

6b

Der CYK-Algorithmus

Prof. Dr. Jasmin Blanchette

Lehr- und Forschungseinheit für
Theoretische Informatik und Theorembeweisen

Stand: 8. April 2025
Basierend auf Folien von PD Dr. David Sabel



Wiederholung: Entscheidbarkeit

Definition

Eine Sprache L ist **entscheidbar**, wenn es einen Algorithmus gibt, der bei Eingabe eines Wortes w in endlicher Zeit feststellt, ob $w \in L$ gilt oder nicht.

Wortproblem für Typ 2-Grammatiken

Definition

Das **Wortproblem** für Typ i -Grammatiken ist die Frage, ob für eine gegebene Typ i -Grammatik $G = (V, \Sigma, P, S)$ und ein Wort $w \in \Sigma^*$ $w \in L(G)$ gilt oder nicht.

Wortproblem für Typ 2-Grammatiken

Definition

Das **Wortproblem** für Typ i -Grammatiken ist die Frage, ob für eine gegebene Typ i -Grammatik $G = (V, \Sigma, P, S)$ und ein Wort $w \in \Sigma^*$ $w \in L(G)$ gilt oder nicht.

Satz

Das Wortproblem für Typ 2-Grammatiken ist entscheidbar:

Es gibt einen Algorithmus, der bei Eingabe von Typ 2-Grammatik G und Wort w nach endlicher Zeit entscheidet, ob $w \in L(G)$ gilt oder nicht. Zudem entscheidet er das Wortproblem in Polynomialzeit.

Grundgedanke des Algorithmus

Der **CYK-Algorithmus** von Cocke, Younger und Kasami ist ein Polynomialzeitalgorithmus für das Wortproblem für Typ 2-Grammatiken.

Grundgedanke des Algorithmus

Der **CYK-Algorithmus** von Cocke, Younger und Kasami ist ein Polynomialzeitalgorithmus für das Wortproblem für Typ 2-Grammatiken.

Eingabe: Eine CFG $G = (V, \Sigma, P, S)$ in Chomsky-Normalform und ein Wort $w \in \Sigma^+$.

Grundgedanke des Algorithmus

Der **CYK-Algorithmus** von Cocke, Younger und Kasami ist ein Polynomialzeitalgorithmus für das Wortproblem für Typ 2-Grammatiken.

Eingabe: Eine CFG $G = (V, \Sigma, P, S)$ in Chomsky-Normalform und ein Wort $w \in \Sigma^+$.

G ist in **Chomsky-Normalform**, wenn für jede Produktion $A \rightarrow w \in P$ gilt:
 $w = a \in \Sigma$ oder $w = BC$ mit $B, C \in V$.

Für jede CFG G mit $\varepsilon \notin L(G)$ kann eine Chomsky-Normalform G' mit $L(G') = L(G)$ berechnet werden.

Grundgedanke des Algorithmus

Der **CYK-Algorithmus** von Cocke, Younger und Kasami ist ein Polynomialzeitalgorithmus für das Wortproblem für Typ 2-Grammatiken.

Eingabe: Eine CFG $G = (V, \Sigma, P, S)$ in Chomsky-Normalform und ein Wort $w \in \Sigma^+$.

G ist in **Chomsky-Normalform**, wenn für jede Produktion $A \rightarrow w \in P$ gilt:
 $w = a \in \Sigma$ oder $w = BC$ mit $B, C \in V$.

Für jede CFG G mit $\varepsilon \notin L(G)$ kann eine Chomsky-Normalform G' mit $L(G') = L(G)$ berechnet werden.

Ausgabe: **ja**, wenn $w \in L(G)$, sonst **nein**.

Grundgedanke des Algorithmus

Der **CYK-Algorithmus** von Cocke, Younger und Kasami ist ein Polynomialzeitalgorithmus für das Wortproblem für Typ 2-Grammatiken.

Eingabe: Eine CFG $G = (V, \Sigma, P, S)$ in Chomsky-Normalform und ein Wort $w \in \Sigma^+$.

