

FORMALE SYSTEME

3. Vorlesung: Endliche Automaten

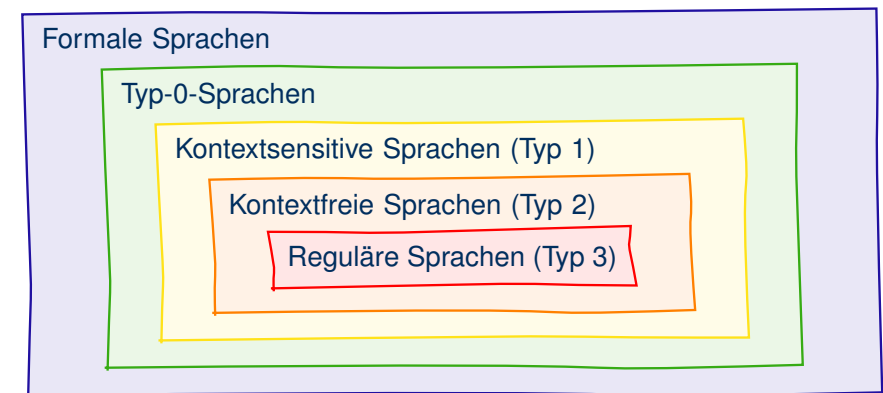
Markus Krötzsch

Lehrstuhl Wissensbasierte Systeme

TU Dresden, 16. Oktober 2017

Wiederholung

Mit Grammatiken können wir Sprachen beschreiben und sie grob in Typen unterteilen:



Markus Krötzsch, 16. Oktober 2017

Formale Systeme

Folie 3 von 31

Grammatiken in der Praxis

Eine „ASCII-Syntax“ für Typ-2-Grammatiken ist die sogenannte **Backus-Naur-Form (BNF)**:¹

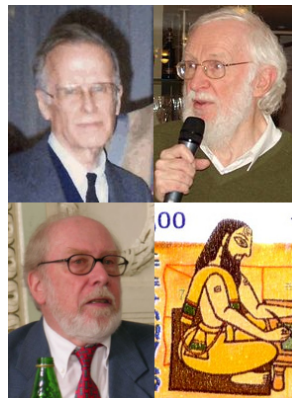
- statt \rightarrow wird $::=$ verwendet
- $|$ für Alternativen (wie bei uns)
- Markierung: "Terminalsymbole" und <Nichtterminalsymbole>

Erweiterte BNF (EBNF), von Nicklas Wirth):

- allgemein wie BNF, aber Konkatenation mit Kommas
- Zusätzliche Abkürzungen $[X]$ für „null oder ein X“ und $\{X\}$ für „null oder mehr X“

In der Praxis sind unterschiedliche Notationen im Einsatz

(EBNF von Wirth; ISO EBNF; W3C EBNF; „Augmented BNF“ der IETF; verschiedene „EBNF“ aus Vorlesungen und Lehrbüchern ...)



oben: John Backus, Peter Naur
unten: Nicklas Wirth, Panini

Sprachen Nutzen und Verstehen

¹Panini, 5./4. Jhd. v. Chr.; neu erfunden von John Backus in 1959

Von Beschreiben zu Erkennen

Grammatiken beschreiben Sprachen als Mengen von Wörtern, die sie erzeugen können.

Praktisch wichtige Aufgabe: **erkenne** ob ein Wort in einer Sprache liegt

Das **Wortproblem** für eine Sprache L über Alphabet Σ besteht darin, die folgende Funktion zu berechnen:

Eingabe: ein Wort $w \in \Sigma^*$

Ausgabe: „ja“ wenn $w \in L$ und „nein“ wenn $w \notin L$

Für die Sprache $\{a\} \circ \{b\}^*$ wird das Wortproblem durch einen einfachen Algorithmus in linearer Zeit gelöst (teste, ob der erste Buchstabe a ist und ob alle folgenden Buchstaben b sind).

Andererseits kann das Wortproblem sehr schwer sein, selbst für Sprachen, die mit einer Grammatik formal beschrieben sind.

Weitere Fragestellungen

Das Wortproblem ist nicht die einzige praktisch relevante Frage.

Darstellungen von Sprachen

- Welche verschiedenen Darstellungen gibt es (Grammatiken, Automaten, ...)? Wie kann man eine Darstellung in eine andere übersetzen?
- Beschreiben zwei Darstellungen die gleiche Sprache? Beschreibt eine Darstellung die leere Sprache?
- Wie kann eine Darstellung vereinfacht werden?

