

# Grundlagen der Theoretischen Informatik

## Turingmaschinen und rekursiv aufzählbare Sprachen (II)

25.06.2019

Viorica Sofronie-Stokkermans

e-mail: [sofronie@uni-koblenz.de](mailto:sofronie@uni-koblenz.de)

# Organisatorisches

---

## Ergebnisse 1 TK:

spätestens am Montag, 1.07.2019 oder Dienstag, 2.07.2019

**2 TK:** Dienstag, 23.07.2019, 10:00-11:00, E011

- Anmeldung bis 15.07.2019 möglich (über KLIPS)
- Rücktritt bis 16.07.2019 möglich (über KLIPS)

## Nachklausur:

Montag, 7. September 2019, 13:00-15:00, Raum D028  
(Raum noch nicht bestätigt)

# Übersicht

---

1. Motivation
2. Terminologie
3. Endliche Automaten und reguläre Sprachen
4. Kellerautomaten und kontextfreie Sprachen
5. Turingmaschinen und rekursiv aufzählbare Sprachen
6. Berechenbarkeit, (Un-)Entscheidbarkeit
7. Komplexitätsklassen P und NP

# Turing-Maschine

---

## Definition (Turing Machine (DTM))

Eine **determinierte Turing-Maschine (DTM)**  $\mathcal{M}$  ist ein Tupel

$$\mathcal{M} = ( K, \Sigma, \delta, s )$$

Dabei ist

- $K$  eine endliche Menge von Zuständen mit  $h \notin K$ ,  
( $h$  ist der **Haltezustand**)
- $\Sigma$  ein Alphabet mit  $L, R \notin \Sigma$ ,  $\# \in \Sigma$ ,
- $\delta : K \times \Sigma \rightarrow (K \cup \{h\}) \times (\Sigma \cup \{L, R\})$  eine **Übergangsfunktion**
- $s \in K$  ein Startzustand.

Anzahl der Zustände:  $|K| - 1$   
(Startzustand wird nicht mitgezählt).

# Turing-Maschine

---

## Arbeitsschritt einer Turing-Maschine

Übergang

$$\delta(q, a) = (q', x)$$

bedeutet:

In Abhängigkeit

- vom aktuellen Zustand  $q \in K$
- von dem Zeichen  $a \in \Sigma$ , das unter dem Schreib-/Lesekopf steht

geschieht folgendes:

- entweder ein **Schritt nach links**, falls  $x = L$  ist
- oder ein **Schritt nach rechts**, falls  $x = R$  ist
- oder **das Zeichen  $a$** , das momentan unter dem Schreib-/Lesekopf steht, wird **durch  $b \in \Sigma$  überschreiben**, falls  $x = b \in \Sigma$
- der **Zustand** wird zu  $q' \in K \cup \{h\}$  **geändert**,

# Turing-Maschine

---

## Leerzeichen

Das spezielle Zeichen  $\#$  (*blank*) ist das Leerzeichen.

Es ist nie Teil des Eingabeworts; man kann es u.a. dazu benutzen, Wörter voneinander abzugrenzen.

## Begrenzung des Bandes

Das Band einer DTM ist **einseitig unbeschränkt**:

- Nach rechts ist es unendlich lang.
- Nach links hat es ein Ende.
- Wenn eine DTM versucht, das Ende zu überschreiten, bleibt sie „hängen“.

In diesem Fall **hält sie nicht**.

# Turing-Maschine

---

## Anfangskonfiguration

- Ganz links auf dem Band steht ein Blank
- Direkt rechts davon steht das Eingabewort
- Wenn eine DTM mehrere Eingabewörter hintereinander bekommt, sind sie durch Blanks getrennt.
- Rechts vom letzten Eingabewort stehen nur noch Blanks.
- Der Schreib-/Lesekopf der DTM steht auf dem Blank direkt rechts neben dem (letzten) Eingabewort.

## Merke:

Das Band enthält immer nur endlich viele Symbole, die keine Blanks sind.

# Beispiele: Letzte Vorlesung

---

**Beispiel 1:**  $\mathcal{R}(a)$ :  $a$ 's durch  $b$ 's ersetzen

Turing-Maschine  $\mathcal{R}(a)$ : erwartet *ein* Eingabewort.