G ist in **Chomsky-Normalform**, wenn für jede Produktion $A \rightarrow w \in P$ gilt:
 $w = a \in \Sigma$ oder $w = BC$ mit $B, C \in V$.

Für jede CFG G mit $\varepsilon \notin L(G)$ kann eine Chomsky-Normalform G' mit $L(G') = L(G)$ berechnet werden.

Ausgabe: **ja**, wenn $w \in L(G)$, sonst **nein**.

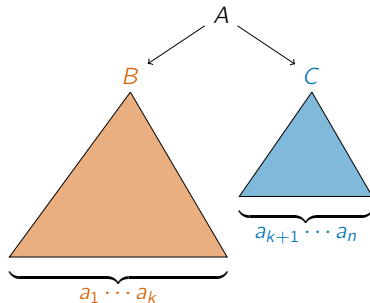
Grober Ansatz:

1. Teste für jede Variable A und Teilwort u von w , ob sie es erzeugt.
2. Verwende Test zum Prüfen, ob das Startsymbol S das Wort w erzeugt.

Grundgedanke des CYK-Algorithmus

Prüfe, ob $A \in V$ ein Wort $u = a_1 \cdots a_n$ ($n \geq 1$) erzeugt:

- ▶ Wenn $u = a_1 \in \Sigma$, dann prüfe ob $A \rightarrow a_1 \in P$.
- ▶ Anderenfalls ($n > 1$) kann u nur erzeugt werden, wenn
 - ▶ es eine Produktion $A \rightarrow BC \in P$ gibt und
 - ▶ es einen Index $1 \leq k < n$ gibt, sodass
 B erzeugt $a_1 \cdots a_k$ und
 C erzeugt $a_{k+1} \cdots a_n$.



- ▶ Daher prüfe für **alle** $A \rightarrow BC \in P$ und **alle** k mit $1 \leq k < n$ **rekursiv**, ob B das Wort $a_1 \cdots a_k$ und C das Wort $a_{k+1} \cdots a_n$ erzeugt.

Beispiel für naives rekursives Suchen

Seien die CFG $G = (V, \Sigma, P, S)$ mit

$$P = \{ S \rightarrow AB \mid BA, \\ A \rightarrow AA \mid AB \mid a, \\ B \rightarrow BB \mid b$$

und das Wort *bbbaab*.

Beispiel für naives rekursives Suchen

Seien die CFG $G = (V, \Sigma, P, S)$ mit

$$P = \{S \rightarrow AB \mid BA, \\ A \rightarrow AA \mid AB \mid a, \\ B \rightarrow BB \mid b\}$$

und das Wort $bbbaab$.

S erzeugt $bbbaab$, denn $S \rightarrow BA \in P$ und

- ▶ B erzeugt bbb , denn $B \rightarrow BB \in P$ und
 - ▶ B erzeugt bb , denn $B \rightarrow BB \in P$ und
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$
- ▶ A erzeugt aab , denn $A \rightarrow AB \in P$ und
 - ▶ A erzeugt aa , denn $A \rightarrow AA \in P$ und
 - ▶ A erzeugt a , denn $A \rightarrow a \in P$ und
 - ▶ A erzeugt a , denn $A \rightarrow a \in P$
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$.

Beispiel für naives rekursives Suchen

Seien die CFG $G = (V, \Sigma, P, S)$ mit

$$P = \{S \rightarrow AB \mid BA, \\ A \rightarrow AA \mid AB \mid a, \\ B \rightarrow BB \mid b\}$$

und das Wort $bbbaab$.

S erzeugt $bbbaab$, denn $S \rightarrow BA \in P$ und

- ▶ B erzeugt bbb , denn $B \rightarrow BB \in P$ und
 - ▶ B erzeugt bb , denn $B \rightarrow BB \in P$ und
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$
- ▶ A erzeugt aab , denn $A \rightarrow AB \in P$ und
 - ▶ A erzeugt aa , denn $A \rightarrow AA \in P$ und
 - ▶ A erzeugt a , denn $A \rightarrow a \in P$
 - ▶ A erzeugt a , denn $A \rightarrow a \in P$
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$.

