xrightarrow[\text{GOTO}]{P_0} (\rho, \varepsilon)$

Wir schreiben  $\xrightarrow[\text{GOTO}]{P_0}^i$  für  $i$  Schritte und  $\xrightarrow[\text{GOTO}]{P_0}^*$  für 0 oder beliebig viele Schritte.

## Definition

Ein GOTO-Programme ist **normalisiert**, wenn es von der Form  $M_1 : A_1; \dots; M_n : A_n$  ist. Diese Form ist durch konsistentes Umbenennen der Markierungen herstellbar.

## Definition

Ein GOTO-Programme ist **normalisiert**, wenn es von der Form  $M_1 : A_1; \dots; M_n : A_n$  ist. Diese Form ist durch konsistentes Umbenennen der Markierungen herstellbar.

Eine Funktion  $f : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$  heißt **GOTO-berechenbar**, wenn es ein normalisiertes GOTO-Programm  $P$  gibt, das die folgenden Bedingungen erfüllt:

- ▶ Für alle  $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{N}$ , sodass  $f(n_1, \dots, n_k)$  definiert ist, gilt  $(\rho, P) \xrightarrow[\text{GOTO}]{P}^* (\rho', \mathbf{HALT})$ , wobei  $\rho = \{x_1 \mapsto n_1, \dots, x_k \mapsto n_k\}$  und  $\rho'(x_0) = f(n_1, \dots, n_k)$ .
- ▶ Falls  $f(n_1, \dots, n_k)$  nicht definiert ist, stoppt das Programm  $P$  nicht, d.h. für alle  $i \in \mathbb{N}$  gibt es  $\rho'$  und  $P'$ , sodass  $(\rho, P) \xrightarrow[\text{GOTO}]{P}^i (\rho', P')$ .

## WHILE-berechenbar impliziert GOTO-berechenbar

---

### **Satz**

Jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch GOTO-berechenbar.

# WHILE-berechenbar impliziert GOTO-berechenbar

## Satz

Jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch GOTO-berechenbar.

**Beweis** Wir simulieren ein **WHILE-Programm** durch ein **GOTO-Programm**.

- ▶  $x_j := x_k \pm c$  und  $P_1; P_2$  bleiben ungeändert.

# WHILE-berechenbar impliziert GOTO-berechenbar

## Satz

Jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch GOTO-berechenbar.

**Beweis** Wir simulieren ein **WHILE-Programm** durch ein **GOTO-Programm**.

- ▶  $x_j := x_k \pm c$  und  $P_1; P_2$  bleiben ungeändert.
- ▶ Ersetze **LOOP**-Schleifen durch **WHILE**-Schleifen.

# WHILE-berechenbar impliziert GOTO-berechenbar

## Satz

Jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch GOTO-berechenbar.

**Beweis** Wir simulieren ein **WHILE-Programm** durch ein **GOTO-Programm**.

- ▶  $x_j := x_k \pm c$  und  $P_1; P_2$  bleiben ungeändert.
- ▶ Ersetze **LOOP**-Schleifen durch **WHILE**-Schleifen.
- ▶ Ersetze **WHILE**  $x_i \neq 0$  **DO**  $P$  **END** durch

```
 $M_j$ :   IF  $x_i = 0$  THEN GOTO  $M_k$ ;  
       $\vdots$     $P'$ ;  
 $M_{k-1}$ : GOTO  $M_j$ ;  
 $M_k$ :
```

wobei  $P'$  das GOTO-Programm zu  $P$  ist.

# WHILE-berechenbar impliziert GOTO-berechenbar

## Satz

Jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch GOTO-berechenbar.

**Beweis** Wir simulieren ein **WHILE-Programm** durch ein **GOTO-Programm**.

- ▶  $x_j := x_k \pm c$  und  $P_1; P_2$  bleiben ungeändert.
- ▶ Ersetze **LOOP**-Schleifen durch **WHILE**-Schleifen.
- ▶ Ersetze **WHILE**  $x_i \neq 0$  **DO**  $P$  **END** durch

```

$$\begin{aligned} M_j: & \text{ IF } x_i = 0 \text{ THEN GOTO } M_k; \\ & \vdots \\ & P'; \\ M_{k-1}: & \text{ GOTO } M_j; \\ M_k: & \end{aligned}$$

```

wobei  $P'$  das GOTO-Programm zu  $P$  ist.

