

# Theorie der Informatik

## 10. Kontextfreie Sprachen I

Malte Helmert   Gabriele Röger

Universität Basel

30. März 2015

# Theorie der Informatik

30. März 2015 — 10. Kontextfreie Sprachen I

## 10.1 Kontextfreie Grammatiken

- Kontextfreie Grammatiken und Bedingungen an  $\varepsilon$ -Regeln
- Chomsky-Normalform

## 10.2 Pumping Lemma

## 10.3 Abschlusseigenschaften

## 10.4 Entscheidbarkeit

## 10.5 Zusammenfassung

## 10.1 Kontextfreie Grammatiken

## Wiederholung: Kontextfreie Grammatiken

### Definition (Kontextfreie Grammatik)

Eine **kontextfreie Grammatik** ist ein 4-Tupel  $(\Sigma, V, P, S)$  mit

- 1  $\Sigma$  endliches Terminalalphabet,
- 2  $V$  endliche Menge von Variablen (mit  $V \cap \Sigma = \emptyset$ ),
- 3  $P \subseteq (V \times (V \cup \Sigma)^+) \cup \{(S, \varepsilon)\}$  endliche Menge von Regeln,
- 4 falls  $S \rightarrow \varepsilon \in P$ , sind alle anderen Regeln in  $V \times ((V \setminus \{S\}) \cup \Sigma)^+$ .
- 5  $S \in V$  Startvariable.

Regel  $X \rightarrow \varepsilon$  ist nur erlaubt, wenn  $X = S$  und  $S$  in keiner rechten Regelseite vorkommt.

Bei regulären Grammatiken konnte man diese Restriktion aufweichen. Wie ist das bei kontextfreien Grammatiken?

## Epsilon-Regeln

### Satz

Für jede Grammatik  $G$  mit Regeln  $P \subseteq V \times (V \cup \Sigma)^*$  gibt es eine kontextfreie Grammatik  $G'$  mit  $\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}(G')$ .

### Beweis.

Sei  $G = (\Sigma, V, P, S)$  Grammatik mit  $P \subseteq V \times (V \cup \Sigma)^*$ .

Sei  $V_\varepsilon = \{A \in V \mid A \Rightarrow^* \varepsilon\}$ . Wir finden diese Menge  $V_\varepsilon$  indem wir zunächst alle Variablen  $A$  mit Regel  $A \rightarrow \varepsilon \in P$  aufsammeln und dann sukzessive weitere Variablen  $B$  hinzufügen für die es eine Regel  $B \rightarrow A_1 A_2 \dots A_k \in P$  gibt, so dass die Variablen  $A_i$  bereits für alle  $1 \leq i \leq k$  in der Menge sind. ...

## Epsilon-Regeln

### Satz

Für jede Grammatik  $G$  mit Regeln  $P \subseteq V \times (V \cup \Sigma)^*$  gibt es eine kontextfreie Grammatik  $G'$  mit  $\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}(G')$ .

### Beweis (Fortsetzung).

Sei  $S$  die Startvariable von  $G$ . Sei  $P'$  die Regelmeng, die aus  $P$  hervorgeht, indem man alle Regeln der Form  $A \rightarrow \varepsilon$  entfernt. Zudem fügt man für jede Regel der Form  $B \rightarrow w$  mit  $B \in V, w \in (V \cup \Sigma)^+$  neue Regeln hinzu, die alle Möglichkeiten Variablen in  $w$  auf  $\varepsilon$  abzuleiten vorwegnehmen: sei  $I_\varepsilon$  die Menge der Stellen, an denen  $w$  eine Variable  $A \in V_\varepsilon$  enthält. Dann fügt man für jede nicht-leere Menge  $I' \subseteq I_\varepsilon$  eine neue Regel  $B \rightarrow w'$  hinzu, wobei  $w'$  aus  $w$  hervorgeht, indem die Variablen an allen Stellen in  $I'$  weggelassen werden. ...