Eigenschaften von Sprachen

- Was passiert, wenn man Operationen anwendet, um neue Sprachen zu erzeugen?

Beispiel:

Wenn L_1 und L_2 regulär sind, wie ist es dann mit $L_1 \cap L_2$?

↪ sogenannte **Abschlusseigenschaften**

Ausblick

Wir werden sehen, dass jede Sprachklasse zu einem bestimmten Berechnungsmodell passt:

Sprachklasse	Berechnungsmodell	Wortproblem
Typ 0	Turingmaschine (TM)	semi-entscheidbar ¹
Kontextsensitiv	nichtdeterministische TM mit linearem Speicher	PSpace-vollständig ²
Kontextfrei	nichtdeterministischer Kellerautomat	polynomiell
Regulär	endlicher Automat	polynomiell ³

¹Akzeptanz von Wörtern kann beliebig lange dauern, so dass man nie weiß, ob sie noch passiert; Wörter können nur rekursiv aufgezählt werden

²höchstwahrscheinlich schwerer als NP; jeder praktisch bekannte Algorithmus benötigt im Worst Case exponentiell viel Zeit

³tatsächlich sogar noch viel einfacher als Typ 2

Vorschau

Plan der nächsten Vorlesungen:

Reguläre Sprachen

- endliche Automaten
- reguläre Ausdrücke
- Eigenschaften regulärer Sprachen

Kontextfreie Sprachen

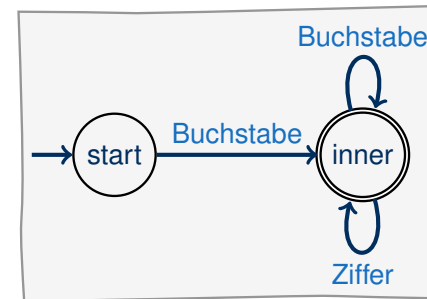
- Normalformen kontextfreier Grammatiken
- Kellerautomaten
- Eigenschaften kontextfreier Sprachen

Endliche Automaten

Beispiel

„Ein Bezeichner ist ein String, der mit einem Buchstaben beginnt und danach nur Buchstaben oder Ziffern enthält.“

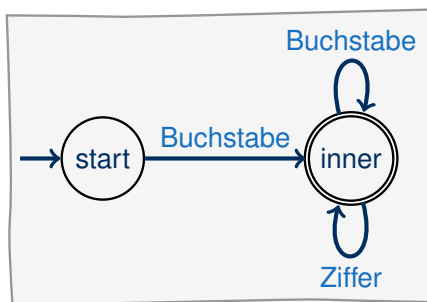
Darstellung als **endlicher Automat**:



- Automat beginnt im Startzustand → start
- Zustandswechsel gemäß Pfeilen
- Kein passender Pfeil für Symbol? **„return false“**
- Keine weiteren Symbole? **„return true“** in Endzustand inner
- **„return false“** falls in Zustand start

Worterkennung mit Automaten

Ein Automat kann eine Sprache erkennen, indem er Wörter akzeptiert oder ablehnt:



Wort	Zustandsfolge	Ergebnis
utf8	start inner inner inner inner	akzeptiert
C++	start inner ?	abgelehnt (fehlender Übergang)
€	start	abgelehnt (kein Endzustand)

Deterministische Endliche Automaten

Die graphische Darstellung von Automaten ist anschaulich, aber nicht immer praktisch. Formal definieren wir Automaten wie folgt:

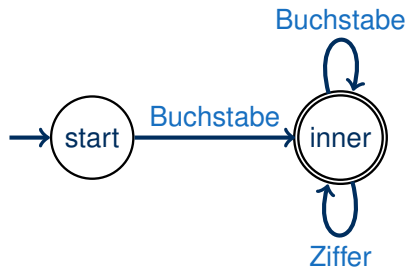
Ein **deterministischer endlicher Automat** (international: „DFA“) \mathcal{M} ist ein Tupel $\mathcal{M} = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ mit den folgenden Bestandteilen:

- Q : endliche Menge von **Zuständen**
- Σ : Alphabet
- δ : **Übergangsfunktion**, eine **partielle*** Funktion $Q \times \Sigma \rightarrow Q$
- q_0 : **Startzustand** $q_0 \in Q$
- F : Menge von **Endzuständen** $F \subseteq Q$

(* d.h. manche Übergänge sind undefiniert, wie im Beispiel)

Notation: Wir schreiben statt $\delta(q, a) = q'$ auch $q \xrightarrow{a} q'$.