- ▶ Füge **HALT** am Ende ein.



# WHILE-berechenbar impliziert GOTO-berechenbar

**Beweis** (Fortsetzung) Sei  $P$  das WHILE-Programm und  $P'$  das GOTO-Programm.

Dann gilt:

- ▶ Falls  $(\rho, P) \xrightarrow{\text{WHILE}}^* (\rho', \varepsilon)$ , dann  $(\rho, P') \xrightarrow{\text{GOTO}}^* (\rho'', \mathbf{HALT})$   
mit  $\rho''(x_0) = \rho'(x_0)$ .
- ▶ Falls  $(\rho, P') \xrightarrow{\text{GOTO}}^* (\rho', \mathbf{HALT})$ , dann  $(\rho, P) \xrightarrow{\text{WHILE}}^* (\rho'', \varepsilon)$   
mit  $\rho''(x_0) = \rho'(x_0)$ .

□

# GOTO-berechenbar impliziert WHILE-berechenbar

## Satz

Jede GOTO-berechenbare Funktion ist auch WHILE-berechenbar.

**Beweis** Sei  $M_1: A_1; \dots; M_n: A_n$  ein normalisiertes GOTO-Programm, sodass  $x_M$  nicht darin vorkommt. Definiere folgendes passendes WHILE-Programm:

```
 $x_M := 1;$   
WHILE  $x_M \neq 0$  DO  
  IF  $x_M = 1$  THEN  $P_1$  END;  
   $\vdots$   
  IF  $x_M = n$  THEN  $P_n$  END;  
END
```

wobei  $P_i$  auf der nächsten Folie definiert ist.

# GOTO-berechenbar impliziert WHILE-berechenbar

**Beweis** (Fortsetzung)  $P_i$  ist definiert wie folgt:

- ▶ Falls  $A_i = x_j := x_k \pm c$ :  
 $x_j := x_k \pm c; x_M := x_M + 1$
- ▶ Falls  $A_i = \mathbf{GOTO} M_j$ :  
 $x_M := j$
- ▶ Falls  $A_i = \mathbf{IF} x_k = 0 \mathbf{THEN GOTO} M_j$ :  
 $\mathbf{IF} x_k = 0 \mathbf{THEN} x_M := j \mathbf{ELSE} x_M := x_M + 1 \mathbf{END}$
- ▶ Falls  $A_i = \mathbf{HALT}$ :  
 $x_M := 0$ .

# GOTO-berechenbar impliziert WHILE-berechenbar

**Beweis** (Fortsetzung) Sei  $P$  das GOTO-Programm und  $P'$  das WHILE-Programm.

Dann gilt:

- ▶ Falls  $(\rho, P) \xrightarrow{\text{GOTO}}^* (\rho', \mathbf{HALT})$ , dann  $(\rho, P') \xrightarrow{\text{WHILE}}^* (\rho'', \varepsilon)$   
mit  $\rho''(x_0) = \rho'(x_0)$ .
- ▶ Falls  $(\rho, P') \xrightarrow{\text{WHILE}}^* (\rho', \varepsilon)$ , dann  $(\rho, P) \xrightarrow{\text{GOTO}}^* (\rho'', \mathbf{HALT})$   
mit  $\rho''(x_0) = \rho'(x_0)$ .

□

# GOTO-berechenbar ist äquivalent zu WHILE-berechenbar

---

## Theorem

WHILE- und GOTO-Berechenbarkeit sind äquivalente Begriffe. D.h. jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch GOTO-berechenbar und umgekehrt ist jede GOTO-berechenbare Funktion auch WHILE-berechenbar.

# GOTO-berechenbar ist äquivalent zu WHILE-berechenbar

---

## Theorem

WHILE- und GOTO-Berechenbarkeit sind äquivalente Begriffe. D.h. jede WHILE-berechenbare Funktion ist auch GOTO-berechenbar und umgekehrt ist jede GOTO-berechenbare Funktion auch WHILE-berechenbar.

