

3a

Regularität von deterministischen endlichen Automaten und nichtdeterministische endliche Automaten

Prof. Dr. Jasmin Blanchette

Lehr- und Forschungseinheit für
Theoretische Informatik und Theorembeweisen

Stand: 30. April 2024

Basiert auf Folien von PD Dr. David Sabel



Definition

Ein **deterministischer endlicher Automat** (*deterministic finite automaton*, **DFA**) ist ein 5-Tupel $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$, wobei

- ▶ Z ist eine endliche Menge von **Zuständen**
- ▶ Σ ist das (endliche) **Eingabealphabet** mit $Z \cap \Sigma = \emptyset$
- ▶ $\delta : Z \times \Sigma \rightarrow Z$ ist die (totale) **Überföhrungsfunktion**
- ▶ $z_0 \in Z$ ist der **Startzustand**
- ▶ $E \subseteq Z$ ist die Menge der **Endzustände**.

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis Wir konstruieren für M eine reguläre Grammatik G (mit beiden Sonderregeln), sodass $L(G) = L(M)$.

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis Wir konstruieren für M eine reguläre Grammatik G (mit beiden Sonderregeln), sodass $L(G) = L(M)$.

Sei $G = (V, \Sigma, P, S)$ die Grammatik mit $V := Z$, $S := z_0$ und

$$P := \{z_i \rightarrow az_j \mid \delta(z_i, a) = z_j\}$$

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis Wir konstruieren für M eine reguläre Grammatik G (mit beiden Sonderregeln), sodass $L(G) = L(M)$.

Sei $G = (V, \Sigma, P, S)$ die Grammatik mit $V := Z$, $S := z_0$ und

$$P := \{z_i \rightarrow az_j \mid \delta(z_i, a) = z_j\} \\ \cup \{z_i \rightarrow \varepsilon \mid z_i \in E\}$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$P = \{$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$P = \{z_0 \rightarrow az_1,$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$P = \{z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0,$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$P = \{z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ z_1 \rightarrow az_2,$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{array}{l} P = \{z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \end{array}$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{array}{l} P = \{z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ z_2 \rightarrow az_2, \end{array}$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{array}{l} P = \{z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \end{array}$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{aligned} P = \{ & z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ & z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ & z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ & z_2 \rightarrow \varepsilon \} \end{aligned}$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{aligned} P = \{ & z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ & z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ & z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ & z_2 \rightarrow \varepsilon \} \end{aligned}$$

Ableitung der Eingabe $abbaaa \in L(M)$:

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{aligned} P = \{ & z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ & z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ & z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ & z_2 \rightarrow \varepsilon \} \end{aligned}$$

Ableitung der Eingabe $abbaaa \in L(M)$:

z_0

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$P = \{z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ z_2 \rightarrow \varepsilon\}$$

Ableitung der Eingabe $abbaaa \in L(M)$:

$$z_0 \Rightarrow az_1$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{aligned} P = \{ & z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ & z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ & z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ & z_2 \rightarrow \varepsilon \} \end{aligned}$$

Ableitung der Eingabe $abbaaa \in L(M)$:

$$z_0 \Rightarrow az_1 \Rightarrow abz_0$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{aligned} P = \{ & z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ & z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ & z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ & z_2 \rightarrow \varepsilon \} \end{aligned}$$

Ableitung der Eingabe $abbaaa \in L(M)$:

$$z_0 \Rightarrow az_1 \Rightarrow abz_0 \Rightarrow abbz_0$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$P = \{z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ z_2 \rightarrow \varepsilon\}$$

Ableitung der Eingabe $abb $\color{blue}a$ aa \in L(M)$:

$$z_0 \Rightarrow az_1 \Rightarrow abz_0 \Rightarrow abbz_0 \Rightarrow abb\color{blue}az_1$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{aligned} P = \{ & z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ & z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ & z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ & z_2 \rightarrow \varepsilon \} \end{aligned}$$

Ableitung der Eingabe $abbaaa \in L(M)$:

$$z_0 \Rightarrow az_1 \Rightarrow abz_0 \Rightarrow abbz_0 \Rightarrow abba z_1 \Rightarrow abbaaz_2$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{aligned} P = \{ & z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ & z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ & z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ & z_2 \rightarrow \varepsilon \} \end{aligned}$$

Ableitung der Eingabe $abbaaa \in L(M)$:

$$z_0 \Rightarrow az_1 \Rightarrow abz_0 \Rightarrow abbz_0 \Rightarrow abbaz_1 \Rightarrow abbaaz_2 \Rightarrow abbaaaz_2$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{aligned} P = \{ & z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ & z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ & z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ & z_2 \rightarrow \varepsilon \} \end{aligned}$$

Ableitung der Eingabe $abbaaa \in L(M)$:

$$z_0 \Rightarrow az_1 \Rightarrow abz_0 \Rightarrow abbz_0 \Rightarrow abbaz_1 \Rightarrow abbaaz_2 \Rightarrow abbaaa z_2 \Rightarrow abbaaa$$

Beispiel für die Konstruktion einer regulären Grammatik

DFA $M = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, \delta, z_0, \{z_2\})$ mit

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = z_1 & \delta(z_1, a) = z_2 & \delta(z_2, a) = z_2 \\ \delta(z_0, b) = z_0 & \delta(z_1, b) = z_0 & \delta(z_2, b) = z_2 \end{array}$$

Grammatik dazu: $G = (\{z_0, z_1, z_2\}, \{a, b\}, P, z_0)$ mit

$$\begin{aligned} P = \{ & z_0 \rightarrow az_1, z_0 \rightarrow bz_0, \\ & z_1 \rightarrow az_2, z_1 \rightarrow bz_0, \\ & z_2 \rightarrow az_2, z_2 \rightarrow bz_2, \\ & z_2 \rightarrow \varepsilon \} \end{aligned}$$

Ableitung der Eingabe $abbaaa \in L(M)$:

$$z_0 \Rightarrow az_1 \Rightarrow abz_0 \Rightarrow abbz_0 \Rightarrow abbaz_1 \Rightarrow abbaaz_2 \Rightarrow abbaaaz_2 \Rightarrow abbaaa \in L(G)$$

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis (Fortsetzung) Wir zeigen, dass $L(M) = L(G)$,
d.h. $w \in L(M)$ g.d.w. $w \in L(G)$ für ein beliebiges w .

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis (Fortsetzung) Wir zeigen, dass $L(M) = L(G)$,
d.h. $w \in L(M)$ g.d.w. $w \in L(G)$ für ein beliebiges w .

Sei $w = a_1 \cdots a_m$ mit $m \in \mathbb{N}$.

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis (Fortsetzung) Wir zeigen, dass $L(M) = L(G)$,
d.h. $w \in L(M)$ g.d.w. $w \in L(G)$ für ein beliebiges w .

Sei $w = a_1 \cdots a_m$ mit $m \in \mathbb{N}$.

$$a_1 \cdots a_m \in L(M)$$

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis (Fortsetzung) Wir zeigen, dass $L(M) = L(G)$,
d.h. $w \in L(M)$ g.d.w. $w \in L(G)$ für ein beliebiges w .

