Übung "Grundbegriffe der Informatik"

Karlsruher Institut für Technologie

Matthias Schulz, Gebäude 50.34, Raum 034

email: schulz@ira.uka.de

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

z_0

a a b a

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$z_1 = f(z_0, a)$$

a a b a

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$z_2 = f(z_1, a)$

a a b a

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$z_3 = f(z_2, b)$$

a a b a

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$z_4 = f(z_3, a)$$

a a b a

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$\begin{array}{cccccc} & z_0 & & & & \\ \square & \mathsf{a} & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \mathsf{a} & \square \end{array}$$

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$z_1 = f(z_0, a)$$

□ a a b a □

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$z_2 = f(z_1, a)$$

□ a a b a □

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$z_3 = f(z_2, b)$$

□ a a b a □

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$z_4 = f(z_3, a)$$

$\square$ a a b a $\square$

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$e_{+/-} = f(z_4, \square)$$

$\square$ a a b a $\square$

$A = (Z, z_0, X, f'F)$

$T = (Z \cup \{e_+, e_-\}, z_0, X \cup \{\square\}, f, g, m)$

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$e_{+/-} = f(z_4, \Box)$$

$\Box$ a a b a $\Box$

$A = (Z, z_0, X, f'F)$

$T = (Z \cup \{e_+, e_-\}, z_0, X \cup \{\Box\}, f, g, m)$

$f(z, x) = f'(z, x)$

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$e_{+/-} = f(z_4, \square)$$

$\square$ a a b a $\square$

$A = (Z, z_0, X, f' F)$

$T = (Z \cup \{e_+, e_-\}, z_0, X \cup \{\square\}, f, g, m)$

$f(z,x) = f'(z,x)$
$g(z,x) =$ egal

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$e_{+/-} = f(z_4, \square)$$

$\square$ a a b a $\square$

$A = (Z, z_0, X, f'F)$

$T = (Z \cup \{e_+, e_-\}, z_0, X \cup \{\square\}, f, g, m)$

$f(z, x) = f'(z, x)$
$g(z, x) =$ egal
$m(z, x) = 1$

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

$$e_{+/-} = f(z_4, \Box)$$

□ a a b a □

$$A = (Z, z_0, X, f'F)$$

$$T = (Z \cup \{e_+, e_-\}, z_0, X \cup \{\Box\}, f, g, m)$$

$$g(z, \Box) = \Box, m(z, \Box) = 0, f(z, \Box) = \begin{cases} e_+ & \text{falls } z \in F \\ e_- & \text{falls } z \notin F \end{cases}$$

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

Berechnung: Zustand über Zeichen:

	z_0				
$\square$	a	a	b	a	$\square$
		z_1			
$\square$	$\square$	a	b	a	$\square$
			z_2		
$\square$	$\square$	$\square$	b	a	$\square$
				z_3	
$\square$	$\square$	$\square$	$\square$	a	$\square$
					z_4
$\square$	$\square$	$\square$	$\square$	$\square$	$\square$
					e_+
$\square$	$\square$	$\square$	$\square$	$\square$	$\square$

.

Vergleich Endlicher Akzeptor - Turingmaschine

oder Zustand vor Zeichen:

$\square z_0$aaba$\square$

$\square\square z_1$aba$\square$

$\square\square\square z_2ba\square$

$\square\square\square\square z_3a\square$

$\square\square\square\square\square z_4\square$

$\square\square\square\square\square e_+\square$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

1. Fall: $|g'(z, x)|$ immer 1.

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

1. Fall: $|g'(z, x)|$ immer 1.

$T = (Z, z_0, X \cup Y \cup \{\Box\}, f, g, m)$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

1. Fall: $|g'(z,x)|$ immer 1.

$T = (Z, z_0, X \cup Y \cup \{\square\}, f, g, m)$

$f(z,x) = f'(z,x), g(z,x) = g'(z,x), m(z,x) = 1.$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

2. Fall: $|g'(z, x)|$ nicht immer 1.

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

2. Fall: $|g'(z, x)|$ nicht immer 1.

Problem A: Zeichenketten länger als 1 einfügen

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

2. Fall: $|g'(z,x)|$ nicht immer 1.

Problem A: Zeichenketten länger als 1 einfügen

Problem B: Zeichen löschen

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

2. Fall: $|g'(z, x)|$ nicht immer 1.

Problem A: Zeichenketten länger als 1 einfügen

Idee: Alle Zeichen genug Felder nach rechts verschieben.

