

Grundlagen der Theoretischen Informatik

4. Kellerautomaten und kontextfreie Sprachen (V)

9.06.2021

Viorica Sofronie-Stokkermans

e-mail: sofronie@uni-koblenz.de

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

Bis jetzt

Kontextfreie Sprachen

Pushdown-Automaten (PDAs)

- Von PDA akzeptierte Sprache
 - über **finale Zustände**
 - über **leeren Keller**

Zu jedem PDA \mathcal{M}_1 existiert ein PDA \mathcal{M}_2 mit $L_f(\mathcal{M}_1) = L_l(\mathcal{M}_2)$

Zu jedem PDA \mathcal{M}_1 existiert ein PDA \mathcal{M}_2 mit $L_l(\mathcal{M}_1) = L_f(\mathcal{M}_2)$

- Gleichmächtigkeit: PDAs und cf-Grammatiken

Abschlusseigenschaften

Abschlusseigenschaften

Theorem (Abschlusseigenschaften von \mathcal{L}_2)

\mathcal{L}_2 ist abgeschlossen gegen:

- Vereinigung \cup
- Konkatenation \circ
- Kleene-Stern $*$

Abschlusseigenschaften

Theorem (Abschlusseigenschaften von \mathcal{L}_2)

\mathcal{L}_2 ist abgeschlossen gegen:

- Vereinigung \cup
- Konkatenation \circ
- Kleene-Stern $*$

Beweis

Seien

$$G_i = (V_i, T_i, R_i, S_i) \quad (i \in \{1, 2\})$$

zwei cf-Grammatiken mit $V_1 \cap V_2 = \emptyset$.

Sei

$$L_i = L(G_i)$$

Abschlusseigenschaften

Beweis (Forts.)

zu \cup :

$$(V_1 \cup V_2 \cup \{S_{neu}\}, T_1 \cup T_2, R_1 \cup R_2 \cup \{S_{neu} \rightarrow S_1 \mid S_2\}, S_{neu})$$

erzeugt $L_1 \cup L_2$

Abschlusseigenschaften

Beweis (Forts.)

zu \cup :

$(V_1 \cup V_2 \cup \{S_{neu}\}, T_1 \cup T_2, R_1 \cup R_2 \cup \{S_{neu} \rightarrow S_1 \mid S_2\}, S_{neu})$

erzeugt $L_1 \cup L_2$

$S_{neu} \Rightarrow^* w$ g.d.w. $S_{neu} \Rightarrow S_1 \Rightarrow^* w$ oder $S_{neu} \Rightarrow S_2 \Rightarrow^* w$
g.d.w. $S_1 \Rightarrow_{G_1}^* w$ oder $S_2 \Rightarrow_{G_2}^* w$
g.d.w. $w \in L(G_1)$ oder $w \in L(G_2)$
g.d.w. $w \in L(G_1) \cup L(G_2)$

Abschlusseigenschaften

Beweis (Forts.)

zu \circ :

$$(V_1 \cup V_2 \cup \{S_{neu}\}, T_1 \cup T_2, R_1 \cup R_2 \cup \{S_{neu} \rightarrow S_1 S_2\}, S_{neu})$$

erzeugt $L_1 \circ L_2$

Abschlusseigenschaften

Beweis (Forts.)

zu \circ :

$$(V_1 \cup V_2 \cup \{S_{neu}\}, T_1 \cup T_2, R_1 \cup R_2 \cup \{S_{neu} \rightarrow S_1 S_2\}, S_{neu})$$

erzeugt $L_1 \circ L_2$

$$\begin{array}{ll} S_{neu} \Rightarrow^* w & \text{g.d.w.} \quad S_{neu} \Rightarrow S_1 S_2 \Rightarrow^* w \\ & \text{g.d.w.} \quad \exists w_1, w_2 : w = w_1 w_2, S_1 \Rightarrow_{G_1}^* w_1 \text{ und } S_2 \Rightarrow_{G_2}^* w_2 \\ & \text{g.d.w.} \quad w \in L(G_1) \circ L(G_2) \end{array}$$

Abschlusseigenschaften

Beweis (Forts.)

zu *:

$$(V_1 \cup \{S_{neu}\}, T_1, R_1 \cup \{S_{neu} \rightarrow S_1 S_{neu} \mid \varepsilon\}, S_{neu})$$

erzeugt L_1^* . \square

Abschlusseigenschaften

Beweis (Forts.)

zu *:

$$(V_1 \cup \{S_{neu}\}, T_1, R_1 \cup \{S_{neu} \rightarrow S_1 S_{neu} \mid \varepsilon\}, S_{neu})$$

erzeugt L_1^* .