Sie liest es von rechts nach links einmal durch und macht dabei jedes  $a$  zu einem  $b$ .

**Beispiel 2** ( $L_{\#}$ )

Turing-Maschine  $L_{\#}$ : läuft zum ersten Blank links von der momentanen Position.



# Turing-Maschine

---

**Beispiel 3** ( $\mathcal{C}$ ) Die folgende DTM  $\mathcal{C}$  erhält als Eingabe einen String Einsen.

Dieser String wird kopiert:

Falls  $n$  Einsen auf dem Band stehen, stehen nach Ausführung von  $\mathcal{C}$   $2n$  Einsen auf dem Band (getrennt durch ein Blank  $\#$ ).

state	#	1	c
$q_0$	$\langle q_1, c \rangle$	—	—
$q_1$	$\langle q_2, R \rangle$	$\langle q_1, L \rangle$	$\langle q_1, L \rangle$
$q_2$	—	$\langle q_3, \# \rangle$	$\langle q_7, \# \rangle$
$q_3$	$\langle q_4, R \rangle$	—	—
$q_4$	$\langle q_5, 1 \rangle$	$\langle q_4, R \rangle$	$\langle q_4, R \rangle$
$q_5$	$\langle q_6, 1 \rangle$	$\langle q_5, L \rangle$	$\langle q_5, L \rangle$
$q_6$	—	$\langle q_2, R \rangle$	—
$q_7$	$\langle q_8, R \rangle$	—	—
$q_8$	$\langle h, \# \rangle$	$\langle q_8, R \rangle$	—

# Turing-Maschine

---

## Übergangsfunktion $\delta$ nicht Überall definiert

Wir erlauben ab jetzt auch, dass  $\delta$  nicht überall definiert ist.

Falls die DTM dann in einen solchen nichtdefinierten Zustand kommt, sagen wir **die DTM hängt**. Sie **hält** also nicht.

Dies wird z.T. in der Literatur anders gehandhabt.

# Turing-Maschine

---

## Beispiel 4 (Print $n$ )

Für jedes  $n \in \mathbb{N}$  konstruieren wir eine Maschine, die genau  $n$  Einsen auf das leere Band schreibt (mit möglichst wenig Zuständen):

1. schreibe  $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$  viele Einsen auf das Band (höchstens  $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$  Zustände)
2. kopiere diesen String (8 Zustände)
3. ersetze das trennende  $\#$  durch eine 1
4. falls  $n$  gerade ist, ersetzen die letzte 1 durch  $\#$  (2 neue Zustände)

Insgesamt können wir  $n$  Einsen mit höchstens  $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 10$  Zuständen konstruieren

# Turing-Maschine

---

## Begriff der Konfigurationen

- **Konfiguration** beschreibt die *komplette* aktuelle Situation der Maschine in einer Rechnung.
- Eine **Rechnung** ist eine Folge von Konfigurationen, wobei immer von einer Konfiguration zu einer Nachfolgekonfiguration übergegangen wird.

Besteht aus 4 Elementen:

- das aktuellen Zustand  $q$ ,
- das Wort  $w$  links vom Schreib-/Lesekopf,
- das Zeichen  $a$ , auf dem der Kopf gerade steht,
- das Wort  $u$  rechts von der aktuellen Kopfposition.

# Turing-Maschine

---

Konfigurationen sind endlich

- $w$  enthält das Anfangsstück des Bandes vom linken Ende bis zur aktuellen Kopfposition.
- **Links ist das Band endlich!**  
 $w = \epsilon$  bedeutet, dass der Kopf ganz links steht
- $u$  enthält den Bandinhalt rechts vom Schreib-/Lesekopf bis zum letzten Zeichen, das kein Blank ist.
- **Nach rechts ist das Band unendlich, aber es enthält nach rechts von einer bestimmten Bandposition an nur noch Blanks.**  
 $u = \epsilon$  bedeutet, dass rechts vom Schreib-/Lesekopf nur noch Blanks stehen.

# Turing-Maschine

---

## Definition (Konfiguration einer DTM)

Eine **Konfiguration**  $C$  einer DTM  $\mathcal{M} = (K, \Sigma, \delta, s)$  ist ein Wort der Form  $C = q, w\underline{a}u$ . Dabei ist

- $q \in K \cup \{h\}$  der aktuelle Zustand,
- $w \in \Sigma^*$  der Bandinhalt links des Kopfes,
- $a \in \Sigma$  das Bandzeichen unter der Schreib-/Lesekopf.