Problem B: Zeichen löschen

Idee: Alle Zeichen eins nach links verschieben.

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Nach rechts verschieben: $-$ reserviert Platz

Starte mit $w = -^k$

$f(i_{xw}, y) = i_{wy}$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Nach rechts verschieben: $-$ reserviert Platz

Starte mit $w = -^k$

$f(i_{xw}, y) = i_{wy}$

Idee: w_1 Wort vor Kopf , w_2 Wort in Index, w_3 Wort nach Kopf
$\rightarrow w_1 w_2 w_3$ bleibt gleich und ist gewünschtes Ergebnis.

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Nach rechts verschieben: $-$ reserviert Platz

Starte mit $w = -^k$

$f(i_{xw}, y) = i_{wy}$
$g(i_{xw}, y) = x$
$m(i_{xw}, y) = 1$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Nach rechts verschieben: $-$ reserviert Platz

Starte mit $w = -^k$

$$f(i_{xw}, y) = i_{wy}$$
$$g(i_{xw}, y) = x$$
$$m(i_{xw}, y) = 1$$

$$f(i_{\Box^k}, \Box) = return$$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Für Simulation des Mealy-Automaten:

Alternative A: Auf erstem reservierten Feld Zustand und einzufügendes Wort speichern.

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Für Simulation des Mealy-Automaten:

Alternative A: Auf erstem reservierten Feld Zustand und einzufügendes Wort speichern.

Alternative B: Zustand und einzufügendes Wort im Zustand speichern.

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Für Simulation des Mealy-Automaten:

Alternative A: Auf erstem reservierten Feld Zustand und einzufügendes Wort speichern.

Alternative B: Zustand und einzufügendes Wort im Zustand speichern.

$\rightarrow$ Deutlich mehr Zustände!

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Eins nach links verschieben: $-$ bei gelöschtem Zeichen.

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Eins nach links verschieben: $-$ bei gelöschtem Zeichen.

$$f(l_g, x) = l_x$$
$$g(l_g, x) = -$$
$$m(l_g, x) = -1$$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Eins nach links verschieben: $-$ bei gelöschtem Zeichen.

$$f(l_g, x) = l_x$$
$$g(l_g, x) = -$$
$$m(l_g, x) = -1$$

$$f(l_x, -) = l_g$$
$$g(l_x, -) = x$$
$$m(l_x, -) = 1$$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$$f(l_g, x) = l_x$$
$$g(l_g, x) = -$$
$$m(l_g, x) = -1$$

$$f(l_x, -) = l_g$$
$$g(l_x, -) = x$$
$$m(l_x, -) = 1$$

$$f(l_g, -) = l_g$$
$$g(l_g, -) = -$$
$$m(l_g, -) = 1$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

Eins nach links verschieben: $-$ bei gelöschtem Zeichen.

$-l_g xyz$
$l_x - -yz$
$xl_g - yz$
$x - l_g yz$
$xl_y - -z$
$xyl_g - z$
$xy - l_g z$
$xyl_z - -$
$xyzl_g -$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(l_g, x) = l_x$
$g(l_g, x) = -$
$m(l_g, x) = -1$

$f(l_x, -) = l_g$
$g(l_x, -) = x$
$m(l_x, -) = 1$

$f(l_g, -) = l_g$
$g(l_g, -) = -$
$m(l_g, -) = 1$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$$f(l_g, \square) = d$$
$$g(l_g, \square) = \square$$
$$m(l_g, \square) = -1$$

$$f(d, -) = z$$
$$g(d, -) = \square$$
$$m(d, -) = -1$$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

2. Fall: $|g'(z,x)|$ nicht immer 1.

Bessere Idee: Schreibe Ausgabe hinter Eingabewort, das schrittweise gelöscht wird.

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

2. Fall: $|g'(z,x)|$ nicht immer 1.

Anfangszustand z^0 nach rechts durchgehen, Trennsymbol : hinter Wort schreiben, zurückfahren.