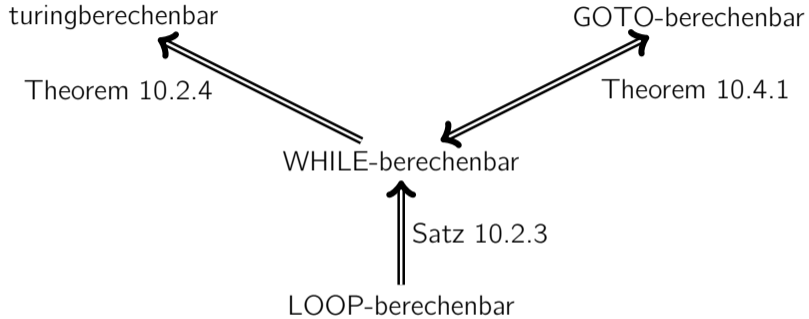
Die Übersetzung von GOTO-Programmen in WHILE-Programme zeigen auch:

## Satz

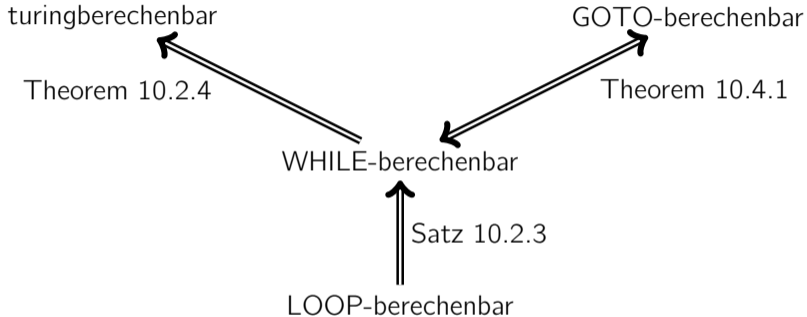
WHILE-Programme benötigen nur eine **WHILE**-Schleife.

# Fazit bisher

---



# Fazit bisher



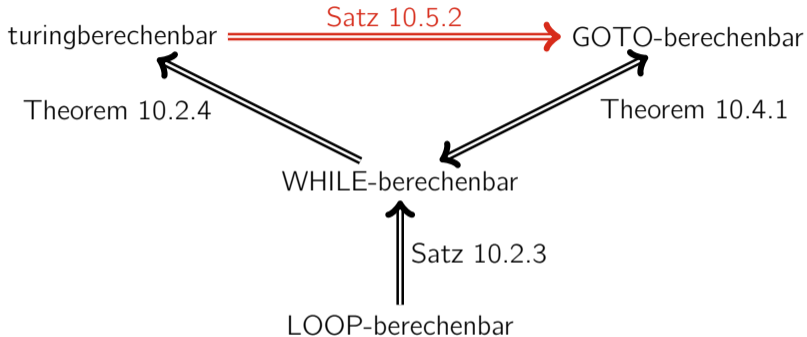
Unser Ziel:

## Theorem

Turingberechenbarkeit, WHILE-Berechenbarkeit und GOTO-Berechenbarkeit sind äquivalente Begriffe.



# Fazit bisher



Unser Ziel:

## Theorem

Turingberechenbarkeit, WHILE-Berechenbarkeit und GOTO-Berechenbarkeit sind äquivalente Begriffe.

# Turingberechenbar impliziert GOTO-berechenbar

---

## Satz

Jede turingberechenbare Funktion ist auch GOTO-berechenbar.

**Beweis** Grundgedanke:

- ▶ Stelle TM-Konfiguration durch 3 Zahlen dar.
- ▶ Lege Zahlen in Programmvariablen ab.

# Darstellung von Wörtern als natürliche Zahlen

---

- ▶ Sei  $\Gamma = \{a_1, \dots, a_m\}$  das Bandalphabet.
- ▶ Zeichen  $a_i$  wird mit Index  $i$  identifiziert. (Beachte:  $i \neq 0$ .)  
D.h.  $a_{i_1} \cdots a_{i_n} \in \Gamma^*$  ist äquivalent zur Folge  $(i_1 \dots i_n)$ .
- ▶ Sei  $b > m$ .

# Darstellung von Wörtern als natürliche Zahlen

- ▶ Sei  $\Gamma = \{a_1, \dots, a_m\}$  das Bandalphabet.
- ▶ Zeichen  $a_i$  wird mit Index  $i$  identifiziert. (Beachte:  $i \neq 0$ .)  
D.h.  $a_{i_1} \cdots a_{i_n} \in \Gamma^*$  ist äquivalent zur Folge  $(i_1 \dots i_n)$ .
- ▶ Sei  $b > m$ .