Beispiel



Endlicher Automat $\mathcal{M} = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ mit

- $Q = \{\text{start}, \text{inner}\}$
- $\Sigma = \{\mathbf{a}, \mathbf{b}, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{1}, \dots, \mathbf{9}, \dots\}$ (in Zeichnung unterspezifiziert)
- δ definiert wie folgt:
 - $\delta(\text{start}, x) = \text{inner}$ für alle Buchstaben x
 - $\delta(\text{inner}, y) = \text{inner}$ für alle Buchstaben und Ziffern y
 - $\delta(q, x)$ undefiniert für alle anderen Fälle
- $q_0 = \text{start}$
- $F = \{\text{inner}\}$

Ist mein Computer ein DFA?

Beobachtungen:

- Computer haben endlich viel Speicher, können also nur endlich viele Zustände einnehmen
- Programme verändern Speicher nach festen Regeln, die man als Übergangsfunktion auffassen könnte

Sind alle Computer DFAs?

Jein.

- Zustandsmenge und Übergangsfunktion extrem groß
→ keine praktisch nützliche Beschreibung für ganze Computer
- Computerprogramme verhalten sich systematisch, unabhängig von der Speichergröße
→ DFA-Übergänge können diese Systematik nicht gut abbilden

Die Sprache eines DFA

Für einen DFA $\mathcal{M} = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ erweitern wir $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$ zu einer Übergangsfunktion $\delta : Q \times \Sigma^* \rightarrow Q$ auf Wörtern:

Für einen Zustand $q \in Q$ und ein Wort $w \in \Sigma^*$ sei $\delta(q, w)$ der eindeutig bestimmte Zustand, den man erreicht, wenn man ausgehend von q das Wort w einliest:

- $\delta(q, \epsilon) = q$ (Fall $w = \epsilon$)
- $\delta(q, \mathbf{a}v) = \delta(\delta(q, \mathbf{a}), v)$ (Fall $w = \mathbf{a}v$)

$\delta(q, w)$ ist undefiniert wenn einer der nötigen Übergänge undefiniert ist.

Die Sprache eines DFA kann nun formal definiert werden:

Die **Sprache eines DFA** $\mathcal{M} = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ ist die Menge

$$\mathbf{L}(\mathcal{M}) = \{w \in \Sigma^* \mid \delta(q_0, w) \in F\}.$$

Alternative Definition: totale Übergänge

Wir können DFAs mit partieller Übergangsfunktion in DFAs mit totaler Übergangsfunktion umwandeln:

Eingabe: DFA $\mathcal{M} = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$

Ausgabe: DFA $\mathcal{M}_{\text{total}} = \langle Q', \Sigma, \delta', q_0, F \rangle$

- füge einen neuen **Fangzustand** q_f ein: $Q' := Q \cup \{q_f\}$
- für alle Zustände $q \in Q'$ und Symbole $\mathbf{a} \in \Sigma$:

$$\delta'(q, \mathbf{a}) := \begin{cases} \delta(q, \mathbf{a}) & \text{falls } \delta(q, \mathbf{a}) \text{ definiert} \\ q_f & \text{falls } \delta(q, \mathbf{a}) \text{ nicht definiert} \end{cases}$$

Anmerkung: laut dieser Definition gilt insbesondere $\delta'(q_f, \mathbf{a}) = q_f$ für alle $\mathbf{a} \in \Sigma$.

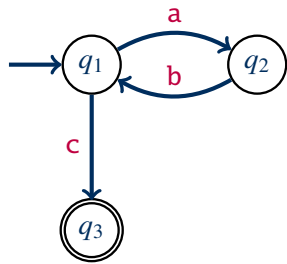
→ wird beim Lesen eines Wortes q_f erreicht, dann kann es nicht mehr akzeptiert werden (da $q_f \notin F$)

Totale Übergänge (2)

Satz: $M_{\text{total}} = \langle Q', \Sigma, \delta', q_0, F \rangle$ hat eine totale Übergangsfunktion und akzeptiert die selbe Sprache wie M , d.h. $L(M_{\text{total}}) = L(M)$.