Beispiel für naives rekursives Suchen

Seien die CFG $G = (V, \Sigma, P, S)$ mit

$$P = \{S \rightarrow AB \mid BA, \\ A \rightarrow AA \mid AB \mid a, \\ B \rightarrow BB \mid b\}$$

und das Wort $bbbaab$.

S erzeugt $bbbaab$, denn $S \rightarrow BA \in P$ und

- ▶ B erzeugt bbb , denn $B \rightarrow BB \in P$ und
 - ▶ B erzeugt bb , denn $B \rightarrow BB \in P$ und
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$
- ▶ A erzeugt aab , denn $A \rightarrow AB \in P$ und
 - ▶ A erzeugt aa , denn $A \rightarrow AA \in P$ und
 - ▶ A erzeugt a , denn $A \rightarrow a \in P$ und
 - ▶ A erzeugt a , denn $A \rightarrow a \in P$
 - ▶ B erzeugt b , denn $B \rightarrow b \in P$.

Um an Effizienz zu gewinnen:

Statt Rekursion verwende **dynamische Programmierung**.

Grundgedanke des CYK-Algorithmus

Der Algorithmus berechnet Mengen $V(i, j) \subseteq V$, sodass

$$V(i, j) := \{A \in V \mid A \Rightarrow^* a_i \cdots a_{i+j-1}\}$$

Informell: $V(i, j)$ enthält alle Variablen $A \in V$, die $a_i \cdots a_{i+j-1}$ (= das Teilwort von w ab Position i mit Länge j) erzeugen.

Grundgedanke des CYK-Algorithmus

Der Algorithmus berechnet Mengen $V(i, j) \subseteq V$, sodass

$$V(i, j) := \{A \in V \mid A \Rightarrow^* a_i \cdots a_{i+j-1}\}$$

Informell: $V(i, j)$ enthält alle Variablen $A \in V$, die $a_i \cdots a_{i+j-1}$ (= das Teilwort von w ab Position i mit Länge j) erzeugen.

Schritte:

1. Beginne mit $V(i, 1) = \{A \mid A \rightarrow a_i \in P\}$.

Grundgedanke des CYK-Algorithmus

Der Algorithmus berechnet Mengen $V(i, j) \subseteq V$, sodass

$$V(i, j) := \{A \in V \mid A \Rightarrow^* a_i \cdots a_{i+j-1}\}$$

Informell: $V(i, j)$ enthält alle Variablen $A \in V$, die $a_i \cdots a_{i+j-1}$ (= das Teilwort von w ab Position i mit Länge j) erzeugen.

Schritte:

1. Beginne mit $V(i, 1) = \{A \mid A \rightarrow a_i \in P\}$.
2. Berechne $V(i, j)$ für $j = 2$ bis n . Für $j > 1$ gilt:

$$A \in V(i, j) \text{ g.d.w. es gibt } k \in \{1, 2, \dots, j-1\}, \text{ sodass} \\ A \rightarrow BC \in P, B \in V(i, k) \text{ und } C \in V(i+k, j-k)$$

Grundgedanke des CYK-Algorithmus

Der Algorithmus berechnet Mengen $V(i, j) \subseteq V$, sodass

$$V(i, j) := \{A \in V \mid A \Rightarrow^* a_i \cdots a_{i+j-1}\}$$

Informell: $V(i, j)$ enthält alle Variablen $A \in V$, die $a_i \cdots a_{i+j-1}$ (= das Teilwort von w ab Position i mit Länge j) erzeugen.