**Notation:** Die Position des Schreib-/Lesekopfes ist durch einen Unterstrich gekennzeichnet.

- $u \in \Sigma^*(\Sigma - \{\#\}) \cup \{\epsilon\}$  der Bandinhalt rechts des Kopfes.

# Turing-Maschine

## Definition (Nachfolgekonfiguration)

Eine Konfiguration  $C_2$  heißt **Nachfolgekonfiguration** von  $C_1$ , in Zeichen

$$C_1 \vdash_{\mathcal{M}} C_2$$

falls gilt:

- $C_i = q_i, w_i \underline{a_i} u_i$  für  $i \in \{1, 2\}$ , und
- es gibt einen Übergang  $\delta(q_1, a_1) = (q_2, b)$  wie folgt:
  - Fall 1:  $b \in \Sigma$ . Dann ist  $w_1 = w_2$ ,  $u_1 = u_2$ ,  $a_2 = b$ .
  - Fall 2:  $b = L$ . Dann gilt für  $w_2$  und  $a_2$ :  $w_1 = w_2 a_2$ .  
Für  $u_2$  gilt: Wenn  $a_1 = \#$  und  $u_1 = \epsilon$  ist, so ist  $u_2 = \epsilon$ , sonst ist  $u_2 = a_1 u_1$ .
  - Fall 3:  $b = R$ . Dann ist  $w_2 = w_1 a_1$ .  
Für  $a_2$  und  $u_2$  gilt: Wenn  $u_1 = \epsilon$  ist, dann ist  $u_2 = \epsilon$  und  $a_2 = \#$ , ansonsten ist  $u_1 = a_2 u_2$ .

# Turing-Maschine

---

## Definition (Eingabe)

$w$  heißt **Eingabe** (*input*) für  $\mathcal{M}$ , falls  $\mathcal{M}$  mit der **Startkonfiguration**

$$C_0 = s, \#w\underline{\#}$$

startet.

$(w_1, \dots, w_n)$  heißt **Eingabe** für  $\mathcal{M}$ , falls  $\mathcal{M}$  mit der **Startkonfiguration**

$$C_0 = s, \#w_1\# \dots \#w_n\underline{\#}$$

startet.



# Turing-Maschine

---

## Definition (Halten, Hängen)

Sei  $\mathcal{M}$  eine Turing-Maschine.

- $\mathcal{M}$  **hält** in  $C = q, w$  **gdw.**  $q = h$ .
- $\mathcal{M}$  **hängt** in  $C = q, w$  **gdw.** es keine Nachfolgekonfiguration gibt  
**Insbesondere:** wenn  $w = \epsilon \wedge \exists q' \delta(q, a) = (q', L)$ .

# Turing-Maschine

---

## Definition (Rechnung)

Sei  $\mathcal{M}$  eine Turing-Maschine. Man schreibt

$$C \vdash_{\mathcal{M}}^* C'$$

gdw.:

es gibt eine Reihe von Konfigurationen

$$C_0, C_1, \dots, C_n \quad (n \geq 0)$$

so dass

- $C = C_0$  und  $C' = C_n$
- für alle  $i < n$  gilt:  $C_i \vdash_{\mathcal{M}} C_{i+1}$

Dann heißt  $C_0, C_1, \dots, C_n$  eine **Rechnung** der Länge  $n$  von  $C_0$  nach  $C_n$ .

# Turing-Maschine können Funktionen berechnen

## Definition (TM-berechenbare Funktion)

Sei  $\Sigma_0$  ein Alphabet mit  $\# \notin \Sigma_0$ .