## Epsilon-Regeln

### Satz

Für jede Grammatik  $G$  mit Regeln  $P \subseteq V \times (V \cup \Sigma)^*$  gibt es eine kontextfreie Grammatik  $G'$  mit  $\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}(G')$ .

### Beweis (Fortsetzung).

Damit ist  $\mathcal{L}(G) \setminus \{\varepsilon\} = \mathcal{L}((\Sigma, V, P', S))$  und  $P'$  enthält keine Regel  $A \rightarrow \varepsilon$ . Ist das Startsymbol  $S$  von  $G$  nicht in  $V_\varepsilon$ , sind wir fertig.

Sonst sei  $S'$  neue Variable und  $P''$  gehe aus  $P'$  hervor, indem man

- ① alle Vorkommen von  $S$  in rechten Regelseiten durch  $S'$  ersetzt,
- ② für jede Regel  $S \rightarrow w$  die Regel  $S' \rightarrow w$  hinzufügt, und
- ③ die Regel  $S \rightarrow \varepsilon$  hinzufügt.

Dann ist  $\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}((\Sigma, V \cup \{S'\}, P'', S))$ . □

## Chomsky-Normalform: Motivation

- ▶ Es gibt **keine Normalform**, die für kontextfreie Sprachen **eindeutig** ist.
- ▶ **Chomsky-Normalform** liefert aber interessante Eigenschaften für Ableitungen von Wörtern in einer Sprache.

## Chomsky-Normalform: Definition

### Definition (Chomsky-Normalform)

Eine kontextfreie Grammatik  $G$  heisst in **Chomsky-Normalform (CNF)**, falls alle Regeln eine der folgenden drei Formen haben:

- ▶  $A \rightarrow BC$  mit  $A, B, C$  Variablen, oder
- ▶  $A \rightarrow a$  mit  $A$  Variable,  $a$  Terminalsymbol, oder
- ▶  $S \rightarrow \varepsilon$  mit  $S$  Startvariable.

Alternativ: Regelmengemenge  $P \subseteq (V \times (VV \cup \Sigma)) \cup \{(S, \varepsilon)\}$

## Chomsky-Normalform: Satz

### Satz

Für jede kontextfreie Grammatik  $G$  gibt es eine kontextfreie Grammatik in Chomsky-Normalform mit  $\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}(G')$ .

### Beweis.

Das folgende Verfahren bringt die Regelmengemenge von  $G$  in CNF:

Schritt 1: **Eliminiere Regeln der Form  $A \rightarrow B$**  mit  $A, B$  Variablen.

Gibt es Mengen von Variablen  $\{B_1, \dots, B_k\}$  mit Regeln  $B_1 \rightarrow B_2, B_2 \rightarrow B_3, \dots, B_{k-1} \rightarrow B_k, B_k \rightarrow B_1$ , so ersetze diese Variablen durch eine neue Variable  $B$ .

Dann benenne alle Variablen so in  $V = \{A_1, \dots, A_n\}$  um, dass aus  $A_i \rightarrow A_j \in P$  folgt, dass  $i < j$ . Für  $k = n - 1, \dots, 1$ : Eliminiere alle Regeln der Form  $A_k \rightarrow A_{k'}$  mit  $k' > k$  und füge für jede Regel  $A_{k'} \rightarrow w$  mit  $w \in (V \cup \Sigma)^+$  eine Regel  $A_k \rightarrow w$  hinzu. ...

## Chomsky-Normalform: Satz

### Satz

Für jede kontextfreie Grammatik  $G$  gibt es eine kontextfreie Grammatik in Chomsky-Normalform mit  $\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}(G')$ .

### Beweis (Fortsetzung).

Schritt 2: **Eliminiere Regeln mit Terminalzeichen auf rechter Seite, die nicht die Form  $A \rightarrow a$  haben.**

Führe für jedes Terminalzeichen  $a \in \Sigma$  eine neue Variable  $A_a$  und die Regel  $A_a \rightarrow a$  ein.

Ersetze in allen Regeln, die nicht die Form  $A \rightarrow a$  haben, alle Terminalzeichen durch die entsprechenden neu eingeführten Variablen. ...