Sei $w = a_1 \cdots a_m$ mit $m \in \mathbb{N}$.

$$a_1 \cdots a_m \in L(M)$$

g.d.w. es gibt $z_1, \dots, z_m \in Z$ mit $\delta(z_{i-1}, a_i) = z_i$ für $i \in \{1, \dots, m\}$ und $z_m \in E$

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis (Fortsetzung) Wir zeigen, dass $L(M) = L(G)$,
d.h. $w \in L(M)$ g.d.w. $w \in L(G)$ für ein beliebiges w .

Sei $w = a_1 \cdots a_m$ mit $m \in \mathbb{N}$.

$$a_1 \cdots a_m \in L(M)$$

g.d.w. es gibt $z_1, \dots, z_m \in Z$ mit $\delta(z_{i-1}, a_i) = z_i$ für $i \in \{1, \dots, m\}$ und $z_m \in E$

$$a_1 \cdots a_m \in L(G)$$

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis (Fortsetzung) Wir zeigen, dass $L(M) = L(G)$,
d.h. $w \in L(M)$ g.d.w. $w \in L(G)$ für ein beliebiges w .

Sei $w = a_1 \cdots a_m$ mit $m \in \mathbb{N}$.

$$a_1 \cdots a_m \in L(M)$$

g.d.w. es gibt $z_1, \dots, z_m \in Z$ mit $\delta(z_{i-1}, a_i) = z_i$ für $i \in \{1, \dots, m\}$ und $z_m \in E$

$$z_0 \Rightarrow_G^* a_1 \cdots a_m$$

g.d.w. $a_1 \cdots a_m \in L(G)$

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis (Fortsetzung) Wir zeigen, dass $L(M) = L(G)$,
d.h. $w \in L(M)$ g.d.w. $w \in L(G)$ für ein beliebiges w .

Sei $w = a_1 \cdots a_m$ mit $m \in \mathbb{N}$.

$$a_1 \cdots a_m \in L(M)$$

g.d.w. es gibt $z_1, \dots, z_m \in Z$ mit $\delta(z_{i-1}, a_i) = z_i$ für $i \in \{1, \dots, m\}$ und $z_m \in E$

es gibt $z_1, \dots, z_m \in Z$ mit $a_1 \cdots a_{i-1} z_{i-1} \Rightarrow_G a_1 \cdots a_i z_i$ für $i \in \{1, \dots, m\}$
und $a_1 \cdots a_m z_m \Rightarrow_G a_1 \cdots a_m$

g.d.w. $z_0 \xRightarrow{*}_G a_1 \cdots a_m$

g.d.w. $a_1 \cdots a_m \in L(G)$

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis (Fortsetzung) Wir zeigen, dass $L(M) = L(G)$,
d.h. $w \in L(M)$ g.d.w. $w \in L(G)$ für ein beliebiges w .

Sei $w = a_1 \cdots a_m$ mit $m \in \mathbb{N}$.

$$a_1 \cdots a_m \in L(M)$$

g.d.w. es gibt $z_1, \dots, z_m \in Z$ mit $\delta(z_{i-1}, a_i) = z_i$ für $i \in \{1, \dots, m\}$ und $z_m \in E$

g.d.w. es gibt $z_1, \dots, z_m \in Z$ mit $a_1 \cdots a_{i-1} z_{i-1} \Rightarrow_G a_1 \cdots a_i z_i$ für $i \in \{1, \dots, m\}$
und $a_1 \cdots a_m z_m \Rightarrow_G a_1 \cdots a_m$

g.d.w. $z_0 \xRightarrow{*}_G a_1 \cdots a_m$

g.d.w. $a_1 \cdots a_m \in L(G)$

Die akzeptierte Sprache von DFAs ist regulär

Theorem

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, z_0, E)$ ein DFA. Dann ist $L(M)$ regulär.

Beweis (Fortsetzung) Wir zeigen, dass $L(M) = L(G)$,
d.h. $w \in L(M)$ g.d.w. $w \in L(G)$ für ein beliebiges w .

Sei $w = a_1 \cdots a_m$ mit $m \in \mathbb{N}$.

$$a_1 \cdots a_m \in L(M)$$

g.d.w. es gibt $z_1, \dots, z_m \in Z$ mit $\delta(z_{i-1}, a_i) = z_i$ für $i \in \{1, \dots, m\}$ und $z_m \in E$

g.d.w. es gibt $z_1, \dots, z_m \in Z$ mit $a_1 \cdots a_{i-1} z_{i-1} \Rightarrow_G a_1 \cdots a_i z_i$ für $i \in \{1, \dots, m\}$
und $a_1 \cdots a_m z_m \Rightarrow_G a_1 \cdots a_m$

g.d.w. $z_0 \xRightarrow{*}_G a_1 \cdots a_m$

g.d.w. $a_1 \cdots a_m \in L(G)$

Daher gilt $L(M) = L(G)$ und somit ist $L(M)$ regulär. □

Wird jede reguläre Sprache durch einen DFA akzeptiert?

- ▶ Der vorherige Beweis konstruiert:
„für jeden DFA gibt es eine äquivalente reguläre Grammatik“
- ▶ Für die andere Richtung wäre notwendig:
„für jede reguläre Grammatik gibt es einen äquivalenten DFA“

Wird jede reguläre Sprache durch einen DFA akzeptiert?

- ▶ Der vorherige Beweis konstruiert:
„für jeden DFA gibt es eine äquivalente reguläre Grammatik“
- ▶ Für die andere Richtung wäre notwendig:
„für jede reguläre Grammatik gibt es einen äquivalenten DFA“

Problem:

- ▶ Produktionen $A \rightarrow aA_1$ und $A \rightarrow aA_2$ können in Grammatiken vorkommen.
- ▶ Die Konstruktion des DFA ist zunächst unklar.

Wird jede reguläre Sprache durch einen DFA akzeptiert?

- ▶ Der vorherige Beweis konstruiert:
„für jeden DFA gibt es eine äquivalente reguläre Grammatik“
- ▶ Für die andere Richtung wäre notwendig:
„für jede reguläre Grammatik gibt es einen äquivalenten DFA“

Problem:

- ▶ Produktionen $A \rightarrow aA_1$ und $A \rightarrow aA_2$ können in Grammatiken vorkommen.
- ▶ Die Konstruktion des DFA ist zunächst unklar.

Daher: Der Beweis für die andere Richtung **erfolgt auf Umwegen** und verwendet **nichtdeterministische** endliche Automaten (NFAs).

Nichtdeterministische endliche Automaten

Informelle Kurzfassung:

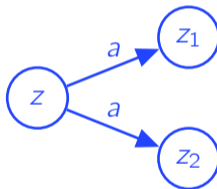
- ▶ Der Zustandswechsel ist nicht eindeutig, sondern **nichtdeterministisch** in einen von mehreren (oder gar keinen) möglichen Zuständen.
- ▶ Der Automat darf sozusagen **raten**, welchen Nachfolgezustand er wählt.