Eine (partielle) Funktion

$$f : (\Sigma_0^*)^m \rightarrow (\Sigma_0^*)^n$$

heißt **DTM-berechenbar**, falls:

Es existiert eine determinierte Turing-Maschine  $\mathcal{M} = (K, \Sigma, \delta, s)$

- mit  $\Sigma_0 \subseteq \Sigma$ ,
- so dass für alle  $w_1, \dots, w_m, u_1, \dots, u_n \in \Sigma_0^*$  gilt:
  - $f(w_1, \dots, w_m) = (u_1, \dots, u_n)$  gdw  
 $s, \#w_1\# \dots \#w_m\# \vdash_{\mathcal{M}}^* h, \#u_1\# \dots \#u_n\#$
  - $f(w_1, \dots, w_m)$  ist undefiniert gdw  
 $\mathcal{M}$  gestartet mit  $s, \#w_1\# \dots \#w_m\#$  hält nicht (läuft unendlich oder hängt)

# Turing-Maschine können Funktionen berechnen

---

## Vorsicht

Wir betrachten Turing-Maschinen hier unter einem anderen Aspekt als alle bisherigen Automaten:

- Bei endlichen Automaten und Pushdown-Automaten haben wir untersucht, **welche Sprachen sie akzeptieren**.
- Bei Turing-Maschinen untersuchen wir,
  - **welche Sprachen sie akzeptieren** und
  - **welche Funktionen sie berechnen**.

**Akzeptieren ist Spezialfall von Berechnen**

# Turing-Maschine: Akzeptierte Sprache

---

## **Definition (Von einer DTM akzeptierte Sprache)**

Ein Wort  $w$  wird **akzeptiert von einer DTM  $\mathcal{M}$** ,  
falls  $\mathcal{M}$  auf Eingabe von  $w$  hält  
(wobei am Ende der Kopf auf dem ersten Blank rechts von  $w$  steht).

Eine Sprache  $L \subseteq \Sigma^*$  **wird akzeptiert von einer DTM  $\mathcal{M}$** , wenn genau  
die Wörter aus  $L$  aus  $\mathcal{M}$  und keine anderen akzeptiert werden.

## **Achtung**

Bei nicht akzeptierten Wörtern muss die DTM nicht halten

**Sie darf es sogar nicht!**

# TM: Funktionen auf natürlichen Zahlen

---

## Funktionen auf natürlichen Zahlen

- Wir verwenden die **Unärdarstellung**

Eine Zahl  $n$  wird auf dem Band der Maschine durch  $n$  senkrechte Striche dargestellt.

- Eine Turing-Maschine  $\mathcal{M}$  berechnet eine Funktion

$$f : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}^n$$

in Unärdarstellung wie folgt:

- Wenn  $f(i_1, \dots, i_k) = (j_1, \dots, j_n)$  ist, dann rechnet  $\mathcal{M}$

$$s, \#|^{i_1}\# \dots \#|^{i_k}\# \underline{\quad} \vdash_{\mathcal{M}}^* h, \#|^{j_1}\# \dots \#|^{j_n}\# \underline{\quad}$$

- Ist  $f(i_1, \dots, i_k)$  undefiniert, dann hält  $\mathcal{M}$  bei Input  $\#|^{i_1}\# \dots \#|^{i_k}\#$  nicht.

# TM: Funktionen auf natürlichen Zahlen

## Definition

- **TM<sup>part</sup>** ist die Menge der partiellen TM-berechenbaren Funktionen  
 $f : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$
- **TM** ist die Menge der totalen TM-berechenbaren Funktionen  
 $f : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$

## Achtung: Einschränkung

In der Definition von TM und TM<sup>part</sup> haben wir uns eingeschränkt:

- nur Funktionen über natürliche Zahlen
- nur Funktionen mit einstelligem Wertebereich

## Das ist keine echte Einschränkung

Elemente (Wörter) aus anderen Definitions- und Wertebereiche können als natürliche Zahlen kodiert werden.

# TM-Flussdiagramme

---

**Graphische Darstellung der Übergangsfunktion einer DTM:** mit einem Flußdiagramm.

- Die Zustandsnamen werden nicht genannt.
- Nur die Schritte und die Ausführungsreihenfolge werden beschrieben.



# TM-Flussdiagramme

---

Folgende Elemente stehen zur Verfügung:

- *L*: eine DTM, die nach dem Starten ein Feld nach links geht und danach hält.
- *R*: eine DTM, die nach dem Starten ein Feld nach rechts geht und danach hält.
- *a*: TM, die *a* auf dem Band schreibt und danach hält.
- Startschritt: mit einer Pfeilspitze  $\triangleright$  bezeichnet

# TM-Flussdiagramme

---

- $\mathcal{M}_1 \longrightarrow \mathcal{M}_2$  oder abgekürzt  $\mathcal{M}_1\mathcal{M}_2$  (falls  $\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2$  die Flußdiagramme zweier DTM sind):  
eine DTM die zuerst wie  $\mathcal{M}_1$  arbeitet und dann, falls  $\mathcal{M}_1$  hält, wie  $\mathcal{M}_2$  weiterarbeitet.