Schritte:

1. Beginne mit $V(i, 1) = \{A \mid A \rightarrow a_i \in P\}$.
2. Berechne $V(i, j)$ für $j = 2$ bis n . Für $j > 1$ gilt:

$$A \in V(i, j) \text{ g.d.w. es gibt } k \in \{1, 2, \dots, j-1\}, \text{ sodass} \\ A \rightarrow BC \in P, B \in V(i, k) \text{ und } C \in V(i+k, j-k)$$

3. Prüfe, ob $S \in V(1, n)$.

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i,j)$		1	2	3	4	5
j $\downarrow$	1					
	2					
	3					
	4					
	5					

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B				
	2					
	3					
	4					
	5					
j						

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B			
	2					
	3					
	4					
	5					
j						

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D		
	2					
	3					
	4					
	5					
j						

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	
	2					
	3					
	4					
	5					
j						

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, \textcolor{brown}{C} \rightarrow \textcolor{brown}{c}, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	B	B	D	D	C
	2					
	3					
	4					
	5					

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i,j)$	1	2	3	4	5
j ↓	1	B	B	D	D	C
	2					
	3					
	4					
	5					

2. Schritt:

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i,j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	B	B	D	D	C
	2					
	3					
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 2, i = 1, k = 1: V(1, 2) := V(1, 2) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 1), \\ C \in V(2, 1) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
j	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3					
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 2, i = 2, k = 1: V(2, 2) := V(2, 2) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 1), \\ C \in V(3, 1) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3					
	4					
	5					
j						

2. Schritt: $j = 2, i = 3, k = 1: V(3, 2) := V(3, 2) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(3, 1), \\ C \in V(4, 1) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3					
	4					
	5					
j						

2. Schritt: $j = 2, i = 4, k = 1: V(4, 2) := V(4, 2) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(4, 1), \\ C \in V(5, 1) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
j	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3					
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 3, i = 1, k = 1: V(1, 3) := V(1, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 1), \\ C \in V(2, 2) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3					
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 3, i = 1, k = 2: V(1, 3) := V(1, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 2), \\ C \in V(3, 1) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3					
	4					
	5					
j						

2. Schritt: $j = 3, i = 2, k = 1: V(2, 3) := V(2, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 1), \\ C \in V(3, 2) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4					
	5					
j						

2. Schritt: $j = 3, i = 2, k = 2: V(2, 3) := V(2, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 2), \\ C \in V(4, 1) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4					
	5					
j						

2. Schritt: $j = 3, i = 3, k = 1: V(3, 3) := V(3, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(3, 1), \\ C \in V(4, 2) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 3, i = 3, k = 2: V(3, 3) := V(3, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(3, 2), \\ C \in V(5, 1) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i,j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 1, k = 1: V(1, 4) := V(1, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 1), \\ C \in V(2, 3) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 1, k = 2: V(1, 4) := V(1, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 2), \\ C \in V(3, 2) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
j	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 1, k = 3$: $V(1, 4) := V(1, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 3), \\ C \in V(4, 1) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = b b d d c$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 2, k = 1: V(2, 4) := V(2, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 1), \\ C \in V(3, 3) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbd dc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5					
j						

2. Schritt: $j = 4, i = 2, k = 2: V(2, 4) := V(2, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 2), \\ C \in V(4, 2) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = b b d d c$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 2, k = 3: V(2, 4) := V(2, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 3), \\ C \in V(5, 1) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = b b d d c$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i,j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5					

2. Schritt: $j = 5, i = 1, k = 1: V(1,5) := V(1,5) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1,1), \\ C \in V(2,4) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = b b d d c$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
j	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5					

2. Schritt: $j = 5, i = 1, k = 2: V(1, 5) := V(1, 5) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 2), \\ C \in V(3, 3) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = b b d d c$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5					

2. Schritt: $j = 5, i = 1, k = 3$: $V(1, 5) := V(1, 5) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 3), \\ C \in V(4, 2) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = bbd dc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5	S				

2. Schritt: $j = 5, i = 1, k = 4: V(1, 5) := V(1, 5) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 4), \\ C \in V(5, 1) \end{array} \right\}$