## Chomsky-Normalform: Satz

### Satz

Für jede kontextfreie Grammatik  $G$  gibt es eine kontextfreie Grammatik in Chomsky-Normalform mit  $\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}(G')$ .

### Beweis (Fortsetzung).

Schritt 3: **Eliminiere Regeln der Form  $A \rightarrow B_1 B_2 \dots B_k$  mit  $k > 2$**

Führe für jede Regel der Form  $A \rightarrow B_1 B_2 \dots B_k$  mit  $k > 2$  neue Variablen  $C_2, \dots, C_{k-1}$  ein und ersetze die Regel durch

$$\begin{aligned} A &\rightarrow B_1 C_2 \\ C_2 &\rightarrow B_2 C_3 \\ &\vdots \\ C_{k-1} &\rightarrow B_{k-1} B_k \end{aligned}$$

□

## Chomsky-Normalform: Länge von Ableitungen

### Beobachtung

Sei  $G$  eine Grammatik in **Chomsky-Normalform** und  $w \in \mathcal{L}(G)$  ein nicht-leeres Wort, das von  $G$  erzeugt wird. Dann wird  $w$  in genau  $2|w| - 1$  Ableitungsschritten erzeugt.

### Beweis.

$\rightsquigarrow$  Übung □

## Ableitungsbaum: allgemein

### Definition

Sei  $G$  eine kontextfreie Grammatik und  $S \Rightarrow w_1 \Rightarrow w_2 \Rightarrow \dots \Rightarrow w_n$  eine Ableitung für ein nicht-leeres Wort  $w_n \in \mathcal{L}(G)$ . Der **Ableitungsbaum**  $T$  für diese Ableitung ist folgenderweise aufgebaut:

- ▶ Der Wurzel des Baumes ist die Startvariable  $S$  zugeordnet.
- ▶ Wird im  $i$ -ten Ableitungsschritt die Variable  $A$  durch Wort  $z$  ersetzt, hat der entsprechende  $A$ -Knoten  $|z|$  Kinder, denen die einzelnen Zeichen von  $z$  (in der gleichen Reihenfolge) zugeordnet sind.

Den Blättern des resultierenden Baumes sind dann genau die Zeichen aus  $w_n$  zugeordnet.

Beispiel: **Tafel**

## Chomsky-Normalform: Ableitungsbaum

### Beobachtung

Sei  $G$  eine Grammatik in **Chomsky-Normalform** und  $w \in \mathcal{L}(G)$  ein nicht-leeres Wort, das von  $G$  erzeugt wird. Jeder **Ableitungsbaum** von  $w$  ist – bis auf die Ableitung der Blätter – ein **Binärbaum**.

In einer Ableitung eines nicht-leeren Wortes können nur Formeln der Form  $A \rightarrow BC$  und der Form  $A \rightarrow a$  angewendet werden. Im ersten Fall bekommt der Knoten für  $A$  genau zwei Kinder und erfüllt damit die Binärbaumeigenschaft. Im zweiten Fall wird ein Terminalzeichen und damit ein Blatt abgeleitet.

## 10.2 Pumping Lemma

# Pumping Lemma für kontextfreie Sprachen



Ja!

Mit dem Pumping Lemma aus dem vorherigen Kapitel konnten wir für Sprachen zeigen, dass sie nicht regulär sind. Gibt es so ein Lemma auch für **kontextfreie** Sprachen?

Foto mit freundlicher Genehmigung von imagerymajestic / FreeDigitalPhotos.net

# Pumping Lemma

## Satz (Pumping Lemma)

Sei  $L$  eine kontextfreie Sprache. Dann gibt es ein  $n \in \mathbb{N}$  (eine **Pumpingzahl** für  $L$ ), so dass sich alle Wörter  $z \in L$  mit  $|z| \geq n$  zerlegen lassen in  $z = uvwxy$ , so dass folgendes gilt:

- ①  $|vx| \geq 1$ ,
- ②  $|vwx| \leq n$ , und
- ③ für alle  $i = 0, 1, 2, \dots$  gilt:  $uv^iwx^iy \in L$ .