Nichtdeterministische endliche Automaten

Informelle Kurzfassung:

- ▶ Der Zustandswechsel ist nicht eindeutig, sondern **nichtdeterministisch** in einen von mehreren (oder gar keinen) möglichen Zuständen.
- ▶ Der Automat darf sozusagen **raten**, welchen Nachfolgezustand er wählt.

- ▶ Im Zustandsgraph erlaubt:

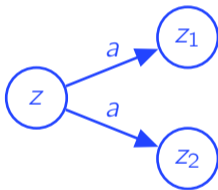


Nichtdeterministische endliche Automaten

Informelle Kurzfassung:

- ▶ Der Zustandswechsel ist nicht eindeutig, sondern **nichtdeterministisch** in einen von mehreren (oder gar keinen) möglichen Zuständen.
- ▶ Der Automat darf sozusagen **raten**, welchen Nachfolgezustand er wählt.

▶ Im Zustandsgraph erlaubt:



▶ Technisch:

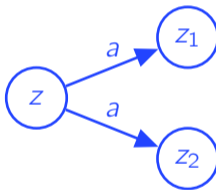
- ▶ Ein **DFA** hat $\delta : Z \times \Sigma \rightarrow Z$ und **einen** Startzustand.
- ▶ Ein **NFA** hat $\delta : Z \times \Sigma \rightarrow \mathcal{P}(Z)$ und eine **Menge** von Startzuständen.

Nichtdeterministische endliche Automaten

Informelle Kurzfassung:

- ▶ Der Zustandswechsel ist nicht eindeutig, sondern **nichtdeterministisch** in einen von mehreren (oder gar keinen) möglichen Zuständen.
- ▶ Der Automat darf sozusagen **raten**, welchen Nachfolgezustand er wählt.

- ▶ Im Zustandsgraph erlaubt:



- ▶ Technisch:
 - ▶ Ein **DFA** hat $\delta : Z \times \Sigma \rightarrow Z$ und **einen** Startzustand.
 - ▶ Ein **NFA** hat $\delta : Z \times \Sigma \rightarrow \mathcal{P}(Z)$ und eine **Menge** von Startzuständen.
- ▶ NFAs machen **manche Konstruktionen einfacher**.

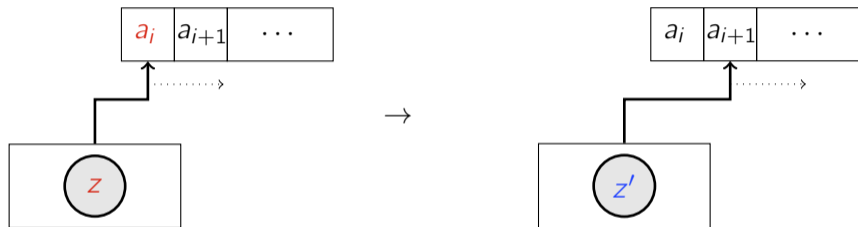
Definition eines NFA

Definition

Ein **nichtdeterministischer endlicher Automat** (*nondeterministic finite automaton*, **NFA**) ist ein 5-Tupel $M = (Z, \Sigma, \delta, S, E)$, wobei

- ▶ Z ist eine endliche Menge von **Zuständen**
- ▶ Σ ist das (endliche) **Eingabealphabet** mit $Z \cap \Sigma = \emptyset$
- ▶ $\delta : Z \times \Sigma \rightarrow \mathcal{P}(Z)$ ist die **Überföhrungsfunktion**
- ▶ $S \subseteq Z$ ist die Menge der **Startzustände**
- ▶ $E \subseteq Z$ ist die Menge der **Endzustände**.

Illustration des Zustandsübergangs



$z' \in \delta(z, a_i)$ bedeutet:

Im Zustand z bei Eingabe a_i darf der NFA in z' wechseln.

Beispiel für einen NFA

NFA $M = (\{z_0, z_1, z_2, z_3\}, \{a, b, c\}, \delta, \{z_0, z_3\}, \{z_3\})$ mit

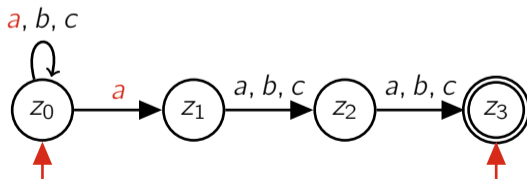
$$\begin{array}{llll} \delta(z_0, a) = \{z_0, z_1\} & \delta(z_1, a) = \{z_2\} & \delta(z_2, a) = \{z_3\} & \delta(z_3, a) = \emptyset \\ \delta(z_0, b) = \{z_0\} & \delta(z_1, b) = \{z_2\} & \delta(z_2, b) = \{z_3\} & \delta(z_3, b) = \emptyset \\ \delta(z_0, c) = \{z_0\} & \delta(z_1, c) = \{z_2\} & \delta(z_2, c) = \{z_3\} & \delta(z_3, c) = \emptyset \end{array}$$

Beispiel für einen NFA

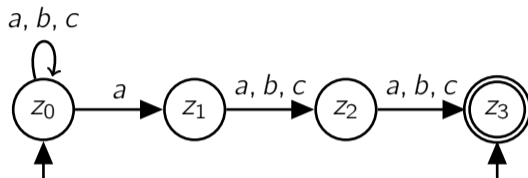
NFA $M = (\{z_0, z_1, z_2, z_3\}, \{a, b, c\}, \delta, \{z_0, z_3\}, \{z_3\})$ mit

$$\begin{array}{llll} \delta(z_0, a) = \{z_0, z_1\} & \delta(z_1, a) = \{z_2\} & \delta(z_2, a) = \{z_3\} & \delta(z_3, a) = \emptyset \\ \delta(z_0, b) = \{z_0\} & \delta(z_1, b) = \{z_2\} & \delta(z_2, b) = \{z_3\} & \delta(z_3, b) = \emptyset \\ \delta(z_0, c) = \{z_0\} & \delta(z_1, c) = \{z_2\} & \delta(z_2, c) = \{z_3\} & \delta(z_3, c) = \emptyset \end{array}$$

Zustandsgraph zu M :

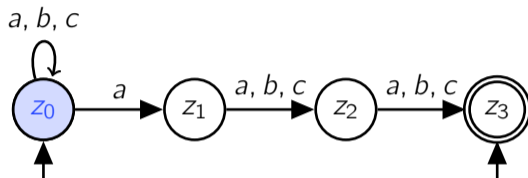


Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

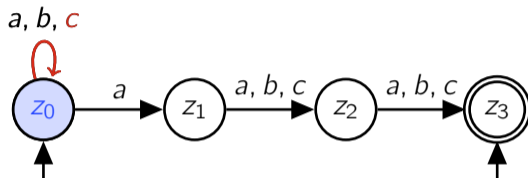
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

- ▶ Starte in z_0 .