Beispiel für den CYK-Algorithmus

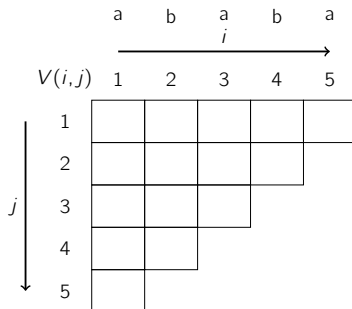
Seien $w = bbddc$ und $G = (\{S, A, B, C, D, E\}, \{b, c, d\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow AC, A \rightarrow BE, A \rightarrow BD, E \rightarrow AD, C \rightarrow c, B \rightarrow b, D \rightarrow d\}$.

		b	b	d	d	c
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i,j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	B	B	D	D	C
	2		A			
	3		E			
	4	A				
	5	S				

3. Schritt: Da $S \in V(1, 5)$, gilt $w \in L(G)$.

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.



1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	T				
	2					
	3					
	4					
	5					

j ↓

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	T	U			
	2					
	3					
	4					
	5					

j ↓

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
				i		
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
j	1	T	U	T		
	2					
	3					
	4					
	5					

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	
	2					
	3					
	4					
	5					

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
				i		
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
	1	T	U	T	U	T
	2					
	3					
	4					
	5					

j

1. Schritt: Füllen der $V(i, 1)$ -Einträge

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2					
	3					
	4					
	5					

2. Schritt:

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
j	1	T	U	T	U	T
	2	S, T				
	3					
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 2, i = 1, k = 1: V(1, 2) := V(1, 2) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 1), \\ C \in V(2, 1) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S			
	3					
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 2, i = 2, k = 1: V(2, 2) := V(2, 2) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 1), \\ C \in V(3, 1) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i,j)$		1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T		
	3					
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 2, i = 3, k = 1: V(3, 2) := V(3, 2) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(3, 1), \\ C \in V(4, 1) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3					
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 2, i = 4, k = 1: V(4, 2) := V(4, 2) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(4, 1), \\ C \in V(5, 1) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i,j)$	1	2	3	4	5
j	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3					
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 3, i = 1, k = 1: V(1, 3) := V(1, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 1), \\ C \in V(2, 2) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
1		T	U	T	U	T
2		S, T	S	S, T	S	
3		T				
4						
5						

2. Schritt: $j = 3, i = 1, k = 2: V(1, 3) := V(1, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 2), \\ C \in V(3, 1) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S			
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 3, i = 2, k = 1: V(2, 3) := V(2, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 1), \\ C \in V(3, 2) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S			
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 3, i = 2, k = 2$: $V(2, 3) := V(2, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 2), \\ C \in V(4, 1) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
j	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S			
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 3, i = 3, k = 1: V(3, 3) := V(3, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(3, 1), \\ C \in V(4, 2) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
j	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 3, i = 3, k = 2: V(3, 3) := V(3, 3) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(3, 2), \\ C \in V(5, 1) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i,j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4					
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 1, k = 1$: $V(1, 4) := V(1, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 1), \\ C \in V(2, 3) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4	T				
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 1, k = 2$: $V(1, 4) := V(1, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 2), \\ C \in V(3, 2) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
j	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4	S, T				
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 1, k = 3$: $V(1, 4) := V(1, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 3), \\ C \in V(4, 1) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4	S, T	S			
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 2, k = 1: V(2, 4) := V(2, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 1), \\ C \in V(3, 3) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4	S, T	S			
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 2, k = 2$: $V(2, 4) := V(2, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 2), \\ C \in V(4, 2) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4	S, T	S			
	5					

2. Schritt: $j = 4, i = 2, k = 3$: $V(2, 4) := V(2, 4) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(2, 3), \\ C \in V(5, 1) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i, j)$		1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4	S, T	S			
	5					

2. Schritt: $j = 5, i = 1, k = 1$: $V(1, 5) := V(1, 5) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 1), \\ C \in V(2, 4) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i,j)$		1	2	3	4	5
j	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4	S, T	S			
	5	T				