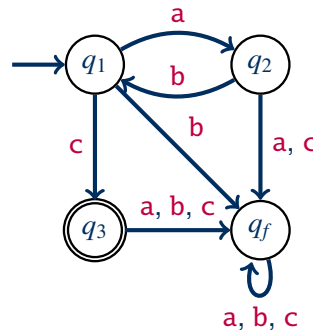
Beispiel: wir betrachten das Alphabet $\Sigma = \{a, b, c\}$

DFA M mit partieller Übergangsfunktion:



$$L(M) = (ab)^*c$$

DFA M_{total} mit totaler Übergangsfunktion:



Die Sprachen endlicher Automaten

Idee: Ein Typ von Automaten definiert eine Klasse von Sprachen
Bsp.: „Die Klasse aller Sprachen, die irgendein DFA erkennen kann“

Eine Alternative zur Chomsky-Hierarchie?

Es zeigt sich: mit DFAs erhält man keine neue Sprachklasse!

Satz: Die Klasse der Sprachen, die durch einen DFA erkannt werden können, ist genau die Klasse der regulären Sprachen.

Konsequenzen:

- DFAs können nur sehr einfache Sprachen akzeptieren
- Typ-3-Sprachen sind eine „natürliche“ Klasse: sowohl in der Welt der Grammatiken als auch in der Welt der Automaten

Von DFAs zu regulären Grammatiken

Satz: Die Klasse der Sprachen, die durch einen DFA erkannt werden können, ist genau die Klasse der regulären Sprachen.

Beweis: Eine Richtung dieser Behauptung ist leicht zu sehen:

Für jeden DFA M gibt es eine reguläre Grammatik G_M , welche die selbe Sprache akzeptiert (d.h., $L(M) = L(G_M)$).

Für $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ ergibt sich $G_M = \langle V, \Sigma, P, S \rangle$ wie folgt:

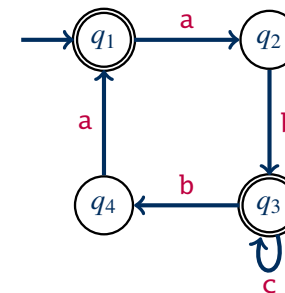
- $V := Q$
- $S := q_0$
- P besteht aus den folgenden Produktionsregeln:

$$q \rightarrow aq' \quad \text{falls } \delta(q, a) = q'$$

$$q \rightarrow a \quad \text{falls } \delta(q, a) \in F$$

$$q_0 \rightarrow \epsilon \quad \text{falls } q_0 \in F$$

Beispiel



Für $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ ergibt sich $G_M = \langle V, \Sigma, P, S \rangle$ wie folgt:

- $V := Q$
- $S := q_0$
- P besteht aus den folgenden Produktionsregeln:

$$q \rightarrow aq' \quad \text{falls } \delta(q, a) = q'$$

$$q \rightarrow a \quad \text{falls } \delta(q, a) \in F$$

$$q_0 \rightarrow \epsilon \quad \text{falls } q_0 \in F$$

Produktionsregeln der entsprechenden Grammatik:

$$q_1 \rightarrow aq_2 \quad q_2 \rightarrow bq_3 \quad q_3 \rightarrow cq_3 \quad q_3 \rightarrow bq_4 \quad q_4 \rightarrow aq_1$$

$$q_2 \rightarrow b \quad q_3 \rightarrow c \quad q_4 \rightarrow a$$

$$q_1 \rightarrow \epsilon$$

DFAs akzeptieren reguläre Sprachen: Beweis

Satz: Die Klasse der Sprachen, die durch einen DFA erkannt werden können, ist genau die Klasse der regulären Sprachen.

Beweis (Fortsetzung): Wir müssen noch die Korrektheit des angegebenen Verfahrens zeigen, also dass $L(M) = L(G_M)$.

Dazu beweisen wir beide Richtungen einzeln:

„ \subseteq “ Jedes von M akzeptierte Wort kann von G_M erzeugt werden.

„ \supseteq “ Jedes von G_M erzeugte Wort kann von M akzeptiert werden.