$S_{neu} \Rightarrow^* w$ g.d.w. \exists Rechtsableitung von w aus S_{neu}

g.d.w. $w = \varepsilon$ oder

$$\exists n : S_{neu} \Rightarrow^{n-1} S_1^{n-1} S_{neu} \Rightarrow \underbrace{S_1 \dots S_1}_n \Rightarrow^* w$$

g.d.w. $\exists n \in \mathbb{N}, \exists w_1, w_2, \dots, w_n : w = w_1 w_2 \dots w_n$ und

$S_1 \Rightarrow_{G_1}^* w_i$ für alle i mit $1 \leq i \leq n$

g.d.w. $w \in L(G_1)^*$ \square

Abschlusseigenschaften

Theorem (Abschlusseigenschaften von \mathcal{L}_2)

\mathcal{L}_2 ist **nicht** abgeschlossen gegen:

- Durchschnitt \cap
- Komplement \neg

Abschlusseigenschaften

Beweis Zu „ \cap “:

$$L_1 = \{a^n b^n c^m \mid n, m \in \mathbb{N}_+\}$$

$$L_2 = \{a^m b^n c^n \mid n, m \in \mathbb{N}_+\}$$

wird erzeugt von $G_i = (\{S, S', T\}, \{a, b, c\}, R_i, S)$ mit

$$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow S' T \\ S' \rightarrow a S' b \mid ab \\ T \rightarrow c T \mid c \end{array} \right\}$$

$$R_2 = \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow T S' \\ S' \rightarrow b S' c \mid bc \\ T \rightarrow a T \mid a \end{array} \right\}$$

Sowohl L_1 als auch L_2 sind cf, **nicht** aber $L_1 \cap L_2 = \{a^n b^n c^n \mid n \in \mathbb{N}\}$.

Abschlusseigenschaften

Beweis Zu „ \neg “:

Angenommen, \mathcal{L}_2 wäre abgeschlossen gegen \neg .

Wegen

$$L_1 \cap L_2 = \neg(\neg L_1 \cup \neg L_2)$$

wäre \mathcal{L}_2 dann auch abgeschlossen gegen \cap – **Widerspruch** \square

Wortprobleme

Wortprobleme

Problem

Gegeben: eine cf-Grammatik G , so dass $L(G)$ eine Sprache ist über Σ , und ein Wort $w \in \Sigma^*$

Frage: Ist $w \in L(G)$?

Wortproblem

Lösung des Wortproblems für \mathcal{L}_3

Gegeben eine rechtslineare Grammatik G , so dass $L(G)$ eine Sprache ist über Σ , und ein Wort $w \in \Sigma^*$.

- Konstruiere aus G einen ε -NDEA A_1 .
- Konstruiere aus A_1 einen NDEA A_2 .
- Konstruiere aus A_2 einen DEA A_3 .
- Probiere aus, ob A_3 das Wort w akzeptiert.

Dazu braucht der Automat A_3 genau $|w|$ Schritte.

Wortproblem

Das Wortproblem für \mathcal{L}_2

- Zu jeder cf-Grammatik G kann man einen PDA konstruieren
- Aber ein Pushdown-Automat kann ε -Übergänge machen, in denen er das Wort nicht weiter liest.
- **Wie kann man dann garantieren, dass der Automat in endlich vielen Schritten das Wort w zu Ende gelesen hat?**
- Deshalb: verwende anderes Verfahren:
Cocke-Younger-Kasami-Algorithmus (CYK-Algorithmus)
Auch: Chart-Parsing

Chart-Parsing

Gegeben: Ein Wort

$$w = a_1 \dots a_n$$

Idee

- Prinzip der dynamischen Programmierung
- 1.: Ermittle woraus sich die einstelligen Teilworte ableiten lassen
- 2.: Ermittle woraus sich die zweistelligen Teilworte ableiten lassen
- ...
- n .: Ermittle woraus sich die n -stelligen Teilworte (w selbst) ableiten lassen

Chart-Parsing

Beispiel: Die Grammatik $G = (\{S\}, \{a, b\}, R, S)$ mit

$$R = \{ S \rightarrow aSa \mid bSb \mid aa \mid bb \}$$

erzeugt die Sprache $\{vv^R \mid v \in \{a, b\}^+\}$

Betrachten wir das Wort $w = abbaabba$.

Was sind mögliche letzte Schritte von Ableitungen, die zu w geführt haben können?

Wir merken uns alle möglichen einzelnen Ableitungsschritte in einem Chart, um Mehrfacharbeit zu vermeiden.

Wenn das Wort w in der Sprache $L(G)$ ist, enthält der Chart am Ende eine mit S markierte Kante, die vom ersten bis zum letzten Knoten reicht.