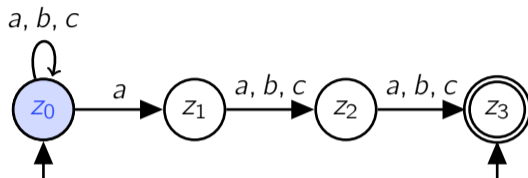
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c

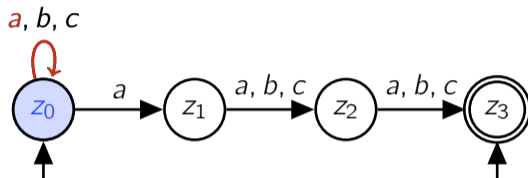
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .

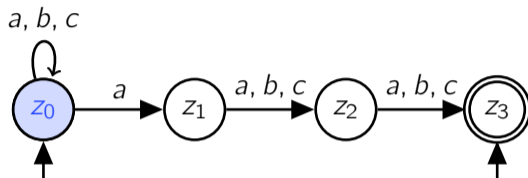
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a

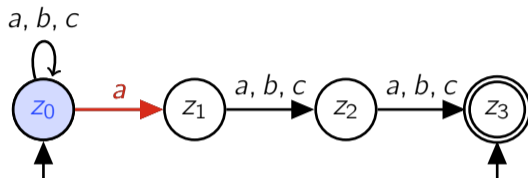
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .

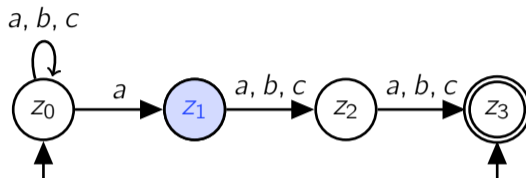
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies a

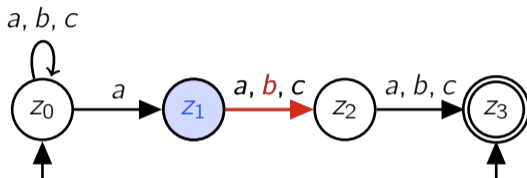
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .

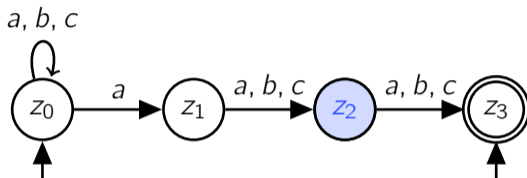
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies b

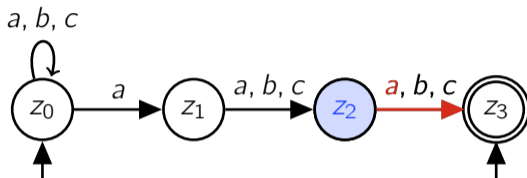
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_2 .

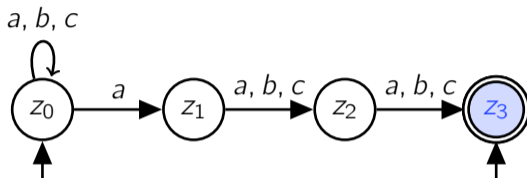
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_2 .
- ▶ Lies a

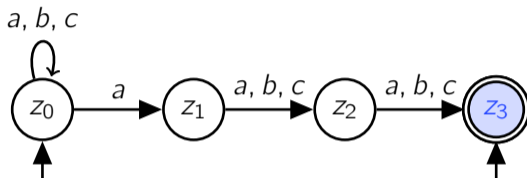
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_2 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_3 .

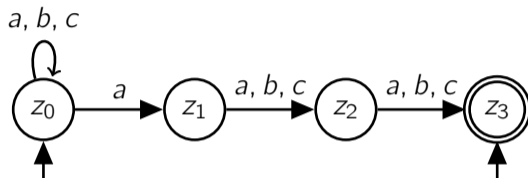
Beispiel für einen akzeptierenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

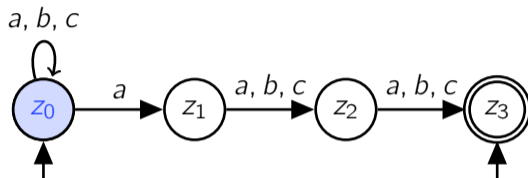
- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_2 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_3 .
- ▶ Akzeptiere.

Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

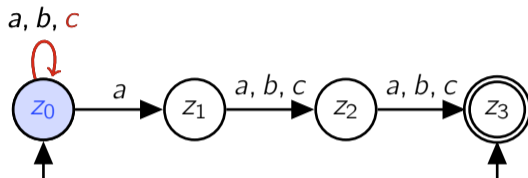
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .

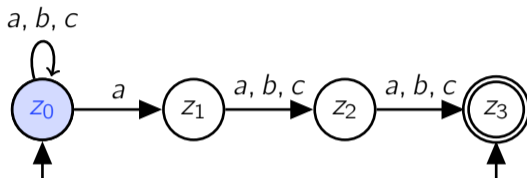
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c

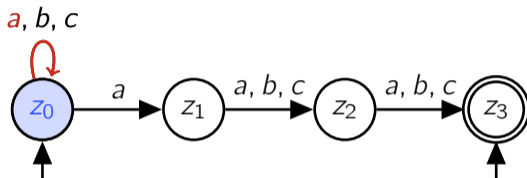
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .

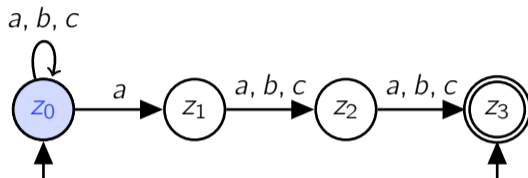
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a

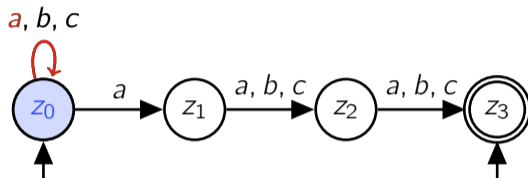
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .

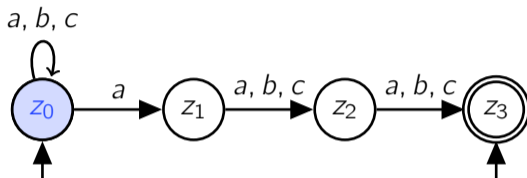
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a

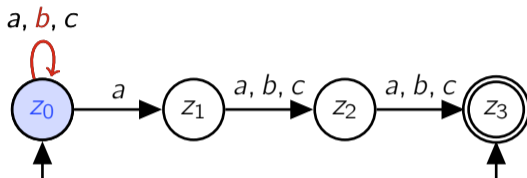
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .

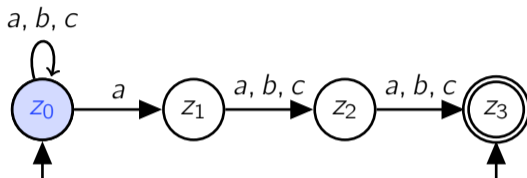
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies b

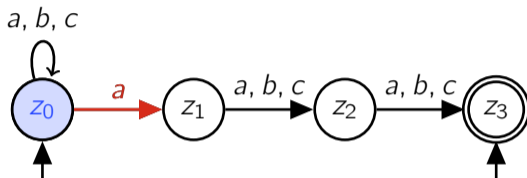
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_0 .