Direkt aufeinanderfolgende Schritte werden also

- entweder direkt nebeneinander notiert
- oder durch einen Pfeil verbunden.

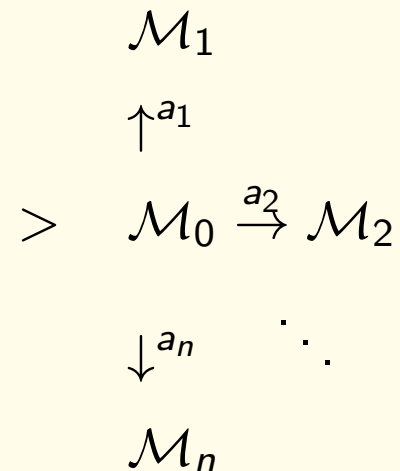
Im Gegensatz zu der Maschine  $\mathcal{M}_1$  gilt also für  $\mathcal{M}_1\mathcal{M}_2$ : **Nachdem  $\mathcal{M}_1$  seine Arbeit beendet hat, ist  $\mathcal{M}_1\mathcal{M}_2$  nicht im Haltezustand, sondern im Startzustand von  $\mathcal{M}_2$ .**

# TM-Flussdiagramme

---

- $\mathcal{M}_1 \xrightarrow{a} \mathcal{M}_2$ :  $\mathcal{M}_2$  ist nur dann aufgeführt, wenn nach der Beendigung von  $\mathcal{M}_1$  der aktuelle Bandbuchstabe  $a$  ist.

Sind  $\mathcal{M}_0, \mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_n$  Turing-Maschinen,  $a_i \in \Sigma$  für  $1 \leq i \leq n$ , so ist



die Turing-Maschine, die zuerst wie  $\mathcal{M}_0$  arbeitet und dann, falls  $\mathcal{M}_0$  mit dem Buchstaben  $a_i$  auf dem Arbeitsfeld hält, wie  $\mathcal{M}_i$  weiterarbeitet.

# TM-Flussdiagramme

---

$\sigma$  — eine Schreibabkürzung für einen beliebigen Buchstaben aus  $\Sigma$ .

- Die Maschine  $\mathcal{M} \xrightarrow{\sigma} \dots \sigma$  zum Beispiel ist eine Abkürzung für

$$\begin{array}{c} \dots a_1 \\ \uparrow^{a_1} \\ > \mathcal{M} \xrightarrow{a_2} \dots a_2 \\ \downarrow^{a_n} \quad \dots \\ \dots a_n \end{array}$$

falls  $\Sigma = \{a_1, \dots, a_n\}$  ist.

# TM-Flussdiagramme

---

Die Maschine  $\triangleright L \xrightarrow{\sigma} R\sigma R$  für  $\Sigma = \{\#, |\}$  macht also zuerst einen Schritt nach links; steht hier ein  $\#$  (bzw. ein  $|$ ), so geht sie einen Schritt nach rechts, druckt  $\#$  (bzw.  $|$ ) und geht ein weiteres Feld nach rechts.

- Weitere Schreibabkürzungen sind:

$$\xrightarrow{\sigma \neq a} \text{ für } \sigma \in \Sigma - \{a\}$$

$M_1 \xrightarrow{\sigma \neq a} M_2$ :  $M_2$  ist nur dann aufgeführt, wenn  $M_1$  hält, und Lesekopf auf Buchstabe, die nicht  $a$  ist positioniert ist.

$\mathcal{M}_1 \xrightarrow{a,b} \mathcal{M}_2$  falls nach der Ausführung von  $\mathcal{M}_1$  sowohl für den Bandbuchstaben  $a$  als auch für  $b$  nach  $\mathcal{M}_2$  verzweigt werden soll.