Chart-Parsing

Beispiel (Forts.)

$$R = \{ S \rightarrow aSa \mid bSb \mid aa \mid bb \}$$

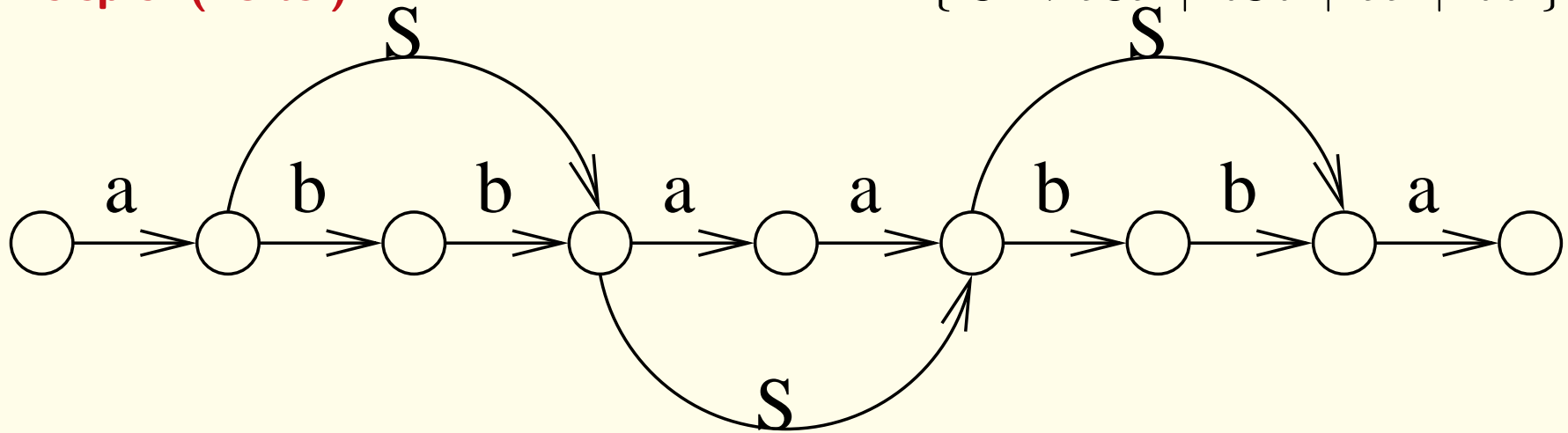


Chart-Parsing

Beispiel (Forts.)

$$R = \{ S \rightarrow aSa \mid bSb \mid aa \mid bb \}$$

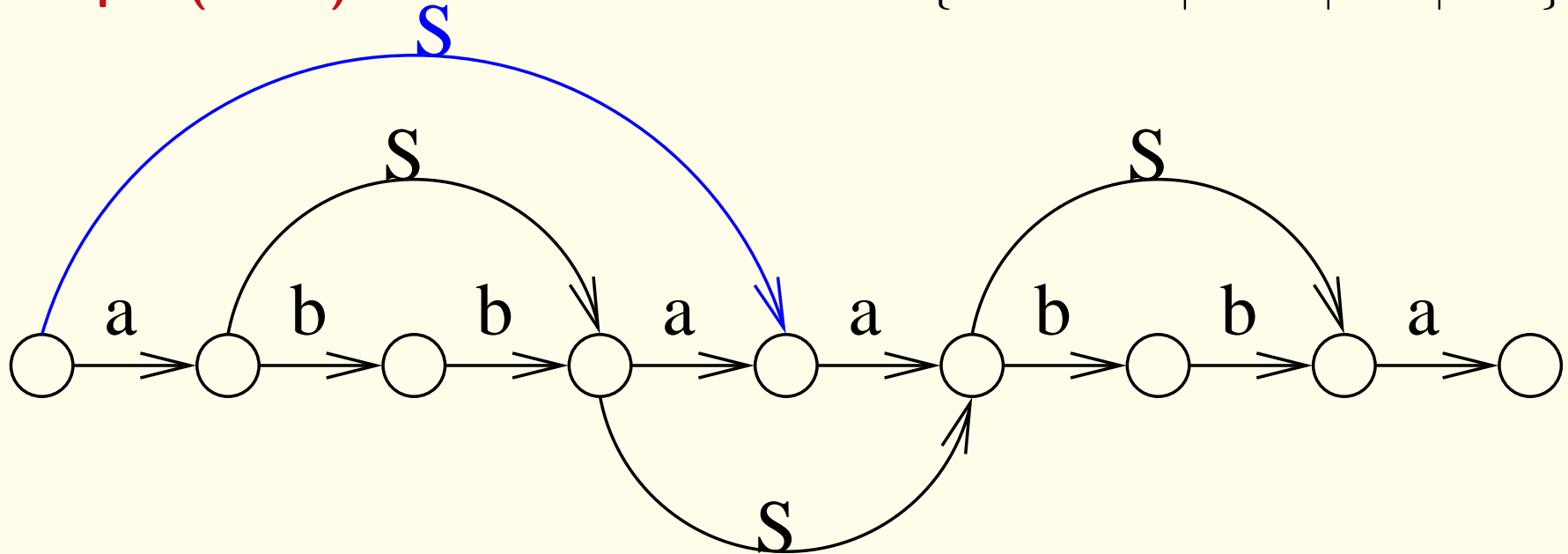


Chart-Parsing

Beispiel (Forts.)