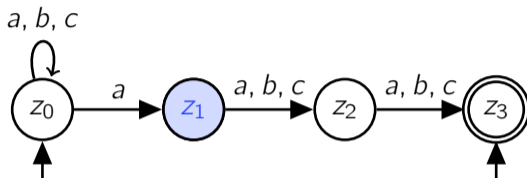
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a

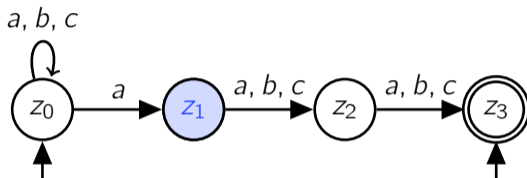
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .

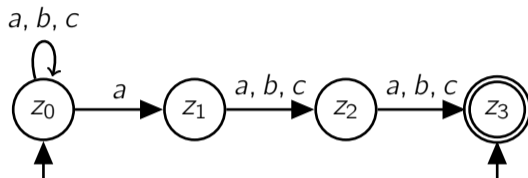
Beispiel für einen verwerfenden Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

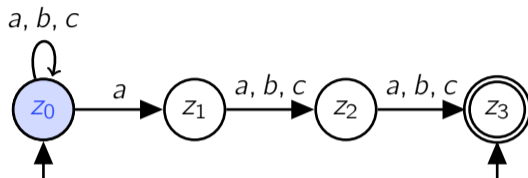
- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ **Verwerfe.**

Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

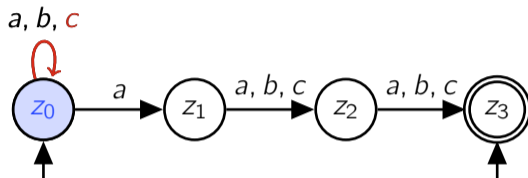
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .

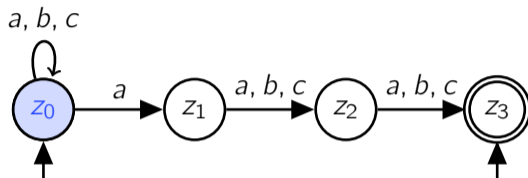
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c

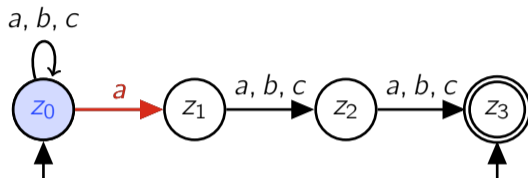
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .

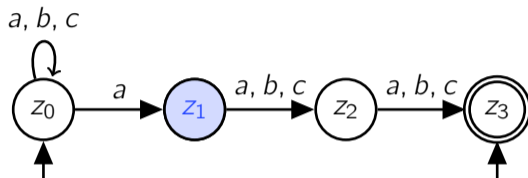
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a

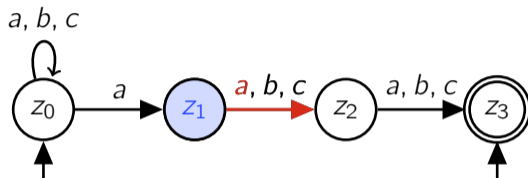
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .

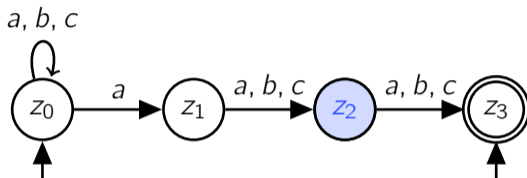
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies a

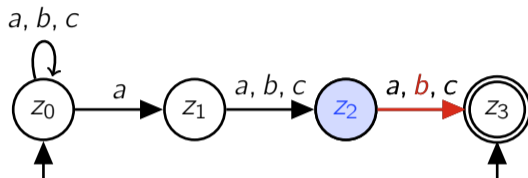
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_2 .

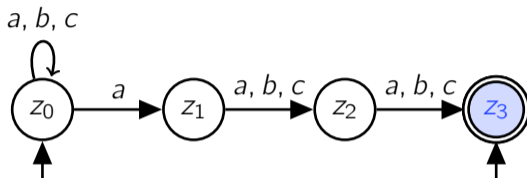
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_2 .
- ▶ Lies b

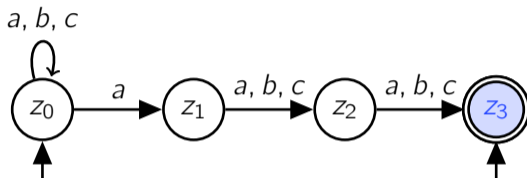
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_2 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_3 .

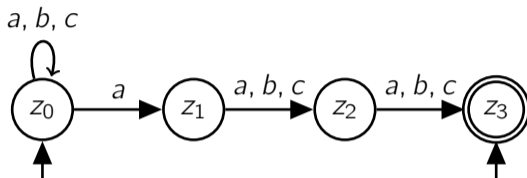
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_2 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_3 .
- ▶ Lies a und ...?

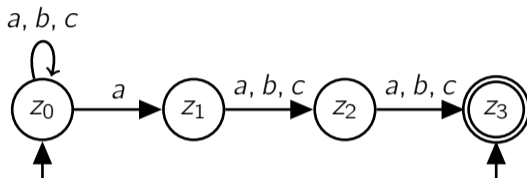
Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_2 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_3 .
- ▶ Lies a und ...?

Beispiel für einen steckengebliebenen Lauf



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

- ▶ Starte in z_0 .
- ▶ Lies c und wechsle in z_0 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_1 .
- ▶ Lies a und wechsle in z_2 .
- ▶ Lies b und wechsle in z_3 .
- ▶ Lies a und ...?
- ▶ **Verwerfe.**

Akzeptanz bei NFAs

Ein Wort w wird vom NFA akzeptiert, wenn es **mindestens einen** Pfad von **einem** Startzustand zu **einem** Endzustand entlang w gibt.

Akzeptanz bei NFAs

Ein Wort w wird vom NFA akzeptiert, wenn es **mindestens einen** Pfad von **einem** Startzustand zu **einem** Endzustand entlang w gibt.

Definition

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, S, E)$ ein NFA.

Wir definieren $\tilde{\delta} : \mathcal{P}(Z) \times \Sigma^* \rightarrow \mathcal{P}(Z)$ rekursiv durch

$$\begin{aligned}\tilde{\delta}(X, \varepsilon) &:= X \\ \tilde{\delta}(X, aw) &:= \tilde{\delta}\left(\bigcup_{z \in X} \delta(z, a), w\right)\end{aligned}$$

Akzeptanz bei NFAs

Ein Wort w wird vom NFA akzeptiert, wenn es **mindestens einen** Pfad von **einem** Startzustand zu **einem** Endzustand entlang w gibt.