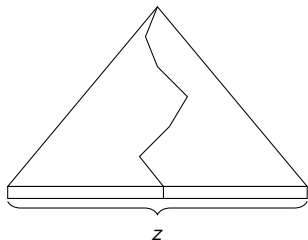
## Beweis.

Sei  $G = (\Sigma, V, P, S)$  Grammatik mit  $\mathcal{L}(G) = L$  in Chomsky-Normalform.

Wir zeigen, dass  $n = 2^{|V|}$  eine Pumpingzahl von  $L$  ist. Betrachte hierzu ein beliebiges Wort  $z \in L$  mit  $|z| \geq n$ . ...

# Pumping Lemma

## Beweis (Fortsetzung).

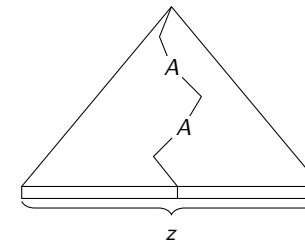


Da jeder Ableitungsbaum für eine Ableitung von  $z$  bis auf die Ableitung der Terminalsymbole ein Binärbaum ist und der Baum  $\geq n$  Blätter hat, hat mindestens einen Pfad von der Wurzel zu einem Blatt Länge  $\geq |V|$ .

Auf solch einem Pfad befinden sich mindestens  $|V| + 1$  Variablen, es muss also mindestens eine Variable doppelt vorkommen. ...

# Pumping Lemma

## Beweis (Fortsetzung).

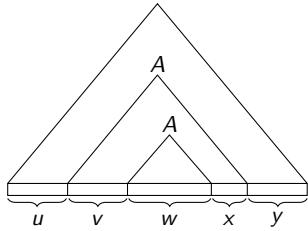


Wir wählen solch ein Doppelvorkommen, indem wir von **unten nach oben** einem Pfad der Länge  $\geq |V|$  folgen bis eine Variable zum zweiten Mal vorkommt.

Die obere der beiden Variablen kann dann höchstens  $|V| + 1$  Schritte von der Blattebene entfernt sein. ...

## Pumping Lemma

### Beweis (Fortsetzung).



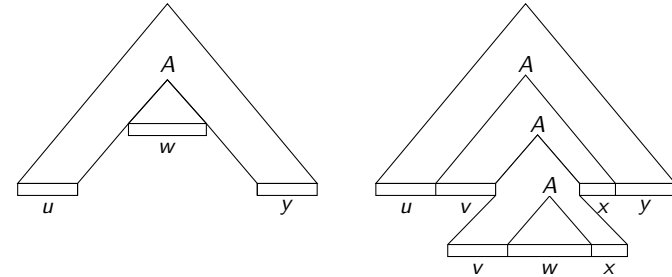
Die Teilbäume unter den Variablen definieren dann die Aufteilung  $z = uvwxy$  von  $z$  in Teilwörter. Wir zeigen, dass die Aufteilung die geforderten drei Bedingungen erfüllt.

Da die obere Variable mit einer Regel der Form  $A \rightarrow BC$  weiter abgeleitet wird und wegen der Restriktionen an die Verwendung von  $\varepsilon$  in  $G$ , ist  $v$  oder  $x$  (oder beide) nicht leer: Entweder ist  $v$  aus  $B$  abgeleitet oder  $x$  geht aus  $C$  hervor. Damit folgt die erste Bedingung  $|vx| \geq 1$ .

Da die obere Variable höchstens  $|V| + 1$  Schritte von jedem Blatt entfernt ist, kann das abgeleitete Wort  $vwx$  höchstens Länge  $2^{|V|}$  haben. Es gilt also auch die zweite Bedingung  $|vwx| \leq n$ . ...