$$R = \{ S \rightarrow aSa \mid bSb \mid aa \mid bb \}$$

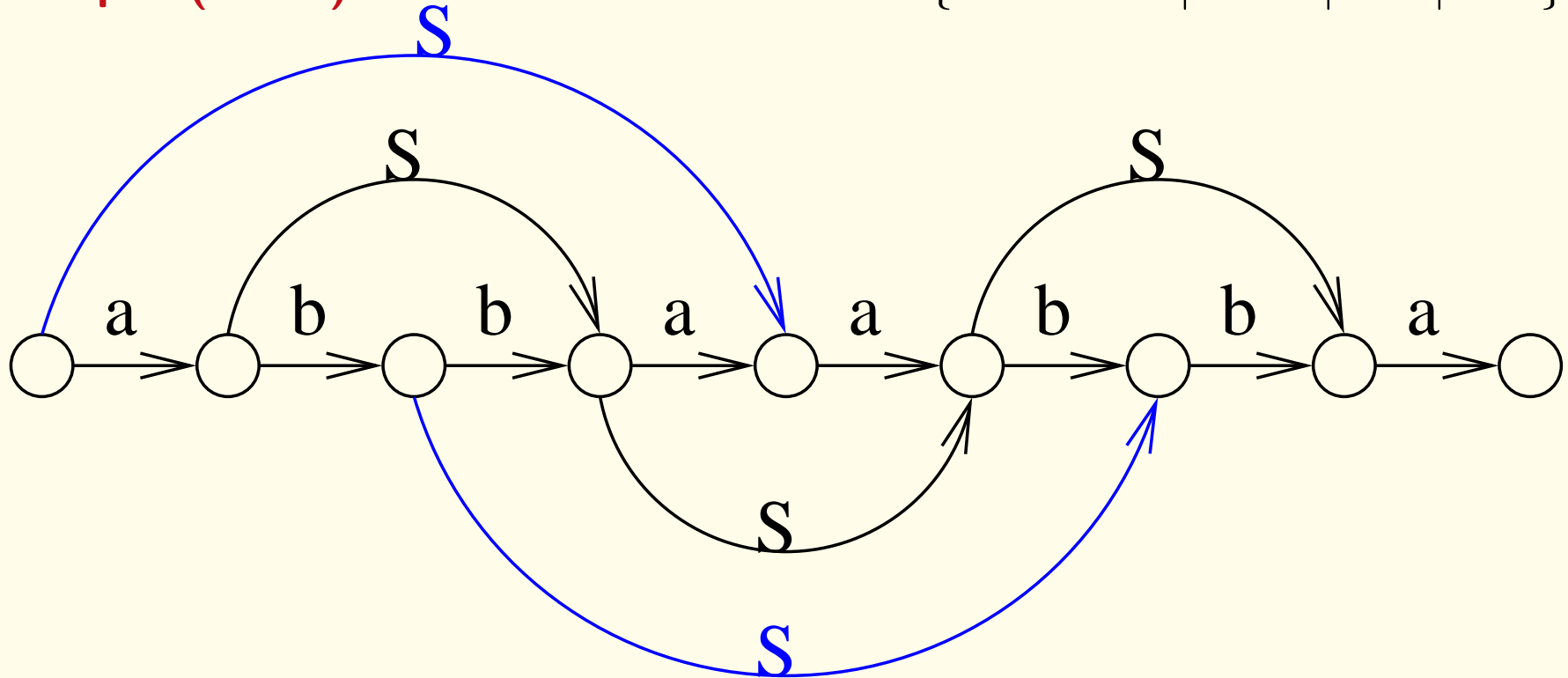


Chart-Parsing

Beispiel (Forts.)