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

2. Fall: $|g'(z,x)|$ nicht immer 1.

Anfangszustand z^0 nach rechts durchgehen, Trennsymbol : hinter Wort schreiben, zurückfahren.

$$
\begin{array}{c|cc}
 & z^0 & z^1 \\
x \in X & (z^0, x, 1) & (z^1, x, -1) \\
\Box & (z^1, :, -1) & (z_0, \Box, 1)
\end{array}
$$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

2. Fall: $|g'(z,x)|$ nicht immer 1.

Zeichen einlesen, nächsten Zustand merken, zu schreibendes Wort merken, Zeichen löschen, nach rechts fahren, Wort schreiben, nach links fahren.

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

2. Fall: $|g'(z,x)|$ nicht immer 1.

Zeichen einlesen, nächsten Zustand merken, zu schreibendes Wort merken, Zeichen löschen, nach rechts fahren, Wort schreiben, nach links fahren.

$$\begin{array}{c|cccc}
 & z & z'_{yw} & z'_{\epsilon} & z'_r \\
x \in X & (f'(z,x)_{g'(z,x)}, \square, 1) & (z'_{yw}, x, 1) & (z'_{\epsilon}, x, 1) & (z'_r, x, -1) \\
x \in Y \cup \{:\} & \ldots & (z'_{yw}, x, 1) & (z'_{\epsilon}, x, 1) & (z'_r, x, -1) \\
\square & - & (z'_w, y, 1) & (z'_r, \square, -1) & (z', \square, 1)
\end{array}$$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$A = (Z, z_0, X, f', Y, g')$

2. Fall: $|g'(z,x)|$ nicht immer 1.

Wenn erstes Zeichen :, löschen.

$\forall z \in Z : f(z, :) = e, g(z, :) = \square, m(z, :) = 1.$

.

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$
$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & z^0 & & & & & & & & & & & \\ \square & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \mathsf{a} & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square \end{array}$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$
$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & & z^0 & & & & & & & & & & \\ \square & a & b & b & a & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square \end{array}$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$
$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$

$$
\begin{array}{ccccccccccccc}
 & & & & & z^0 & & & & & & & \\
\square & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \mathsf{a} & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square
\end{array}
$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$
$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & & & & z^1 & & & & & & & & \\ \square & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square \end{array}$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0, a) = 0, f(0, b) = 1, f(1, a) = 1, f(1, b) = 0$
$g(0, a) = ab, g(0, b) = bb, g(1, a) = bb, g(1, b) = ba$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & & & z^1 & & & & & & & & & \\ \square & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square \end{array}$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$
$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$

z^1
□ a b b a : □ □ □ □ □ □ □

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$
$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$

	0											
□	a	b	b	a	:	□	□	□	□	□	□	□

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$
$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$

0_{ab}
$\Box \quad \Box \quad$ b $\quad$ b $\quad$ a $\quad : \quad \Box \quad \Box \quad \Box \quad \Box \quad \Box \quad \Box \quad \Box$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$$
$$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & & & 0_{ab} & & & & & & & & & \\ \square & \square & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square \end{array}$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$$
$$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & & & & & & 0_{ab} & & & & & & \\ \square & \square & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square \end{array}$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a)=0, f(0,b)=1, f(1,a)=1, f(1,b)=0$
$g(0,a)=ab, g(0,b)=bb, g(1,a)=bb, g(1,b)=ba$

$$
\begin{array}{cccccccccccc}
 & & & & & & & 0_b & & & & \\
\square & \square & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \mathsf{a} & \square & \square & \square & \square & \square & \square
\end{array}
$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$$f(0,a)=0, f(0,b)=1, f(1,a)=1, f(1,b)=0$$
$$g(0,a)=ab, g(0,b)=bb, g(1,a)=bb, g(1,b)=ba$$

0_ϵ

□ □ b b a : a b □ □ □ □ □

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$
$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & & & & & & & 0_r & & & & & \\ \square & \square & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \square & \square & \square & \square & \square \end{array}$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0, a) = 0, f(0, b) = 1, f(1, a) = 1, f(1, b) = 0$
$g(0, a) = ab, g(0, b) = bb, g(1, a) = bb, g(1, b) = ba$

$$
\begin{array}{cccccccccccc}
 & & & & & 0_r & & & & & & \\
\square & \square & \mathrm{b} & \mathrm{b} & \mathrm{a} & : & \mathrm{a} & \mathrm{b} & \square & \square & \square & \square & \square
\end{array}
$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0, a) = 0, f(0, b) = 1, f(1, a) = 1, f(1, b) = 0$
$g(0, a) = ab, g(0, b) = bb, g(1, a) = bb, g(1, b) = ba$

