

# Einführung in die Theoretische Informatik

Johannes Köbler



Institut für Informatik  
Humboldt-Universität zu Berlin

WS 2017/18

## Bemerkung

- Wie wir gesehen haben, ist folgende Sprache nicht regulär:

$$L = \{a^n b^n \mid n \geq 0\}.$$

- Wir können aber eine kontextfreie Grammatik für  $L$  angeben:

$$G = (\{S\}, \{a, b\}, P, S) \text{ mit } P = \{S \rightarrow aSb, S \rightarrow \varepsilon\}.$$

- Damit ist klar, dass die Klasse der regulären Sprachen echt in der Klasse der kontextfreien Sprachen enthalten ist:

$$\text{REG} \subsetneq \text{CFL}.$$

- Als nächstes wollen wir zeigen, dass die Klasse der kontextfreien Sprachen wiederum echt in der Klasse der kontextsensitiven Sprachen enthalten ist:

$$\text{CFL} \subsetneq \text{CSL}.$$

- Kontextfreie Grammatiken sind dadurch charakterisiert, dass sie nur Regeln der Form  $A \rightarrow v$  haben.
- Dies lässt die Verwendung von beliebigen  $\varepsilon$ -Regeln der Form  $A \rightarrow \varepsilon$  zu.
- Eine kontextsensitive Grammatik darf dagegen höchstens die  $\varepsilon$ -Regel  $S \rightarrow \varepsilon$  haben.
- Voraussetzung hierfür ist, dass  $S$  das Startsymbol ist und dieses nicht auf der rechten Seite einer Regel vorkommt.
- Daher sind nicht alle kontextfreien Grammatiken kontextsensitiv.
- Beispielsweise ist die Grammatik  $G = (\{S\}, \{a, b\}, \{S \rightarrow aSb, S \rightarrow \varepsilon\}, S)$  nicht kontextsensitiv, da sie die Regel  $S \rightarrow \varepsilon$  enthält, obwohl  $S$  auf der rechten Seite der Regel  $S \rightarrow aSb$  vorkommt.
- Wir werden jedoch sehen, dass sich zu jeder kontextfreien Grammatik eine äquivalente kontextsensitive Grammatik konstruieren lässt.

## Satz

Zu jeder kontextfreien Grammatik  $G = (V, \Sigma, P, S)$  gibt es eine kontextfreie Grammatik  $G' = (V, \Sigma, P', S)$  ohne  $\varepsilon$ -Regeln mit  $L(G') = L(G) \setminus \{\varepsilon\}$ .

## Beweis

- Zuerst berechnen wir die Menge  $E = \{A \in V \mid A \Rightarrow^* \varepsilon\}$  aller Variablen, die nach  $\varepsilon$  ableitbar sind:

```

1    $E' := \{A \in V \mid A \rightarrow \varepsilon\}$ 
2   repeat
3      $E := E'$ 
4      $E' := E \cup \{A \in V \mid \exists B_1, \dots, B_k \in E : A \rightarrow B_1 \dots B_k\}$ 
5   until  $E = E'$ 

```

- Nun bilden wir  $P'$  wie folgt:

$$\left\{ A \rightarrow v' \mid \begin{array}{l} \text{es ex. eine Regel } A \rightarrow_G v, \text{ so dass } v' \neq \varepsilon \text{ aus } v \text{ durch} \\ \text{Entfernen von beliebig vielen Variablen } A \in E \text{ entsteht} \end{array} \right\} \quad \square$$

Entfernen von  $\varepsilon$ -Regeln

## Beispiel

Betrachte die Grammatik  $G = (\{S, T, U, X, Y, Z\}, \{a, b, c\}, P, S)$  mit

$$P: \begin{array}{lll} S \rightarrow aY, bX, Z & Y \rightarrow bS, aYY & T \rightarrow U \\ X \rightarrow aS, bXX & Z \rightarrow \varepsilon, S, T, cZ & U \rightarrow abc \end{array}$$

- Berechnung von  $E$ :