$$R = \{ S \rightarrow aSa \mid bSb \mid aa \mid bb \}$$

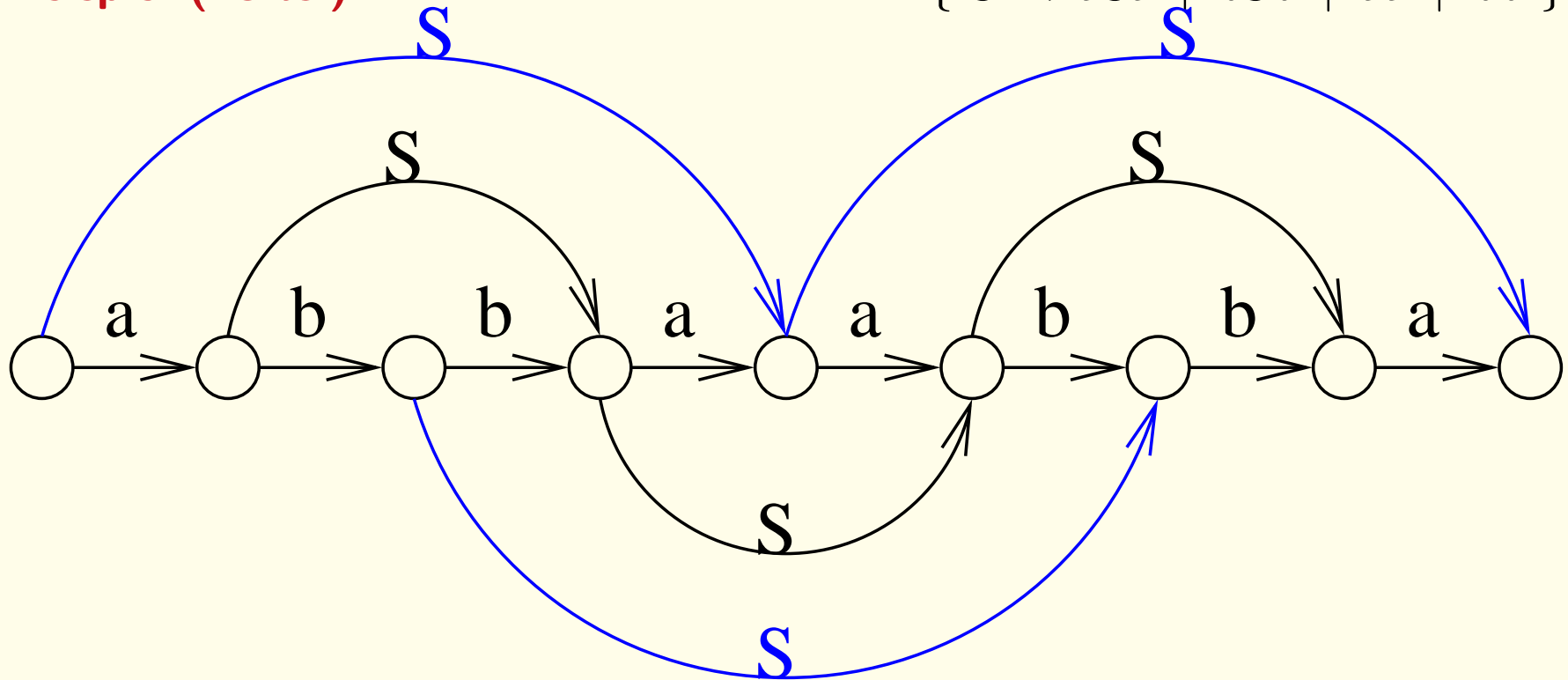


Chart-Parsing

Beispiel (Forts.)