## Pumping Lemma

### Beweis (Fortsetzung).



Die Ableitungsfolge kann aufgrund des Doppelvorkommens der Variable so modifiziert werden, dass man für jedes  $i \geq 0$  das Wort  $uv^iwx^iy$  ableiten kann. Damit ist das Wort in der Sprache und auch die dritte Bedingung erfüllt.  $\square$

## Pumping Lemma: Beispiel

### Beispiel

Die Sprache  $L = \{a^n b^n c^n \mid n \in \mathbb{N}\}$  ist nicht kontextfrei.

### Beweis.

Angenommen  $L$  ist kontextfrei. Dann sei  $p$  eine Pumpingzahl für  $L$ .

Das Wort  $z = a^p b^p c^p$  ist in  $L$  und hat Länge  $\geq p$ . Sei  $z = uvwxy$  eine Zerlegung mit den Eigenschaften aus dem PL.

Dann ist auch das Wort  $z' = uv^2wx^2y$  in  $L$ . Da  $|vwx| \leq p$  kann  $vwx$  nicht alle Symbole  $a, b$  und  $c$  enthalten und es bleibt die Anzahl mindestens eines Symbols unverändert. Wegen  $|vx| \geq 1$  enthält  $z'$  aber für mindestens ein Symbol eine grössere Anzahl als das Wort  $z$ . Da daher in  $z'$  nicht mehr alle Symbole gleich oft vorkommen, ist  $z'$  nicht in  $L$ .

$\leadsto$  Widerspruch

$\leadsto L$  nicht kontextfrei.  $\square$

## 10.3 Abschlusseigenschaften

## Abschlusseigenschaften der kontextfreien Sprachen

### Satz

Die kontextfreien Sprachen sind abgeschlossen unter:

- ▶ Vereinigung
- ▶ Produkt
- ▶ Stern

### Beweis.

Abschluss unter **Vereinigung**:

Seien  $G_1 = (\Sigma, V_1, P_1, S_1)$  und  $G_2 = (\Sigma, V_2, P_2, S_2)$  kontextfreie Grammatiken mit  $V_1 \cap V_2 = \emptyset$ . Dann ist  $G = (\Sigma, V_1 \cup V_2 \cup \{S\}, P_1 \cup P_2 \cup \{S \rightarrow S_1, S \rightarrow S_2\}, S)$  (wobei  $S \notin (V_1 \cup V_2)$ ) eine kontextfreie Grammatik für die Vereinigungsmenge (evtl. Umformungen für  $\varepsilon$ -Regeln notwendig).

...

## Abschlusseigenschaften der kontextfreien Sprachen

### Satz

Die kontextfreien Sprachen sind abgeschlossen unter:

- ▶ Vereinigung
- ▶ Produkt
- ▶ Stern

### Beweis (Fortsetzung).

Abschluss unter **Produkt**:

Seien  $G_1 = (\Sigma, V_1, P_1, S_1)$  und  $G_2 = (\Sigma, V_2, P_2, S_2)$  kontextfreie Grammatiken mit  $V_1 \cap V_2 = \emptyset$ . Dann ist  $G = (\Sigma, V_1 \cup V_2 \cup \{S\}, P_1 \cup P_2 \cup \{S \rightarrow S_1 S_2\}, S)$  (wobei  $S \notin V_1 \cup V_2$ ) eine kontextfreie Grammatik für das Produkt (evtl. Umformungen für  $\varepsilon$ -Regeln notwendig).

...

## Abschlusseigenschaften der kontextfreien Sprachen

### Satz

Die kontextfreien Sprachen sind abgeschlossen unter:

- ▶ Vereinigung
- ▶ Produkt
- ▶ Stern

### Beweis (Fortsetzung).

Abschluss unter **Sternoperation**:

Sei  $G_1 = (\Sigma, V_1, P_1, S_1)$  eine kontextfreie Grammatik bei der o.B.d.A.  $S_1$  auf keiner rechten Regelseite vorkommt. Dann ist  $G = (\Sigma, V_1 \cup \{S\}, P, S)$  mit  $S \notin (V_1 \cup V_2)$  und  $P = (P_1 \cup \{S \rightarrow \varepsilon, S \rightarrow S_1, S_1 \rightarrow S_1 S_1\}) \setminus \{S_1 \rightarrow \varepsilon\}$  eine kontextfreie Grammatik für  $\mathcal{L}(G_1)^*$ . □