# TM-Flussdiagramme

---

## Beispiel:

Die DTM  $\mathcal{M}^+ = (\{s, q_1, q_2, q_3, q_4\}, \{ |, \# \}, \delta, s)$  addiert zwei natürliche Zahlen in Unärdarstellung.

Sie rechnet

$$s, \# |^n \# |^m \underline{\#} \vdash_{\mathcal{M}^+}^* h, \# |^{n+m} \underline{\#}$$

**Der Trick:** Sie löscht den letzten Strich von  $|^m$  und schreibt ihn in den Zwischenraum zwischen  $|^n$  und  $|^m$ .

# TM-Flussdiagramme

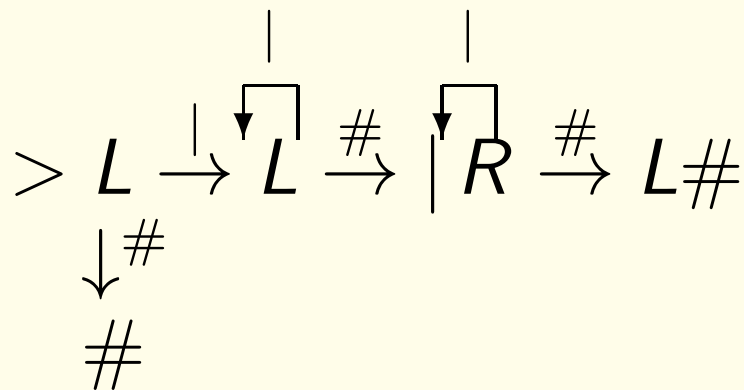
---

**Beispiel:** Hier ist zunächst die  $\delta$ -Funktion:

$$\begin{array}{llll}
 s, \# & \mapsto & q_1, L & \quad q_2, \# & \mapsto & q_3, | & \quad q_3, \# & \mapsto & q_4, L \\
 q_1, \# & \mapsto & h, \# & \quad q_2, | & \mapsto & q_2, L & \quad q_4, | & \mapsto & h, \# \\
 q_1, | & \mapsto & q_2, L & \quad q_3, | & \mapsto & q_3, R & & & 
 \end{array}$$

Für  $\delta(s, |)$  und  $\delta(q_4, \#)$  haben wir keine Werte angegeben; sie sind beliebig, weil  $\mathcal{M}^+$  sie nie benötigt.

**Das Flußdiagramm zur gleichen DTM ist erheblich leichter zu lesen:**



# TM-Flussdiagramme

---

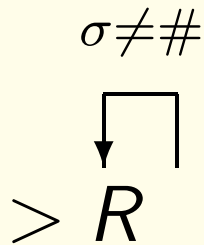
Die folgenden Turing-Maschinen werden wir als Bestandteile von komplexeren Turing-Maschinen später noch häufig benutzen.

**Beispiel:** ( $R_{\#}$ )

$R_{\#}$  bewegt nur den Kopf, ohne zu schreiben:

- Sie geht mindestens einmal nach rechts.
- Dann geht sie solange weiter nach rechts, bis sie ein  $\#$  liest.

Die folgende Turing-Maschine  $R_{\#}$  läuft zum ersten Blank rechts von der momentanen Position.



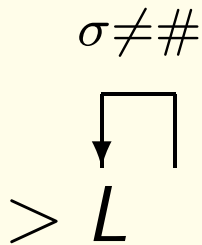


# TM-Flussdiagramme

---

**Beispiel:** ( $L_{\#}$ ) Analog funktioniert die DTM  $L_{\#}$ :

- Sie geht mindestens einmal nach links.
- Dann geht sie solange weiter nach links, bis sie ein  $\#$  liest.



# TM-Flussdiagramme

---

**Beispiel:** ( $\mathcal{C}$ ) Die folgende DTM  $\mathcal{C}$  erhält als Eingabe einen String Einsen.

Sie rechnet so:

- Sie bewegt sich nach links auf das Blank vor das Eingabewort,
- geht das Eingabewort von links nach rechts durch,
- merkt sich jeweils ein Zeichen  $\sigma$  von  $w$ , markiert die aktuelle Position, indem sie  $\sigma$  mit  $\#$  überschreibt,
- und kopiert das Zeichen  $\sigma$ .
- Sie verwendet dabei die Maschinen  $L_{\#}$  und  $R_{\#}$ , die wir schon definiert haben.