Definition

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, S, E)$ ein NFA.

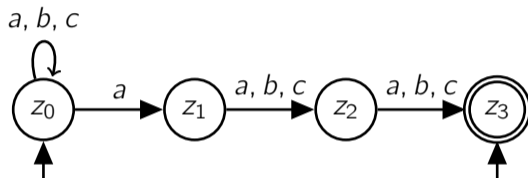
Wir definieren $\tilde{\delta} : \mathcal{P}(Z) \times \Sigma^* \rightarrow \mathcal{P}(Z)$ rekursiv durch

$$\begin{aligned}\tilde{\delta}(X, \varepsilon) &:= X \\ \tilde{\delta}(X, aw) &:= \tilde{\delta}\left(\bigcup_{z \in X} \delta(z, a), w\right)\end{aligned}$$

Die von M **akzeptierte Sprache** ist

$$L(M) := \{w \in \Sigma^* \mid \tilde{\delta}(S, w) \cap E \neq \emptyset\}$$

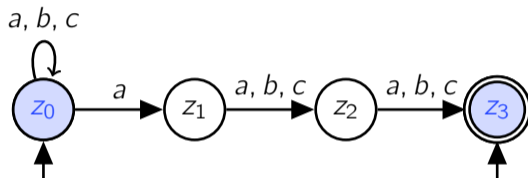
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) =$$

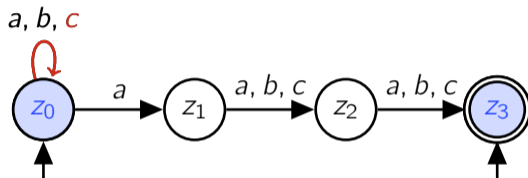
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\bigcup_{z \in \{z_0, z_3\}} \delta(z, c), aaba)$$

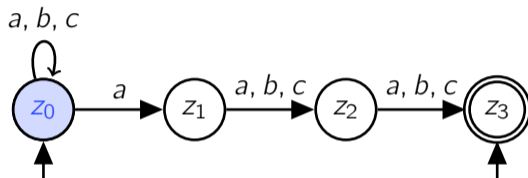
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\delta(z_0, c) \cup \delta(z_3, c), aaba)$$

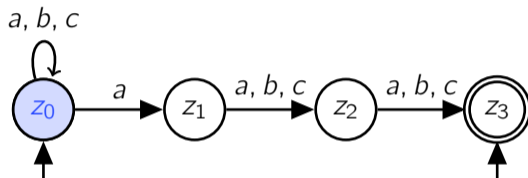
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\{z_0\} \cup \emptyset, aaba)$$

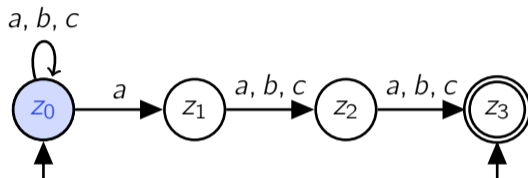
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\{z_0\}, aaba)$$

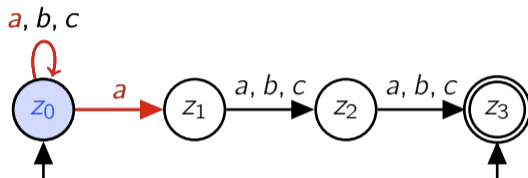
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\bigcup_{z \in \{z_0\}} \delta(z, a), aba)$$

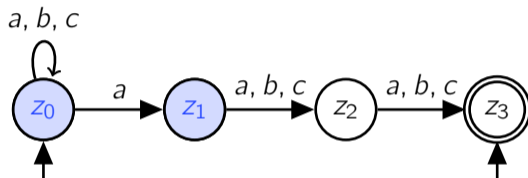
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\delta(z_0, a), aba)$$

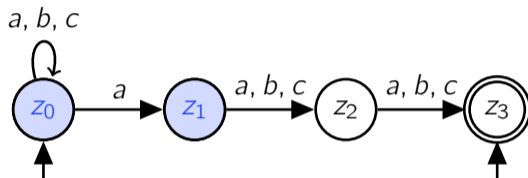
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\{z_0, z_1\}, aba)$$

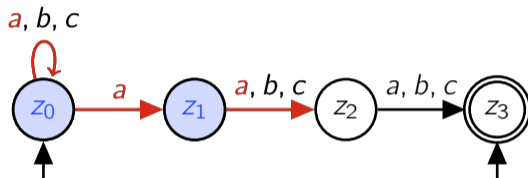
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\bigcup_{z \in \{z_0, z_1\}} \delta(z, a), ba)$$

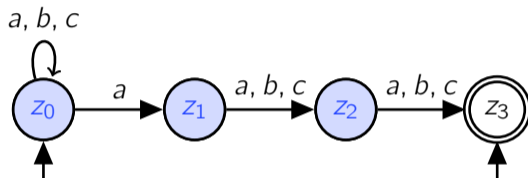
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\delta(z_0, a) \cup \delta(z_1, a), ba)$$

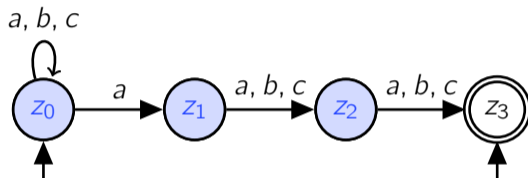
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\{z_0, z_1\} \cup \{z_2\}, ba)$$

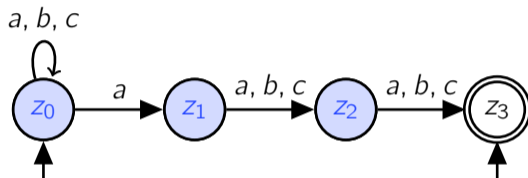
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\{z_0, z_1, z_2\}, ba)$$

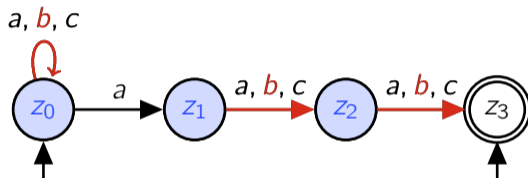
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\bigcup_{z \in \{z_0, z_1, z_2\}} \delta(z, b), a)$$

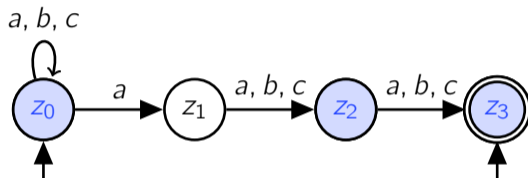
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\delta(z_0, b) \cup \delta(z_1, b) \cup \delta(z_2, b), a)$$

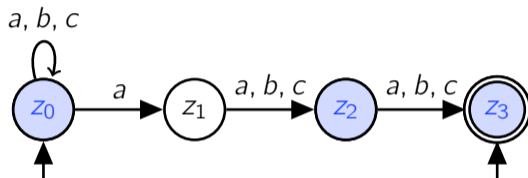
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\{z_0\} \cup \{z_2\} \cup \{z_3\}, a)$$