Kodierung: Das Wort  $a_{i_1} \dots a_{i_n}$  lässt sich als Zahl  $(i_1 \cdots i_n)_b$  im Stellenwertsystem zur Basis  $b$  darstellen. Der Wert von  $a_{i_1} \cdots a_{i_n}$  ist

$$(i_1 \cdots i_n)_b = \sum_{j=1}^n i_j \cdot b^{n-j}$$

# Darstellung von Wörtern als natürliche Zahlen

- ▶ Sei  $\Gamma = \{a_1, \dots, a_m\}$  das Bandalphabet.
- ▶ Zeichen  $a_i$  wird mit Index  $i$  identifiziert. (Beachte:  $i \neq 0$ .)  
D.h.  $a_{i_1} \cdots a_{i_n} \in \Gamma^*$  ist äquivalent zur Folge  $(i_1 \dots i_n)$ .
- ▶ Sei  $b > m$ .

Kodierung: Das Wort  $a_{i_1} \dots a_{i_n}$  lässt sich als Zahl  $(i_1 \cdots i_n)_b$  im Stellenwertsystem zur Basis  $b$  darstellen. Der Wert von  $a_{i_1} \cdots a_{i_n}$  ist

$$(i_1 \cdots i_n)_b = \sum_{j=1}^n i_j \cdot b^{n-j}$$

Umkehrung: Berechne  $(i_1 \cdots i_n)$  aus einer natürlichen Zahl.

- ▶ Teile wiederholt mit Rest durch Basis  $b$  bis kein Rest mehr entsteht.
- ▶ Liste der Reste:  $r_0, \dots, r_m$ .
- ▶ Ergibt  $(r_m \cdots r_0)_b$  zur Basis  $b$  und repräsentiert daher das Wort  $a_{r_m} \cdots a_{r_0}$ .

## Beispiel für die Darstellung von Wörtern als natürliche Zahlen

---

Sei  $\Gamma = \{\square, 0, 1\}$ , sodass  $a_1 = \square$ ,  $a_2 = 0$ ,  $a_3 = 1$ .

## Beispiel für die Darstellung von Wörtern als natürliche Zahlen

---

Sei  $\Gamma = \{\square, 0, 1\}$ , sodass  $a_1 = \square$ ,  $a_2 = 0$ ,  $a_3 = 1$ .

Betrachte  $\square 110\square$ , d.h.  $a_1 a_3 a_3 a_2 a_1$ . Sei  $b = 4$ .

## Beispiel für die Darstellung von Wörtern als natürliche Zahlen

Sei  $\Gamma = \{\square, 0, 1\}$ , sodass  $a_1 = \square$ ,  $a_2 = 0$ ,  $a_3 = 1$ .

Betrachte  $\square 110\square$ , d.h.  $a_1 a_3 a_3 a_2 a_1$ . Sei  $b = 4$ .

Identifiziere  $\square 110\square$  mit  $(13321)$  und

$$(13321)_4 = 1*4^4 + 3*4^3 + 3*4^2 + 2*4^1 + 1*4^0 = 1*256 + 3*64 + 3*16 + 2*4 + 1*1 = 505.$$



## Beispiel für die Darstellung von Wörtern als natürliche Zahlen

Sei  $\Gamma = \{\square, 0, 1\}$ , sodass  $a_1 = \square, a_2 = 0, a_3 = 1$ .

Betrachte  $\square 110\square$ , d.h.  $a_1 a_3 a_3 a_2 a_1$ . Sei  $b = 4$ .

Identifiziere  $\square 110\square$  mit  $(13321)$  und

$$(13321)_4 = 1 \cdot 4^4 + 3 \cdot 4^3 + 3 \cdot 4^2 + 2 \cdot 4^1 + 1 \cdot 4^0 = 1 \cdot 256 + 3 \cdot 64 + 3 \cdot 16 + 2 \cdot 4 + 1 \cdot 1 = 505.$$

Umgekehrt ergibt

$$505/4 = 126 \quad \text{Rest } 1$$

$$126/4 = 31 \quad \text{Rest } 2$$

$$31/4 = 7 \quad \text{Rest } 3$$

$$7/4 = 1 \quad \text{Rest } 3$$

$$1/4 = 0 \quad \text{Rest } 1$$

$$0/4 = 0 \quad \text{Rest } 0$$

Dies ergibt die Zahl  $(13321)_4$ , welche das Wort  $a_1 a_3 a_3 a_2 a_1 = \square 110\square$  darstellt.