$$R = \{ S \rightarrow aSa \mid bSb \mid aa \mid bb \}$$

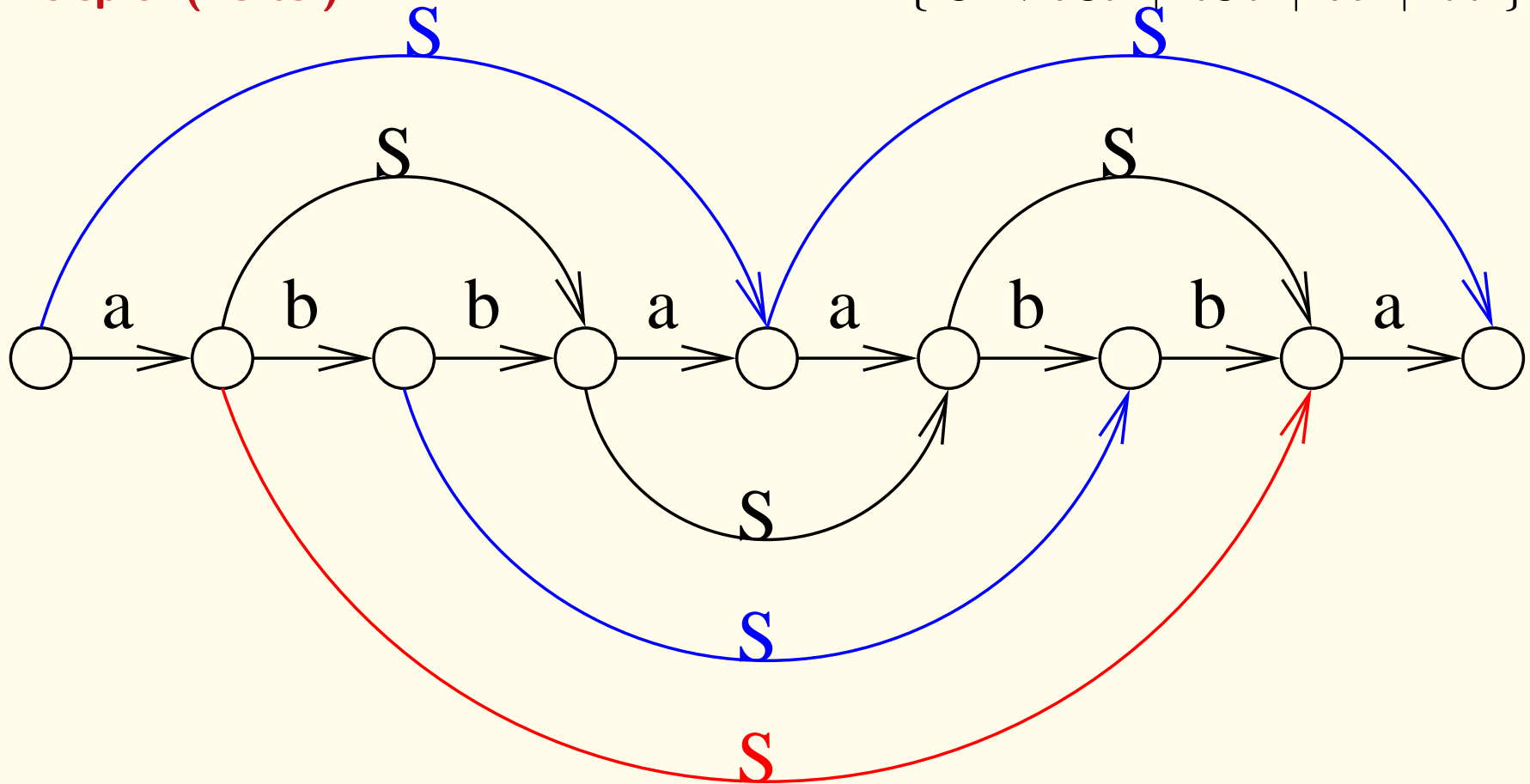


Chart-Parsing

Beispiel (Forts.)