## Abschlusseigenschaften der kontextfreien Sprachen

### Satz

Die kontextfreien Sprachen sind **nicht** abgeschlossen unter:

- ▶ Schnitt
- ▶ Komplement

### Beweis.

Kein Abschluss unter **Schnitt**:

Die Sprachen  $L_1 = \{a^i b^j c^j \mid i, j > 0\}$  und  $L_2 = \{a^j b^i c^j \mid i, j > 0\}$  sind kontextfrei.

Zum Beispiel ist  $G_1 = (\{a, b, c\}, \{S, A, B\}, P, S)$  mit  $P = \{S \rightarrow AB, A \rightarrow a, A \rightarrow aA, B \rightarrow bc, B \rightarrow bBc\}$  eine kontextfreie Grammatik für  $L_1$ .

Wir haben vorhin aber gesehen, dass  $L_1 \cap L_2 = \{a^i b^i c^i \mid i > 0\}$  nicht kontextfrei ist. ...

## Abschlusseigenschaften der kontextfreien Sprachen

### Satz

Die kontextfreien Sprachen sind nicht abgeschlossen unter:

- ▶ Schnitt
- ▶ Komplement

### Beweis (Fortsetzung).

Kein Abschluss unter **Komplement**:

Wären die kontextfreien Sprachen unter Vereinigung und Komplement abgeschlossen, müssten sie wegen des Zusammenhangs

$$L_1 \cap L_2 = \overline{\overline{L_1} \cup \overline{L_2}}$$

ebenfalls unter Schnitt abgeschlossen sein. Wir haben aber bereits gezeigt, dass sie unter Vereinigung abgeschlossen, unter Schnitt jedoch nicht abgeschlossen sind.  $\square$

## 10.4 Entscheidbarkeit

## Entscheidbarkeit: Wortproblem

### Satz (Wortproblem ist entscheidbar)

Das **Wortproblem**  $P_{\in}$  für kontextfreie Sprachen ist:

**Gegeben:** Kontextfreie Grammatik  $G$  mit Terminalalphabet  $\Sigma$  und Wort  $w \in \Sigma^*$

**Gefragt:** Ist  $w \in \mathcal{L}(G)$ ?

Das Wortproblem ist **entscheidbar**.

### Beweis.

Falls  $w = \varepsilon$ , ist  $w \in \mathcal{L}(G)$  gdw.  $S \rightarrow \varepsilon$  mit Startvariable  $S$  Regel von  $G$  ist.

Da für alle anderen Regeln  $w_l \rightarrow w_r$  von  $G$  gilt, dass  $|w_l| \leq |w_r|$ , können die Zwischenergebnisse im Laufe einer Ableitung eines nicht-leeren Wortes nicht kürzer werden. Man kann also systematisch alle (endlich vielen) Ableitungen von Wörtern bis zur Länge  $|w|$  durchgehen und prüfen, ob sie das Wort  $w$  ableiten.  $\square$

## Entscheidbarkeit: Leerheitsproblem

### Satz (Leerheitsproblem ist entscheidbar)

Das **Leerheitsproblem**  $P_{\emptyset}$  für kontextfreie Sprachen ist:

**Gegeben:** Kontextfreie Grammatik  $G$

**Gefragt:** Ist  $\mathcal{L}(G) = \emptyset$ ?

Das Leerheitsproblem ist **entscheidbar**.

### Beweis.

Man konstruiert zunächst eine Grammatik  $G'$  in CNF, die  $\mathcal{L}(G)$  erzeugt. In  $G'$  bestimmt man alle Variablen, von denen Terminalwörter ableitbar sind: Man markiert zunächst alle Variablen  $A$ , für die es eine Regel der Form  $A \rightarrow a$  gibt. Danach markiert man sukzessive alle Variablen  $A$ , für die es eine Regel  $A \rightarrow BC$  gibt, so dass  $B$  und  $C$  bereits markiert sind.