# Kodierung von Turingmaschinen-Konfiguration im GOTO-Programm

Eine beliebige Konfiguration einer Turingmaschine mit  $\Gamma = \{a_1, \dots, a_m\}$  ist von der Form

$$a_{i_1} \cdots a_{i_n} Z_k a_{j_1} \cdots a_{j_m}$$

# Kodierung von Turingmaschinen-Konfiguration im GOTO-Programm

Eine beliebige Konfiguration einer Turingmaschine mit  $\Gamma = \{a_1, \dots, a_m\}$  ist von der Form

$$a_{i_1} \cdots a_{i_n} z_k a_{j_1} \cdots a_{j_m}$$

Sie wird im GOTO-Programm durch 3 Variablen  $x_z, x_p, x_s$  dargestellt:

$$x_z = k$$

$$x_p = (i_1 \cdots i_n)_b$$

$$x_s = (j_m \cdots j_1)_b$$

Beachte:  $x_s$  verwendet umgekehrte Reihenfolge der Ziffern.

## GOTO-Programme für Übergänge

---

Für  $\delta(z_k, a_{j_1}) = (z_\ell, a_{j'}, x)$  mit  $x \in \{N, L, R\}$  sei  $DELTA(k, j_1)$  das zugehörige GOTO-Programm. Wir gehen die verschiedenen Fälle durch.

# GOTO-Programme für Übergänge

Für  $\delta(z_k, a_{j_1}) = (z_\ell, a_{j'}, x)$  mit  $x \in \{N, L, R\}$  sei  $DELTA(k, j_1)$  das zugehörige GOTO-Programm. Wir gehen die verschiedenen Fälle durch.

- ▶ Fall  $\delta(z_k, a_{j_1}) = (z_\ell, a_{j'}, N)$ :

Der Übergang ist

$$a_{i_1} \cdots a_{i_n} z_k a_{j_1} \cdots a_{j_m} \vdash a_{i_1} \cdots a_{i_n} z_\ell a_{j'} a_{j_2} \cdots a_{j_m}$$

Daher:

- ▶  $x_z$  muss auf den Wert  $\ell$  aktualisiert werden.
- ▶  $x_p$  bleibt unverändert.
- ▶  $x_s$  muss von  $(j_m \cdots j_1)_b$  zu  $(j_m \cdots j_2 j')_b$  aktualisiert werden.

# GOTO-Programme für Übergänge

Für  $\delta(z_k, a_{j_1}) = (z_\ell, a_{j'}, x)$  mit  $x \in \{N, L, R\}$  sei  $DELTA(k, j_1)$  das zugehörige GOTO-Programm. Wir gehen die verschiedenen Fälle durch.

- ▶ Fall  $\delta(z_k, a_{j_1}) = (z_\ell, a_{j'}, N)$ :

Der Übergang ist

$$a_{i_1} \cdots a_{i_n} z_k a_{j_1} \cdots a_{j_m} \vdash a_{i_1} \cdots a_{i_n} z_\ell a_{j'} a_{j_2} \cdots a_{j_m}$$

Daher:

- ▶  $x_z$  muss auf den Wert  $\ell$  aktualisiert werden.
- ▶  $x_p$  bleibt unverändert.
- ▶  $x_s$  muss von  $(j_m \cdots j_1)_b$  zu  $(j_m \cdots j_2 j')$  aktualisiert werden.

Das Programm  $DELTA(k, j_1)$  sei dann

$$x_z := \ell;$$

$$x_s := x_s \text{ div } b;$$

$$x_s := b * x_s + j'$$

# GOTO-Programme für Übergänge

- ▶ Fall  $\delta(z_k, a_{j_1}) = (z_\ell, a_{j'}, R)$ :

Der Übergang ist

$$a_{i_1} \cdots a_{i_n} z_k a_{j_1} \cdots a_{j_m} \vdash a_{i_1} \cdots a_{i_n} a_{j'} z_\ell a_{j_2} \cdots a_{j_m}$$

falls  $m > 1$ . Daher:

- ▶  $x_z$  muss auf den Wert  $\ell$  aktualisiert werden.
- ▶  $x_p$  muss von  $(i_1 \cdots i_n)_b$  zu  $(i_1 \cdots i_n j')_b$  aktualisiert werden.
- ▶  $x_s$  muss von  $(j_m \cdots j_1)_b$  zu  $(j_m \cdots j_2)_b$  aktualisiert werden.