$$R = \{ S \rightarrow aSa \mid bSb \mid aa \mid bb \}$$

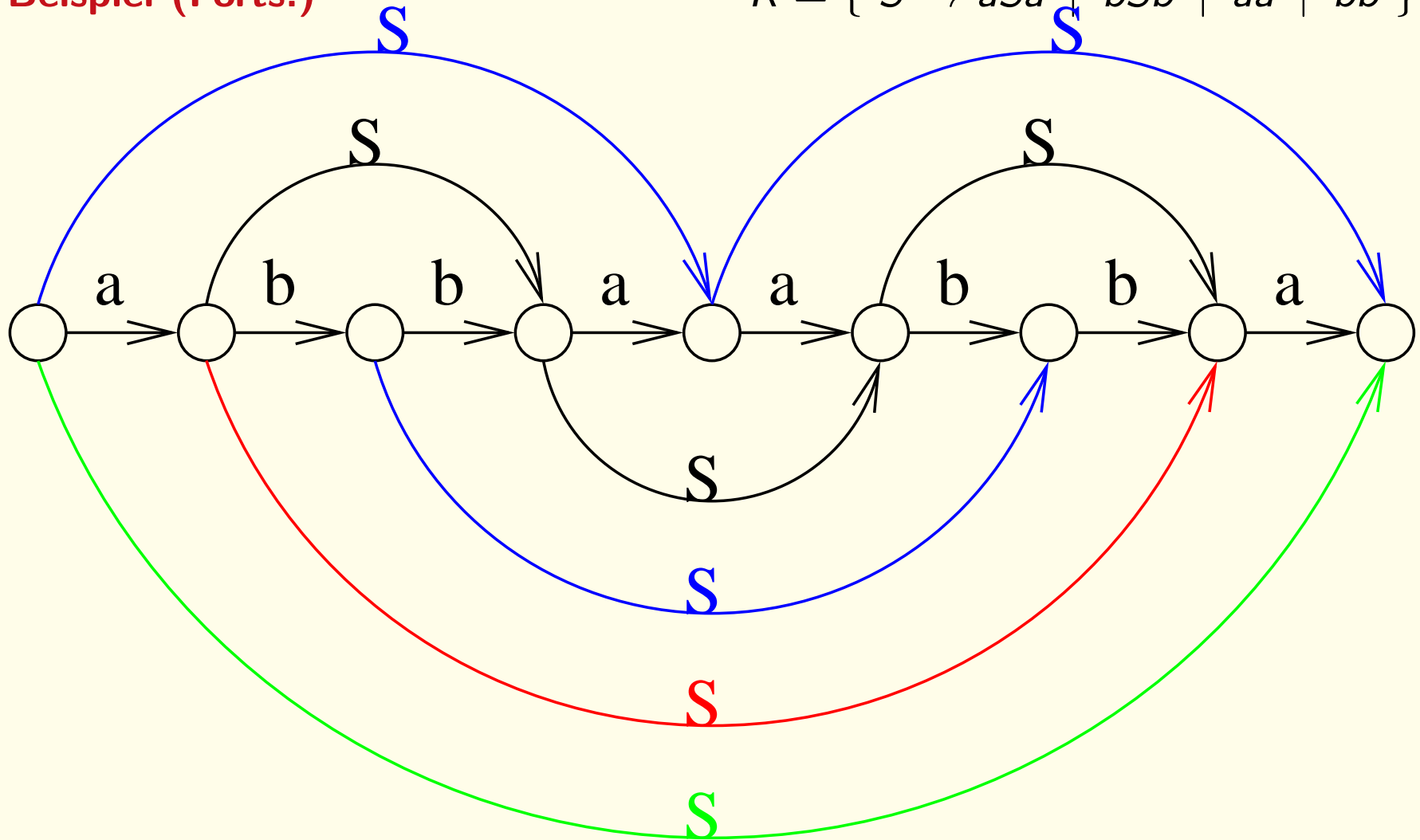


Chart-Parsing

Zur Vereinfachung

Wir fordern: Grammatik ist in **Chomsky-Normalform**

Dann:

Immer nur **zwei** benachbarte Kanten betrachten, um herauszufinden, ob darüber eine neue Kante eingefügt werden kann.

Chart-Parsing

Beispiel (Forts.) Grammatik in CNF, die dieselbe Sprache wie oben erzeugt:

$G = (\{S, S_a, S_b, A, B\}, \{a, b\}, R, S)$ mit

$$R = \{ \begin{array}{l} S \rightarrow AS_a \mid BS_b \mid AA \mid BB \\ S_a \rightarrow SA \\ S_b \rightarrow SB \\ A \rightarrow a \\ B \rightarrow b \end{array} \}$$

Chart-Parsing

Beispiel (Forts.) Grammatik in CNF, die dieselbe Sprache wie oben erzeugt:

$G = (\{S, S_a, S_b, A, B\}, \{a, b\}, R, S)$ mit

$$R = \{ S \rightarrow AS_a \mid BS_b \mid AA \mid BB$$

$$S_a \rightarrow SA$$

$$S_b \rightarrow SB$$

$$A \rightarrow a$$

$$B \rightarrow b\}$$

12345678

abbaabba

Chart-Parsing

Beispiel (Forts.) Grammatik in CNF, die dieselbe Sprache wie oben erzeugt:

$G = (\{S, S_a, S_b, A, B\}, \{a, b\}, R, S)$ mit

$$R = \{ S \rightarrow AS_a \mid BS_b \mid AA \mid BB$$

$$S_a \rightarrow SA$$

$$S_b \rightarrow SB$$

$$A \rightarrow a$$

$$B \rightarrow b\}$$

1 2 3 4 5 6 7 8

abbaabba

ABBAABBA

Chart-Parsing

Beispiel (Forts.) Grammatik in CNF, die dieselbe Sprache wie oben erzeugt:

$G = (\{S, S_a, S_b, A, B\}, \{a, b\}, R, S)$ mit

$$R = \{ S \rightarrow AS_a \mid BS_b \mid AA \mid BB$$

$$S_a \rightarrow SA$$

$$S_b \rightarrow SB$$

$$A \rightarrow a$$

$$B \rightarrow b\}$$

1 2 3 4 5 6 7 8

abbaabba

ABBAABBA

S S S

Chart-Parsing

Darstellung als Array

Für eine Kante, die den i . bis j . Buchstaben überspannt und mit A markiert ist, steht im $[i, j]$ -Element des Arrays die Eintragung A .

Definition ($M * N$)

Sei $L = L(G)$ kontextfrei, und $G = (V, T, R, S)$ in Chomsky-Normalform.

Mit $M, N \subseteq V$ sei

$$M * N := \{A \in V \mid \exists B \in M, \exists C \in N : A \rightarrow BC \in R\}$$

Chart-Parsing

Definition ($w_{i,j}$, $V_{i,j}$)

Sei $w = a_1 \dots a_n$ mit $a_i \in \Sigma$.