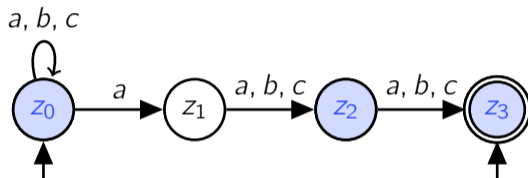
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\{z_0, z_2, z_3\}, a)$$

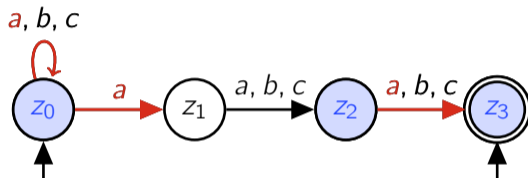
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\bigcup_{z \in \{z_0, z_2, z_3\}} \delta(z, a), \varepsilon)$$

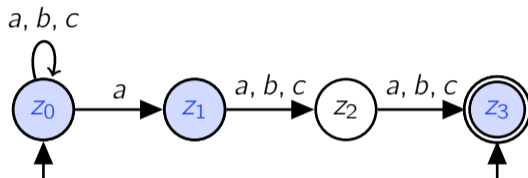
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\delta(z_0, a) \cup \delta(z_2, a) \cup \delta(z_3, a), \varepsilon)$$

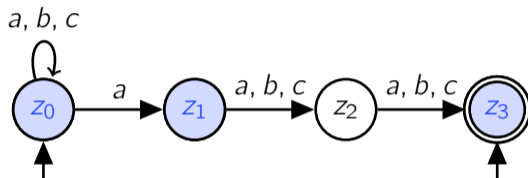
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\{z_0, z_1\} \cup \{z_3\} \cup \emptyset, \varepsilon)$$

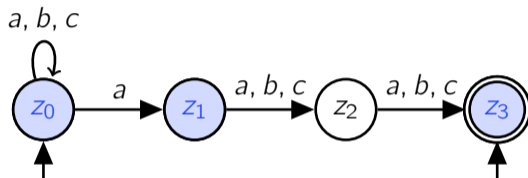
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \tilde{\delta}(\{z_0, z_1, z_3\}, \epsilon)$$

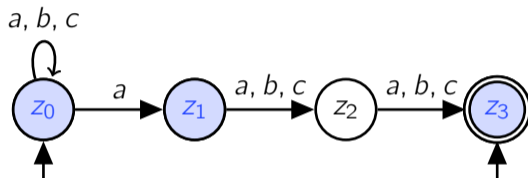
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe $caaba$:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \{z_0, z_1, z_3\}$$

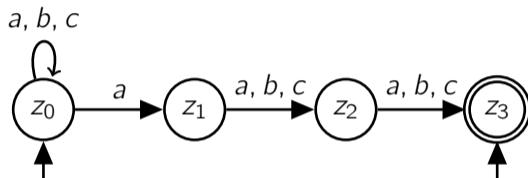
Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *caaba*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, caaba) = \{z_0, z_1, z_3\} \cap \{z_3\} \neq \emptyset$$

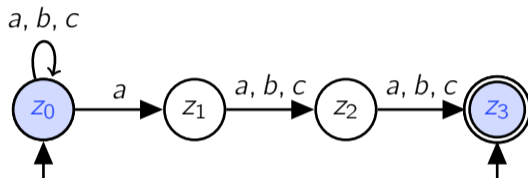
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe bab :

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) =$$

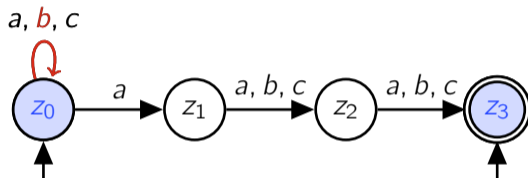
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *bab*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\bigcup_{z \in \{z_0, z_3\}} \delta(z, b), ab)$$

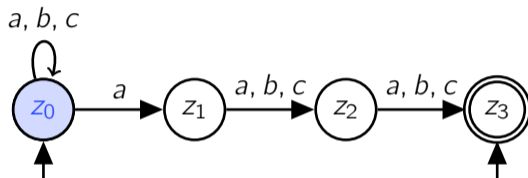
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe bab :

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\delta(z_0, b) \cup \delta(z_3, b), ab)$$

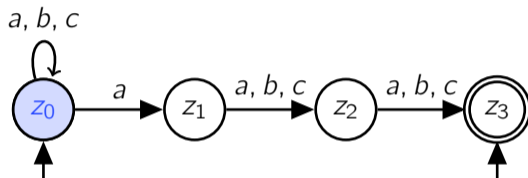
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *bab*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\{z_0\} \cup \emptyset, ab)$$

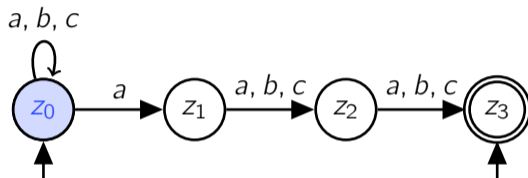
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *bab*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\{z_0\}, ab)$$

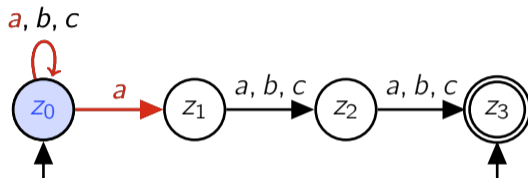
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe bab :

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\bigcup_{z \in \{z_0\}} \delta(z, a), b)$$

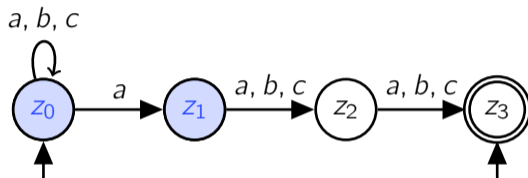
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe bab :

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\delta(z_0, a), b)$$

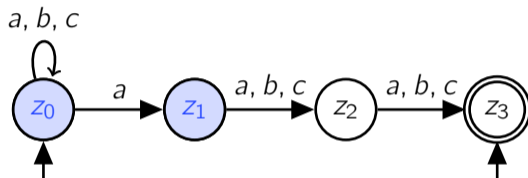
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe bab :

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\{z_0, z_1\}, b)$$

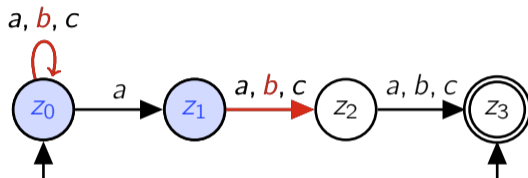
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *bab*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\bigcup_{z \in \{z_0, z_1\}} \delta(z, b), \varepsilon)$$

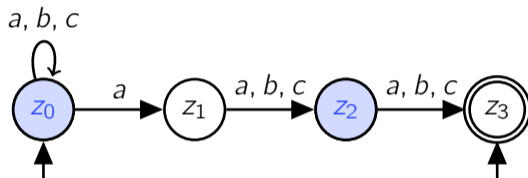
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe bab :