$L(M) \supseteq L(G_M)$

G_M hat drei Typen von Regeln: $q \rightarrow aq'$, $q \rightarrow a$ und $q_0 \rightarrow \epsilon$

Für ein Wort $w = a_1 \cdots a_n$ sind zwei Arten von Ableitungen denkbar:

(1) $q_0 \Rightarrow a_1 q_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow a_1 \cdots a_{n-1} q_{n-1} \Rightarrow a_1 \cdots a_{n-1} a_n$

(2) $q_0 \Rightarrow a_1 q_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow a_1 \cdots a_{n-1} q_{n-1} \Rightarrow a_1 \cdots a_{n-1} a_n q_n \Rightarrow a_1 \cdots a_n$

In Fall (1) wurden Regeln der folgenden Form angewendet:

$$q_0 \rightarrow a_1 q_1 \quad q_1 \rightarrow a_2 q_2 \quad \dots \quad q_{n-1} \rightarrow a_n$$

Also hat M die folgenden Übergänge:

$$q_0 \xrightarrow{a_1} q_1 \quad q_1 \xrightarrow{a_2} q_2 \quad \dots \quad q_{n-1} \xrightarrow{a_n} q_n$$

wobei $q_n \in F$ ein Endzustand ist.

Also gilt $\delta(q_0, a_1 \cdots a_n) = q_n \in F$ und M akzeptiert das Wort w .

$L(M) \subseteq L(G_M)$

Wir betrachten ein beliebiges Wort $w \in L(M)$.

Falls $w = \epsilon$, dann ist $q_0 \in F$.

- Dann hat G_M eine Regel $q_0 \rightarrow \epsilon$
- Also ist $w \in L(G_M)$

Falls $w = a_1 \cdots a_n$ mit $n \geq 1$, dann gilt $\delta(q_0, w) \in F$.

- Dann gibt es Übergänge $q_0 \xrightarrow{a_1} q_1 \xrightarrow{a_2} \dots \xrightarrow{a_n} q_n$ mit $q_n \in F$
- Dann hat G_M die Regeln:

$$q_0 \rightarrow a_1 q_1 \quad q_1 \rightarrow a_2 q_2 \quad \dots \quad q_{n-1} \rightarrow a_n$$

- Durch Anwendung dieser Regeln kann man ableiten:

$$q_0 \Rightarrow a_1 q_1 \Rightarrow a_1 a_2 q_2 \Rightarrow \dots \Rightarrow a_1 a_2 \cdots a_{n-1} q_{n-1} \Rightarrow a_1 a_2 \cdots a_{n-1} a_n$$

- Also ist $w \in L(G_M)$.

Somit gilt $w \in L(G_M)$ für beliebige $w \in L(M)$, d.h. $L(M) \subseteq L(G_M)$

$L(M) \supseteq L(G_M)$

G_M hat drei Typen von Regeln: $q \rightarrow aq'$, $q \rightarrow a$ und $q_0 \rightarrow \epsilon$

Für ein Wort $w = a_1 \cdots a_n$ sind zwei Arten von Ableitungen denkbar:

(1) $q_0 \Rightarrow a_1 q_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow a_1 \cdots a_{n-1} q_{n-1} \Rightarrow a_1 \cdots a_{n-1} a_n$

(2) $q_0 \Rightarrow a_1 q_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow a_1 \cdots a_{n-1} q_{n-1} \Rightarrow a_1 \cdots a_{n-1} a_n q_n \Rightarrow a_1 \cdots a_n$

In Fall (2) wurden Regeln der folgenden Form angewendet:

$$q_0 \rightarrow a_1 q_1 \quad q_1 \rightarrow a_2 q_2 \quad \dots \quad q_{n-1} \rightarrow a_n q_n \quad q_n \rightarrow \epsilon$$

Also ist $q_n = q_0$ mit $q_0 \in F$ und M hat die folgenden Übergänge:

$$q_0 \xrightarrow{a_1} q_1 \quad q_1 \xrightarrow{a_2} q_2 \quad \dots \quad q_{n-1} \xrightarrow{a_n} q_0$$

Also gilt $\delta(q_0, a_1 \cdots a_n) = q_0 \in F$ und M akzeptiert das Wort w .

Zusammengefasst gilt somit $w \in L(M)$ für beliebige $w \in L(G_M)$, d.h. $L(M) \supseteq L(G_M)$ □

Reguläre Grammatiken und DFAs

Wir haben bisher gezeigt:

Jede von DFA erkannte Sprache ist regulär.

Für die Umkehrung müsste man reguläre Grammatiken in DFAs übersetzen.

Kann man die Übersetzung nicht einfach umdrehen?

- Für jede reguläre Regel $A \rightarrow aB$ definieren wir $\delta(A, a) = B$
- Für jede reguläre Regel $A \rightarrow a$ definieren wir $\delta(A, a) = C$ mit $C \in F$

Warum funktioniert das nicht?