Dann:

- $w_{i,j} := a_i \dots a_j$ ist das Fragment von w vom i -ten bis zum j -ten Buchstaben
- $V_{i,j} := \{A \in V \mid A \Longrightarrow_G^* w_{i,j}\}$

Chart-Parsing

Sei $w = a_1 \dots a_n$, $a_i \in \Sigma$, d.h. $|w| = n$. Dann gilt:

1. $V_{i,i} = \{A \in V \mid A \rightarrow a_i \in R\}$

2. $V_{i,k} = \bigcup_{j=i}^{k-1} V_{i,j} * V_{j+1,k}$ für $1 \leq i < k \leq n$

Beachte:

Die Grammatik muss in Chomsky-Normalform sein!

Chart-Parsing

Beweis.

1. $V_{i,i} = \{A \in V \mid A \Longrightarrow_G^* a_i\} = \{A \in V \mid A \rightarrow a_i \in R\}$, da G in CNF ist.

$A \in V_{i,k}$ mit $1 \leq i < k \leq n$

gdw $A \Longrightarrow_G^* a_i \dots a_k$

gdw $\exists j, i \leq j < k : \exists B, C \in V : A \Longrightarrow BC$, und

$B \Longrightarrow_G^* w_{i,j} \neq \varepsilon$

und $C \Longrightarrow_G^* w_{j+1,k} \neq \varepsilon$ (da G in CNF ist)

gdw $\exists j, i \leq j < k : \exists B, C \in V : A \Longrightarrow BC$

und $B \in V_{i,j}$ und $C \in V_{j+1,k}$

2. gdw $\exists j, i \leq j < k : A \in V_{i,j} * V_{j+1,k}$

CYK-Algorithmus (Cocke-Younger-Kasami)

Algorithmus

Input sei eine Grammatik G in CNF und ein Wort $w = a_1 \dots a_n \in \Sigma^*$.

(i) **for** $i := 1$ **to** n **do** / * Regeln $A \rightarrow a$ eintragen * /

$$V_{i,i} := \{A \in V \mid A \rightarrow a_i \in R\}$$

(ii) **for** $h := 1$ **to** $n - 1$ **do**

for $i := 1$ **to** $n - h$ **do**

$$V_{i,i+h} = \bigcup_{j=i}^{i+h-1} V_{i,j} * V_{j+1,i+h}$$

(iii) **if** $S \in V_{1,n}$ **then return** Ausgabe $w \in L(G)$

else return Ausgabe $w \notin L(G)$

CYK-Algorithmus (Cocke-Younger-Kasami)

Beispiel:

$G = (\{S, A, B\}, \{a, b\}, R, S)$ mit

$R : S \rightarrow AB \mid BC$

$A \rightarrow BA \mid a$

$B \rightarrow CC \mid b$

$C \rightarrow AB \mid a$

An der Tafel

<http://uni-koblenz.de/~sofronie/gti-ss-2019/slides/example-CYK.pdf>

CYK-Algorithmus (Cocke-Younger-Kasami)

Eigenschaften

Für Wörter der Länge $|w| = n$ entscheidet der CYK-Algorithmus in der Größenordnung von n^3 Schritten, ob $w \in L(G)$ ist.

CYK-Algorithmus (Cocke-Younger-Kasami)

Beispiel.

Grammatik in CNF $G = (\{S, A, B, C\}, \{a, b, c\}, R, S)$

$$R = \{ \begin{array}{l} S \rightarrow BA \mid BS, \\ A \rightarrow a \mid CA \mid AC \mid BB, \\ B \rightarrow c \mid CC \mid CB, \\ C \rightarrow b \mid BA \end{array} \}$$

Beispiel an der Tafel.

Gegeben sei die Grammatik $G = (\{S, A, B, C\}, \{a, b, c\}, R, S)$ mit

$$R = \{S \rightarrow BA \mid BS, \\ A \rightarrow a \mid CA \mid AC \mid BB, \\ B \rightarrow c \mid CC \mid CB, \\ C \rightarrow b \mid BA\}$$

Entscheiden Sie mithilfe des Cocke-Younger-Kasami-Algorithmus, ob $w = bbca \in L(G)$ gilt.
Vervollständigen Sie dazu die unten angegebene Tabelle:

| | | j \ i | | | |
|---|---|-----------|-----------|--------|-----|
| | | b | b | c | a |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| b | 1 | {c} | | | |
| b | 2 | {B} | {c} | | |
| c | 3 | {A, B} | {B} | {B} | |
| a | 4 | {B, C, S} | {B, C, S} | {C, S} | {A} |

Da $S \in V_{1,4}$, gilt $w \in L(G)$.

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

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