	0_r											
□	□	b	b	a	:	a	b	□	□	□	□	□

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$$f(0,a)=0, f(0,b)=1, f(1,a)=1, f(1,b)=0$$
$$g(0,a)=ab, g(0,b)=bb, g(1,a)=bb, g(1,b)=ba$$

		0										
□	□	b	b	a	:	a	b	□	□	□	□	□

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a)=0, f(0,b)=1, f(1,a)=1, f(1,b)=0$
$g(0,a)=ab, g(0,b)=bb, g(1,a)=bb, g(1,b)=ba$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & & & 1_{bb} & & & & & & & & & \\ \square & \square & \square & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \square & \square & \square & \square & \square \end{array}$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0, a) = 0, f(0, b) = 1, f(1, a) = 1, f(1, b) = 0$
$g(0, a) = ab, g(0, b) = bb, g(1, a) = bb, g(1, b) = ba$

$$
\begin{array}{ccccccccccccc}
 & & & & & & & & 1_{bb} & & & & \\
\square & \square & \square & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \square & \square & \square & \square & \square
\end{array}
$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0, a) = 0, f(0, b) = 1, f(1, a) = 1, f(1, b) = 0$
$g(0, a) = ab, g(0, b) = bb, g(1, a) = bb, g(1, b) = ba$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & & & & & & & & & 1_b & & & \\ \Box & \Box & \Box & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \Box & \Box & \Box & \Box \end{array}$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0,a)=0, f(0,b)=1, f(1,a)=1, f(1,b)=0$
$g(0,a)=ab, g(0,b)=bb, g(1,a)=bb, g(1,b)=ba$

1_ϵ

□ □ □ b a : a b b b □ □ □

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0, a) = 0, f(0, b) = 1, f(1, a) = 1, f(1, b) = 0$
$g(0, a) = ab, g(0, b) = bb, g(1, a) = bb, g(1, b) = ba$

$$
\begin{array}{ccccccccccccc}
 & & & & & & & & & 1_r & & & \\
\square & \square & \square & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \square & \square & \square
\end{array}
$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$f(0, a) = 0, f(0, b) = 1, f(1, a) = 1, f(1, b) = 0$
$g(0, a) = ab, g(0, b) = bb, g(1, a) = bb, g(1, b) = ba$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & & 1_r & & & & & & & & & & \\ \square & \square & \square & \mathsf{b} & \mathsf{a} & : & \mathsf{a} & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \mathsf{b} & \square & \square & \square \end{array}$$

Vergleich Mealy-Automat - Turingmaschine

$$f(0,a) = 0, f(0,b) = 1, f(1,a) = 1, f(1,b) = 0$$
$$g(0,a) = ab, g(0,b) = bb, g(1,a) = bb, g(1,b) = ba$$

$$\begin{array}{ccccccccccccc} & & & 1 & & & & & & & & & \\ \square & \square & \square & \mathrm{b} & \mathrm{a} & : & \mathrm{a} & \mathrm{b} & \mathrm{b} & \mathrm{b} & \square & \square & \square \end{array}$$

Turingmaschinen lesen

Persönliche Meinung: Aus Tabelle Automatengraphen basteln - selten hilfreich!

(Nur dann übersichtlicher, wenn $f(z, x)$ sehr häufig nicht definiert ist.)

Turingmaschinen lesen

1. Finde Zustände, bei denen Turingmaschine einfach zum rechten/linken Ende des Wortes fährt.

2. Überprüfe Zustandsnamen auf Hinweise, was gespeichert wird.

3. Führe Berechnung an Beispiel durch. (Hinweis: sofern nicht alle Zwischenschritte gefordert sind, kann man mit 1. abkürzen.)