# GOTO-Programme für Übergänge

- ▶ Fall  $\delta(z_k, a_{j_1}) = (z_\ell, a_{j'}, R)$ :

Der Übergang ist

$$a_{i_1} \cdots a_{i_n} z_k a_{j_1} \cdots a_{j_m} \vdash a_{i_1} \cdots a_{i_n} a_{j'} z_\ell a_{j_2} \cdots a_{j_m}$$

falls  $m > 1$ . Daher:

- ▶  $x_z$  muss auf den Wert  $\ell$  aktualisiert werden.
- ▶  $x_p$  muss von  $(i_1 \cdots i_n)_b$  zu  $(i_1 \cdots i_n j')_b$  aktualisiert werden.
- ▶  $x_s$  muss von  $(j_m \cdots j_1)_b$  zu  $(j_m \cdots j_2)_b$  aktualisiert werden.

Das Programm  $DELTA(k, j_1)$  sei dann

$$x_z := \ell;$$

$$x_p := b * x_p + j';$$

$$x_s := x_s \text{ div } b$$



# GOTO-Programme für Übergänge

Für den Fall  $m = 1$  gilt

$$a_{i_1} \cdots a_{i_n} z_k a_{j_1} \vdash a_{i_1} \cdots a_{i_n} a_{j'} z_\ell \square$$

Das Programm  $DELTA(k, j_1)$  sei dann

$$x_z := \ell;$$

$$x_p := b * x_p + j'; \quad \text{wobei } \square = a_r.$$

$$x_s := r$$

# GOTO-Programme für Übergänge

---

- ▶ Fall  $\delta(z_k, a_{j_1}) = (z_\ell, a_{j'}, L)$ :

# GOTO-Programme für Übergänge

- ▶ Fall  $\delta(z_k, a_{j_1}) = (z_\ell, a_{j'}, L)$ :

Der Übergang ist

$$a_{i_1} \cdots a_{i_n} z_k a_{j_1} \cdots a_{j_m} \vdash a_{i_1} \cdots a_{i_{n-1}} z_\ell a_{i_n} a_{j'} a_{j_2} \cdots a_{j_m}$$

falls  $n > 0$ . Daher:

- ▶  $x_z$  muss auf den Wert  $\ell$  aktualisiert werden.
- ▶  $x_p$  muss von  $(i_1 \cdots i_n)_b$  zu  $(i_1 \cdots i_{n-1})_b$  aktualisiert werden.
- ▶  $x_s$  muss von  $(j_m \cdots j_1)_b$  zu  $(j_m \cdots j_2 j' i_n)_b$  aktualisiert werden.

# GOTO-Programme für Übergänge

- ▶ Fall  $\delta(z_k, a_{j_1}) = (z_\ell, a_{j'}, L)$ :

Der Übergang ist

$$a_{i_1} \cdots a_{i_n} z_k a_{j_1} \cdots a_{j_m} \vdash a_{i_1} \cdots a_{i_{n-1}} z_\ell a_{i_n} a_{j'} a_{j_2} \cdots a_{j_m}$$

falls  $n > 0$ . Daher:

- ▶  $x_z$  muss auf den Wert  $\ell$  aktualisiert werden.
- ▶  $x_p$  muss von  $(i_1 \cdots i_n)_b$  zu  $(i_1 \cdots i_{n-1})_b$  aktualisiert werden.
- ▶  $x_s$  muss von  $(j_m \cdots j_1)_b$  zu  $(j_m \cdots j_2 j' i_n)_b$  aktualisiert werden.

Das Programm  $DELTA(k, j_1)$  dazu:

```
x_z := ℓ; // neuer Zustand z_ℓ
x_s := x_s div b; // Abschneiden der letzten Stelle: (j_m ⋯ j_1) → (j_m ⋯ j_2)
x_s := b * x_s + j'; // j' als letzte Stelle hinzufügen: (j_m ⋯ j_2) → (j_m ⋯ j_2 j')
x_s := b * x_s + (x_p mod b); // i_n = x_p mod b am Ende hinzufügen:
// (j_m ⋯ j_2 j') → (j_m ⋯ j_2 j' i_n)
x_p := x_p div b // Abschneiden der letzten Stelle: (i_1 ⋯ i_n) → (i_1 ⋯ i_{n-1})
```

# GOTO-Programme für Übergänge

---

Für den Fall  $n = 0$  gilt

$$z_k a_{j_1} \cdots a_{j_m} \vdash z_\ell \square a_{j_1} \cdots a_{j_m}$$

Setze zuerst  $x_p := r$ , wobei  $\square = a_r$  und führe dann das Programm für den allgemeinen Fall aus.