Weil die Übergangsfunktion dann mehr als einen Wert hätte!

Beispiel: Eine Grammatik kann die Regeln $S \rightarrow aA$, $S \rightarrow aS$ und $A \rightarrow \epsilon$ haben, aber wir können nicht $\delta(S, a) = A$ und $\delta(S, a) = S$ gleichzeitig fordern.

Nichtdeterministische Übergänge

Kann die Übergangsfunktion „mehr als einen Wert“ haben?

↪ darstellbar als Menge, z.B. $\delta(q, a) = \{q_1, q_2\}$

Was soll das bedeuten?

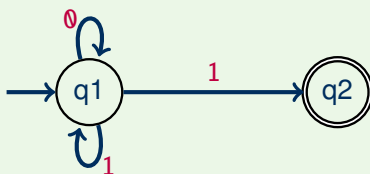
- Der Automat hat die Wahl zwischen mehreren Übergängen
- Die Verarbeitung eines Wortes wird **nichtdeterministisch** (weil die Eingabe nicht völlig bestimmt, in welchen Zustand der Automat gelangt)
- Der Automat akzeptiert ein Wort, wenn es eine „richtige“ Wahl von Zustandsübergängen gibt, die zu einem Endzustand führt

Nichtdeterministische Automaten

Ein **nichtdeterministischer endlicher Automat** (international: „NFA“) \mathcal{M} ist ein Tupel $\mathcal{M} = \langle Q, \Sigma, \delta, Q_0, F \rangle$ mit den folgenden Bestandteilen:

- Q : endliche Menge von **Zuständen**
- Σ : Alphabet
- δ : **Übergangsfunktion**, eine totale Funktion $Q \times \Sigma \rightarrow 2^Q$, wobei 2^Q die Potenzmenge von Q ist
- Q_0 : Menge möglicher **Startzustände** $Q_0 \subseteq Q$
- F : Menge von **Endzuständen** $F \subseteq Q$

Beispiel:



Welche Sprache erkennt dieser Automat?

NFAs: Alternative Definitionen

In der Literatur gibt es leicht abgewandelte Definitionen von NFAs

- **Übergangsrelation statt Übergangsfunktion**
Statt einer Funktion $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow 2^Q$ kann man auch eine Relation $\Delta \subseteq Q \times \Sigma \times Q$ verwenden, wenn für alle $q, q' \in Q$, $\sigma \in \Sigma$ gilt:

$$q' \in \delta(q, \sigma) \quad \text{genau dann wenn} \quad \langle q, \sigma, q' \rangle \in \Delta$$

- **Einzelner Startzustand q_0**
Manchmal wird statt der Menge Q_0 nur ein Startzustand q_0 verwendet (es ist leicht, einen NFA unserer Bauart so zu verändern, dass nur ein Startzustand nötig ist)
- **Einzelner Endzustand q_f**
Man kann auch die Menge der Endzustände F leicht auf ein einziges Argument reduzieren

Ist Nichtdeterminismus sinnvoll?

Nichtdeterministische Automaten müssen jeweils den richtigen Übergang „erraten“

↪ entspricht nicht der Funktionsweise echter Computer

Dennoch ist Nichtdeterminismus ein wichtiges Prinzip in der Informatik:

- Kann **kompaktere, natürlichere Darstellungen** ermöglichen
- Beschreibt treffend die Schwierigkeit vieler praktischer Probleme – wichtig für **Untersuchung von Komplexität und Berechenbarkeit**
- Ist relevant in der **Modellierung parallel arbeitender Systeme**
- Bildet Ausgangspunkt für die **Entwicklung deterministischer Algorithmen**

Zusammenfassung und Ausblick

Das **Wortproblem** ist eine von mehreren wichtigen Fragestellungen zu formalen Sprachen

Deterministische endliche Automaten lösen das Wortproblem für reguläre Sprachen

(Bisher gezeigt: jede durch DFAs erkennbare Sprache ist regulär)

Nichtdeterminismus ermöglicht endlichen Automaten, bei der Worterkennung zu „raten“

Offene Fragen:

- Was bringen uns nichtdeterministische Automaten?
- Wir wollten noch zeigen: alle regulären Sprachen sind durch DFAs erkennbar – wie?
- Gibt es noch mehr Darstellungsformen für reguläre Sprachen?