4. Formuliere These, was Turingmaschine in einzelnen Zuständen macht.

5. Herausfinden, was die Turingmaschine an sich macht.

Turingmaschinen lesen

Eingabealphabet $\{a\}$, Bandalphabet $\{a, b, 0, 1\Box\}$, Anfangszustand z_0

	z_0	z_1	r	w
a	$(z_1, b, 1)$	$(z_0, a, 1)$	$(w, a, -1)$	$(w, a, -1)$
b	$(z_0, b, 1)$	$(z_1, b, 1)$	$(r, b, -1)$	$(w, b, -1)$
0	$(z_0, 0, 1)$	$(z_1, 0, 1)$	$(r, 0, -1)$	$(w, 0, -1)$
1	$(z_0, 1, 1)$	$(z_1, 1, 1)$	$(r, 1, -1)$	$(w, 1, -1)$
$\Box$	$(r, 0, -1)$	$(r, 1, -1)$	-	$(z_0, \Box, 1)$

Turingmaschinen lesen

Feststellungen:

1. w läuft nach links durch.

.

Turingmaschinen lesen

Feststellungen:

1. w läuft nach links durch.
2. r läuft nach links durch, bis es auf a trifft; wird dann zu w

.

Turingmaschinen lesen

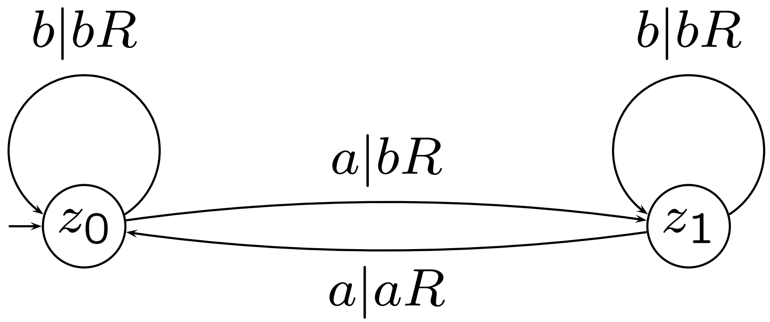
Feststellungen:

1. w läuft nach links durch.
2. r läuft nach links durch, bis es auf a trifft; wird dann zu w
3. r überprüft, ob noch a in Wort vorhanden; falls nicht, Ende.

.

Turingmaschinen lesen

z_0 und z_1:



Turingmaschinen lesen

Feststellungen:

1. Das i bei z_i ist die Anzahl der gelesenen a mod 2.

.

Turingmaschinen lesen

Feststellungen:

1. Das i bei z_i ist die Anzahl der gelesenen $a \mod 2$.

2. Wenn keine a mehr kommen, läuft z_i nach rechts.

.

Turingmaschinen lesen

Feststellungen:

1. Das i bei z_i ist die Anzahl der gelesenen $a \mod 2$.

2. Wenn keine a mehr kommen, läuft z_i nach rechts.

3. z_i schreibt i an Ende des Wortes.

.

Turingmaschinen lesen

Feststellungen:

Anfang a^n auf Band.

1. Anzahl der a nach Rückkehr des Kopfes $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$.

.

Turingmaschinen lesen

Feststellungen:

Anfang a^n auf Band.

1. Anzahl der a nach Rückkehr des Kopfes $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$.

2. Ans Ende wird geschrieben $n \mod 2, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \mod 2, \lfloor \frac{n}{4} \rfloor \mod 2 \ldots$

.

Turingmaschinen lesen

Feststellungen:

Anfang a^n auf Band.

1. Anzahl der a nach Rückkehr des Kopfes $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$.

2. Ans Ende wird geschrieben $n \mod 2, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \mod 2, \lfloor \frac{n}{4} \rfloor \mod 2 \ldots$

3. Vorstellung von n als Binärzahl: n wird binär rückwärts ans Ende geschrieben.

.

Turingmaschinen lesen

Feststellungen:

Anfang a^n auf Band.

1. Anzahl der a nach Rückkehr des Kopfes $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$.

2. Ans Ende wird geschrieben $n \mod 2, \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \mod 2, \lfloor \frac{n}{4} \rfloor \mod 2 \ldots$

3. Vorstellung von n als Binärzahl: n wird binär rückwärts ans Ende geschrieben.

4. Am Ende auf Band: $b^n R(Repr_2(n))$.

.