$\mathcal{L}(G)$  ist leer gdw. die Startvariable nicht markiert ist.  $\square$



## Entscheidbarkeit: Endlichkeitsproblem

Satz (Endlichkeitsproblem ist entscheidbar)

Das **Endlichkeitsproblem**  $P_\infty$  für kontextfreie Sprachen ist:

**Gegeben:** Kontextfreie Grammatik  $G$

**Gefragt:** Ist  $|\mathcal{L}(G)| < \infty$ ?

Das Endlichkeitsproblem ist **entscheidbar**.

**Beweis.**

Man konstruiert zunächst eine Grammatik  $G'$  in CNF, die  $\mathcal{L}(G)$  erzeugt. Wir wissen, dass  $n = 2^{|V'|}$  (wobei  $V'$  Variablenmenge von  $G'$  ist) eine Pumpingzahl für  $\mathcal{L}(G)$  ist.

Wir zeigen, dass  $|\mathcal{L}(G)| = \infty$  genau dann gilt, wenn es ein  $w \in \mathcal{L}(G)$  gibt mit  $n \leq |w| < 2n$ :

$\Leftarrow$ : Falls  $w \in \mathcal{L}(G)$  mit  $n \leq |w|$ , dann gilt wg. PL  $|\mathcal{L}(G)| = \infty$ . ...

## Entscheidbarkeit: Endlichkeitsproblem

Satz (Endlichkeitsproblem ist entscheidbar)

Das **Endlichkeitsproblem**  $P_\infty$  für kontextfreie Sprachen ist:

**Gegeben:** Kontextfreie Grammatik  $G$

**Gefragt:** Ist  $|\mathcal{L}(G)| < \infty$ ?

Das Endlichkeitsproblem ist **entscheidbar**.

**Beweis (Fortsetzung).**

$\Rightarrow$ : Falls  $|\mathcal{L}(G)| = \infty$ , sei  $z$  ein kürzestes Wort in  $\mathcal{L}(G)$  mit mindestens Länge  $|z| \geq n$ . Wenn  $|z| \geq 2n$ , dann kann  $z$  laut PL zerlegt werden, in  $z = uvwxy$ , so dass  $z_0 = uwy \in \mathcal{L}(G)$ , wobei  $n \leq |z_0| < |z|$ .

$\leadsto$  Widerspruch zur Minimalität der Länge von  $z$ . □

## Unentscheidbarkeit: Äquivalenz- und Schnittproblem

**Satz**

Das **Äquivalenzproblem** und das **Schnittproblem** sind für kontextfreie Sprachen **nicht entscheidbar**.

Wir können das mit den uns zur Verfügung stehenden Mitteln noch nicht beweisen. Wir werden das jedoch im dritten Vorlesungsteil über Berechenbarkeitstheorie nachholen.

## 10.5 Zusammenfassung

## Zusammenfassung

- ▶ Für jede kontextfreie Sprache gibt es eine Grammatik in **Chomsky-Normalform**.
- ▶ Bei Grammatiken in **Chomsky-Normalform** sind Ableitungsbäume (fast) **Binärbäume**.
- ▶ Mit dem **Pumping Lemma** für kontextfreie Sprachen kann man zeigen, dass eine Sprache **nicht kontextfrei** ist.
- ▶ Die kontextfreien Sprachen sind unter **Vereinigung, Produkt und Stern abgeschlossen**.
- ▶ Die kontextfreien Sprachen sind unter **Schnitt und Komplement nicht abgeschlossen**.
- ▶ Das **Wort-**, das **Leerheits-** und das **Endlichkeitsproblem** sind für die kontextfreien Sprachen **entscheidbar**.
- ▶ Das **Äquivalenz-** und das **Schnittproblem** sind für die kontextfreien Sprachen **nicht entscheidbar**.