2. Schritt: $j = 5, i = 1, k = 2: V(1, 5) := V(1, 5) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 2), \\ C \in V(3, 3) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4	S, T	S			
	5	T				

2. Schritt: $j = 5, i = 1, k = 3: V(1, 5) := V(1, 5) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 3), \\ C \in V(4, 2) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
$V(i,j)$		1	2	3	4	5
j	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4	S, T	S			
	5	T				

2. Schritt: $j = 5, i = 1, k = 4$: $V(1, 5) := V(1, 5) \cup \left\{ A \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC, \\ B \in V(1, 4), \\ C \in V(5, 1) \end{array} \right\}$

Weiteres Beispiel für den CYK-Algorithmus

Seien $w = ababa$ und $G = (\{S, T, U\}, \{a, b, c\}, P, S)$ mit
 $P = \{S \rightarrow TU, S \rightarrow UT, T \rightarrow TT, T \rightarrow TU, T \rightarrow a, U \rightarrow UU, U \rightarrow b\}$.

		a	b	a	b	a
		$\xrightarrow{i}$				
	$V(i, j)$	1	2	3	4	5
$j \downarrow$	1	T	U	T	U	T
	2	S, T	S	S, T	S	
	3	T	S	T		
	4	S, T	S			
	5	T				

3. Schritt: Da $S \notin V(1, 5)$, gilt $w \notin L(G)$.

Algorithmus 8: CYK-Algorithmus

Eingabe: CFG $G = (V, \Sigma, P, S)$ in Chomsky-Normalform und Wort $w = a_1 \cdots a_n \in \Sigma^+$

Ausgabe: Ja, wenn $w \in L(G)$, und Nein, wenn $w \notin L(G)$

Beginn

```
für  $i = 1$  bis  $n$  tue
└  $V(i, 1) := \{A \in V \mid A \rightarrow a_i \in P\}$ 
für  $j = 2$  bis  $n$  tue
└ für  $i = 1$  bis  $n + 1 - j$  tue
    └  $V(i, j) := \emptyset;$ 
        └ für  $k = 1$  bis  $j - 1$  tue
            └  $V(i, j) := V(i, j) \cup \left\{ A \in V \mid \begin{array}{l} A \rightarrow BC \in P, \\ B \in V(i, k), \\ C \in V(i + k, j - k) \end{array} \right\}$ 
└ wenn  $S \in V(1, n)$  dann
    └ return Ja
sonst
└ return Nein
```

Theorem

Das Wortproblem für Typ 2-Grammatiken ist entscheidbar:

Es gibt einen Algorithmus, der bei Eingabe von Typ 2-Grammatik G und Wort w nach endlicher Zeit entscheidet, ob $w \in L(G)$ gilt oder nicht. Zudem entscheidet er das Wortproblem in Polynomialzeit.

Theorem

Das Wortproblem für Typ 2-Grammatiken ist entscheidbar:

Es gibt einen Algorithmus, der bei Eingabe von Typ 2-Grammatik G und Wort w nach endlicher Zeit entscheidet, ob $w \in L(G)$ gilt oder nicht. Zudem entscheidet er das Wortproblem in Polynomialzeit.

Beweis Algorithmus 8 ist eine Entscheidungsprozedur.

Theorem

Das Wortproblem für Typ 2-Grammatiken ist entscheidbar:

Es gibt einen Algorithmus, der bei Eingabe von Typ 2-Grammatik G und Wort w nach endlicher Zeit entscheidet, ob $w \in L(G)$ gilt oder nicht. Zudem entscheidet er das Wortproblem in Polynomialzeit.

Beweis Algorithmus 8 ist eine Entscheidungsprozedur.