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\delta(z_0, b) \cup \delta(z_1, b), \epsilon)$$

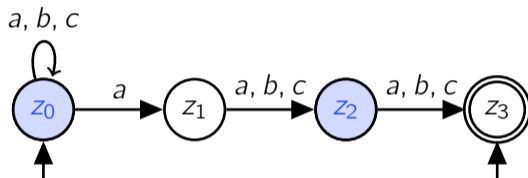
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *bab*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\{z_0\} \cup \{z_2\}, \varepsilon)$$

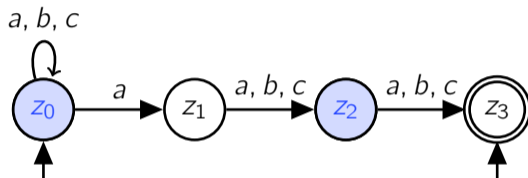
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe *bab*:

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \tilde{\delta}(\{z_0, z_2\}, \epsilon)$$

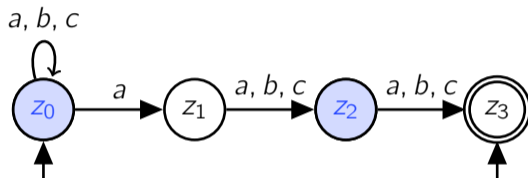
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe bab :

$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \{z_0, z_2\}$$

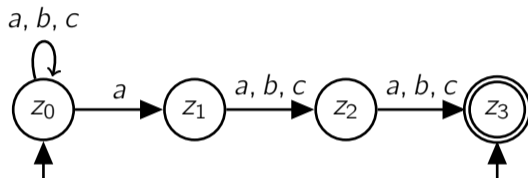
Weiteres Beispiel für die $\tilde{\delta}$ -Funktion



Abarbeitung der Eingabe bab :

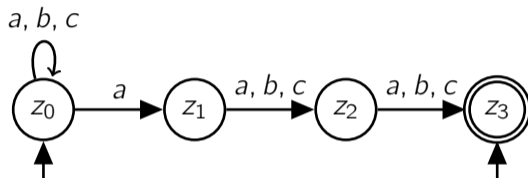
$$\tilde{\delta}(\{z_0, z_3\}, bab) = \{z_0, z_2\} \cap \{z_3\} = \emptyset$$

Akzeptierte Sprache des Beispiels



Akzeptierte Sprache = ?

Akzeptierte Sprache des Beispiels



Akzeptierte Sprache = $\{\epsilon\} \cup \{uav \mid u \in \{a, b, c\}^*, v \in \{a, b, c\}^2\}$

Definition

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, S, E)$ ein NFA und $w \in \Sigma^*$ ein Wort der Länge n .
Eine Folge von Zuständen z_0, \dots, z_n mit $z_0 \in S$ und $z_i \in \delta(z_{i-1}, w[i])$ für $i \in \{1, \dots, n\}$ ist ein **Lauf** von M für w .

Definition

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, S, E)$ ein NFA und $w \in \Sigma^*$ ein Wort der Länge n .
Eine Folge von Zuständen z_0, \dots, z_n mit $z_0 \in S$ und $z_i \in \delta(z_{i-1}, w[i])$ für $i \in \{1, \dots, n\}$ ist ein **Lauf** von M für w .

Für einen Lauf schreiben wir auch

$$z_0 \xrightarrow{w[1]} z_1 \xrightarrow{w[2]} \dots \xrightarrow{w[n-1]} z_{n-1} \xrightarrow{w[n]} z_n$$

Definition

Sei $M = (Z, \Sigma, \delta, S, E)$ ein NFA und $w \in \Sigma^*$ ein Wort der Länge n .
Eine Folge von Zuständen z_0, \dots, z_n mit $z_0 \in S$ und $z_i \in \delta(z_{i-1}, w[i])$ für $i \in \{1, \dots, n\}$ ist ein **Lauf** von M für w .

Für einen Lauf schreiben wir auch

$$z_0 \xrightarrow{w[1]} z_1 \xrightarrow{w[2]} \dots \xrightarrow{w[n-1]} z_{n-1} \xrightarrow{w[n]} z_n$$

Während es bei DFAs genau einen Lauf pro Wort gibt, kann es bei NFAs mehrere geben (oder gar keine).

Beispiel für die Konstruktion eines NFA

Konstruiere einen NFA über $\{a, b\}$, der alle Wörter akzeptiert, die mit $abaa$ beginnen und mit bab enden (z.B. *abaabab*, *abaaaabab*, *abaababab*):

Beispiel für die Konstruktion eines NFA

Konstruiere einen NFA über $\{a, b\}$, der alle Wörter akzeptiert, die mit $abaa$ beginnen und mit bab enden (z.B. *abaabab*, *abaaaabab*, *abaababab*):



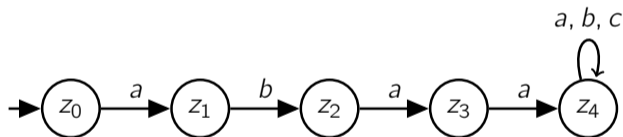
Beispiel für die Konstruktion eines NFA

Konstruiere einen NFA über $\{a, b\}$, der alle Wörter akzeptiert, die mit $abaa$ beginnen und mit bab enden (z.B. *abaabab*, *abaaaabab*, *abaababab*):



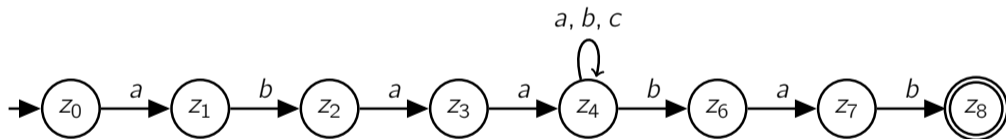
Beispiel für die Konstruktion eines NFA

Konstruiere einen NFA über $\{a, b\}$, der alle Wörter akzeptiert, die mit $abaa$ beginnen und mit bab enden (z.B. *abaabab*, *abaaaabab*, *abaababab*):



Beispiel für die Konstruktion eines NFA

Konstruiere einen NFA über $\{a, b\}$, der alle Wörter akzeptiert, die mit $abaa$ beginnen und mit bab enden (z.B. *abaabab*, *abaaaabab*, *abaababab*):



Weiteres Beispiel für die Konstruktion eines NFA

Konstruiere einen NFA über
 $\{+, -, ., 0, \dots, 9\}$,
der alle Wörter akzeptiert,
die Gleitkommazahlen
darstellen
(z.B. $+27$, -3.14 , $.666$):

Weiteres Beispiel für die Konstruktion eines NFA

Konstruiere einen NFA über
 $\{+, -, ., 0, \dots, 9\}$,
der alle Wörter akzeptiert,
die Gleitkommazahlen
darstellen
(z.B. $+27$, -3.14 , $.666$):