## Turingberechenbar impliziert GOTO-berechenbar

---

Die Turingmaschine wird durch das folgende GOTO-Programm simuliert (mit Eingaben in  $x_1, \dots, x_k$  und Ausgabe in  $x_0$ ):

$M_1 : P_1;$

$M_2 : P_2;$

$M_3 : P_3$

- ▶  $P_1$  erzeugt für die Eingabe in  $x_1, \dots, x_k$  die Binärzahldarstellung und dann die Darstellung der TM-Konfiguration in  $x_p, x_z, x_s$ .
- ▶  $P_2$ : Siehe nächste Folie.
- ▶  $P_3$  verwendet die Darstellung der Endkonfiguration, um die Ausgabe in der Ausgabevariablen  $x_0$  zu erzeugen.

## Turingberechenbar impliziert GOTO-berechenbar

Programmteil  $P_2$  hat die Form:

```
 $M_2$  :    $x_a := x_s \text{ mod } b$ ;  
         IF  $x_z = 1$  and  $x_a = 1$  THEN GOTO  $M_{1,1}$ ;  
         IF  $x_z = 1$  and  $x_a = 2$  THEN GOTO  $M_{1,2}$ ;  
          $\vdots$   
         IF  $x_z = q$  and  $x_a = m$  THEN GOTO  $M_{q,m}$ ;  
 $M_{1,1}$  :  $P_{1,1}$ ;  
         GOTO  $M_2$ ;  
 $M_{1,2}$  :  $P_{1,2}$ ;  
         GOTO  $M_2$ ;  
          $\vdots$   
 $M_{q,m}$  :  $P_{q,m}$   
         GOTO  $M_2$ 
```

Programm  $P_{i,j}$  ist **GOTO**  $M_3$ , wenn  $z_i \in E$  und  $DELTA(i,j)$  sonst. □

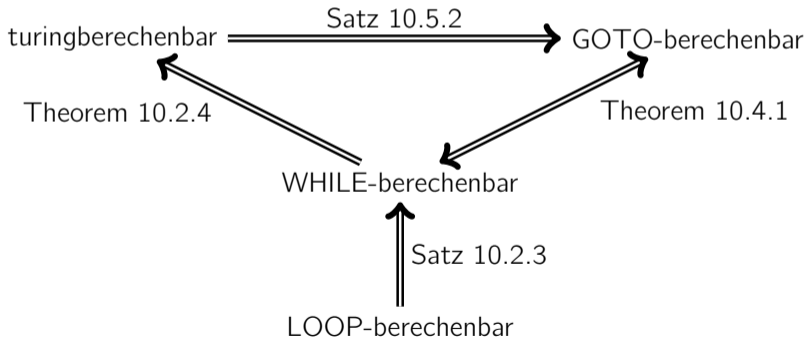
## Theorem

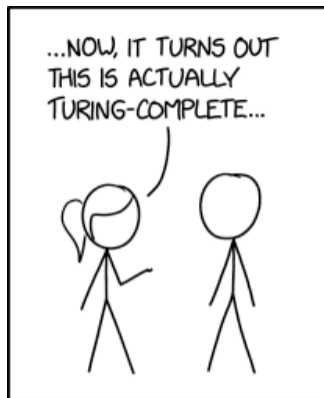
Turingberechenbarkeit, WHILE-Berechenbarkeit und GOTO-Berechenbarkeit sind äquivalente Begriffe.



## Theorem

Turingberechenbarkeit, WHILE-Berechenbarkeit und GOTO-Berechenbarkeit sind äquivalente Begriffe.





THIS PHRASE EITHER MEANS  
SOMEONE SPENT SIX MONTHS  
GETTING A DISHWASHER TO  
PLAY MARIO OR YOU'RE UNDER  
ATTACK BY A NATION-STATE.

[xkcd.com/2556/](http://xkcd.com/2556/)