Er besteht aus drei geschachtelte für-Schleifen. Im Inneren wird noch über alle Produktionen aus P iteriert. Die Laufzeitkomplexität kann daher mit $O(n^3 \cdot |P|)$ abgeschätzt werden. □

Tobias Lindebar hat ein Web-Tool zum Üben und Anschauen entwickelt:

www.cip.ifi.lmu.de/~lindebar/

Das Endlichkeitsproblem

Das **Endlichkeitsproblem** für Typ i -Grammatiken ist die Frage, ob für eine gegebene Typ i -Grammatik G die Ungleichheit $|L(G)| < \infty$ gilt.

Das Endlichkeitsproblem

Das **Endlichkeitsproblem** für Typ i -Grammatiken ist die Frage, ob für eine gegebene Typ i -Grammatik G die Ungleichheit $|L(G)| < \infty$ gilt.

Satz

Das Endlichkeitsproblem für kontextfreie Grammatiken ist entscheidbar.

Das Endlichkeitsproblem

Das **Endlichkeitsproblem** für Typ i -Grammatiken ist die Frage, ob für eine gegebene Typ i -Grammatik G die Ungleichheit $|L(G)| < \infty$ gilt.

Satz

Das Endlichkeitsproblem für kontextfreie Grammatiken ist entscheidbar.

Wir brauchen zuerst ein Lemma.

Entscheiden des Endlichkeitsproblems

Lemma

Sei G eine CFG in Chomsky-Normalform.

Sei n die Zahl aus dem Pumping-Lemma für kontextfreie Sprachen.

Es gilt $|L(G)| = \infty$ g.d.w. es ein Wort $z \in L(G)$ mit $n \leq |z| < 2n$ gibt.

Entscheiden des Endlichkeitsproblems

Lemma

Sei G eine CFG in Chomsky-Normalform.

Sei n die Zahl aus dem Pumping-Lemma für kontextfreie Sprachen.

Es gilt $|L(G)| = \infty$ g.d.w. es ein Wort $z \in L(G)$ mit $n \leq |z| < 2n$ gibt.

Beweis Siehe Skript (nur FSK).



Entscheiden des Endlichkeitsproblems

Satz

Das Endlichkeitsproblem für kontextfreie Grammatiken ist entscheidbar.

Entscheiden des Endlichkeitsproblems

Satz

Das Endlichkeitsproblem für kontextfreie Grammatiken ist entscheidbar.

Beweis Entscheidungsprozedur:

Entscheiden des Endlichkeitsproblems

Satz

Das Endlichkeitsproblem für kontextfreie Grammatiken ist entscheidbar.

Beweis Entscheidungsprozedur:

1. Berechne die Zahl n .

Entscheiden des Endlichkeitsproblems

Satz

Das Endlichkeitsproblem für kontextfreie Grammatiken ist entscheidbar.

Beweis Entscheidungsprozedur:

1. Berechne die Zahl n .
2. Teste mit dem CYK-Algorithmus für alle Wörter $w \in \Sigma^+$ der Länge $n \leq |w| < 2n$, ob $w \in L(G)$ gilt.

Entscheiden des Endlichkeitsproblems

Satz

Das Endlichkeitsproblem für kontextfreie Grammatiken ist entscheidbar.

Beweis Entscheidungsprozedur:

1. Berechne die Zahl n .
2. Teste mit dem CYK-Algorithmus für alle Wörter $w \in \Sigma^+$ der Länge $n \leq |w| < 2n$, ob $w \in L(G)$ gilt.
3. Wenn $w \in L(G)$ für eines der Wörter gilt, dann $|L(G)| = \infty$.

Entscheiden des Endlichkeitsproblems

Satz

Das Endlichkeitsproblem für kontextfreie Grammatiken ist entscheidbar.

Beweis Entscheidungsprozedur:

1. Berechne die Zahl n .
2. Teste mit dem CYK-Algorithmus für alle Wörter $w \in \Sigma^+$ der Länge $n \leq |w| < 2n$, ob $w \in L(G)$ gilt.
3. Wenn $w \in L(G)$ für eines der Wörter gilt, dann $|L(G)| = \infty$.
4. Sonst $|L(G)| < \infty$. □