$E'$	$\{Z\}$	$\{Z, S\}$
$E$	$\{Z, S\}$	$\{Z, S\}$

- Entferne  $Z \rightarrow \varepsilon$  und füge  $Y \rightarrow b$  (wegen  $Y \rightarrow bS$ ),  $X \rightarrow a$  (wegen  $X \rightarrow aS$ ) und  $Z \rightarrow c$  (wegen  $Z \rightarrow cZ$ ) hinzu:

$$P': \begin{array}{lll} S \rightarrow aY, bX, Z & Y \rightarrow b, bS, aYY & T \rightarrow U \\ X \rightarrow a, aS, bXX & Z \rightarrow c, S, T, cZ & U \rightarrow abc \end{array}$$

## Satz

Zu jeder kontextfreien Grammatik  $G = (V, \Sigma, P, S)$  gibt es eine kontextfreie Grammatik  $G' = (V, \Sigma, P', S)$  ohne  $\varepsilon$ -Regeln mit  $L(G') = L(G) \setminus \{\varepsilon\}$ .

## Korollar

$\text{REG} \not\subseteq \text{CFL} \subseteq \text{CSL} \subseteq \text{RE}$ .

## Beweis

- Es ist nur noch die Inklusion  $\text{CFL} \subseteq \text{CSL}$  zu zeigen.
- Nach obigem Satz ex. zu  $L \in \text{CFL}$  eine kontextfreie Grammatik  $G = (V, \Sigma, P, S)$  ohne  $\varepsilon$ -Regeln mit  $L(G) = L \setminus \{\varepsilon\}$ .
- Da  $G$  dann auch kontextsensitiv ist, folgt hieraus im Fall  $\varepsilon \notin L$  unmittelbar  $L(G) = L \in \text{CSL}$ .
- Im Fall  $\varepsilon \in L$  erzeugt die kontextsensitive Grammatik

$$G' = (V \cup \{S'\}, \Sigma, P \cup \{S' \rightarrow S, \varepsilon\}, S')$$

die Sprache  $L(G') = L$ , d.h.  $L \in \text{CSL}$ .

## Satz

CFL ist abgeschlossen unter Vereinigung, Produkt und Sternhülle.

## Beweis

Seien  $G_1 = (V_1, \Sigma, P_1, S_1)$  und  $G_2 = (V_2, \Sigma, P_2, S_2)$  kontextfreie Grammatiken mit  $V_1 \cap V_2 = \emptyset$  und sei  $S$  eine neue Variable.

Dann erzeugen die kontextfreien Grammatiken

$$G_3 = (V_1 \cup V_2 \cup \{S\}, \Sigma, P_1 \cup P_2 \cup \{S \rightarrow S_1, S_2\}, S)$$

die Vereinigung  $L(G_3) = L(G_1) \cup L(G_2)$ ,

$$G_4 = (V_1 \cup V_2 \cup \{S\}, \Sigma, P_1 \cup P_2 \cup \{S \rightarrow S_1 S_2\}, S)$$

das Produkt  $L(G_4) = L(G_1)L(G_2)$  und

$$G_5 = (V_1 \cup \{S\}, \Sigma, P_1 \cup \{S \rightarrow S_1 S, \varepsilon\}, S)$$

die Sternhülle  $L(G_1)^*$ . □

## Satz

CFL ist abgeschlossen unter Vereinigung, Produkt und Sternhülle.

## Frage

Ist die Klasse CFL auch abgeschlossen unter

- Schnitt und
- Komplement?

## Antwort

Nein.

Hierzu müssen wir für bestimmte Sprachen nachweisen, dass sie nicht kontextfrei sind. Dies gelingt mit einem Pumping-Lemma für kontextfreie Sprachen.

## Satz (Pumping-Lemma für kontextfreie Sprachen)

Zu jeder kontextfreien Sprache  $L \in \text{CFL}$  gibt es eine Zahl  $l$ , so dass sich alle Wörter  $z \in L$  mit  $|z| \geq l$  in  $z = uvwxy$  zerlegen lassen mit

- 1  $vx \neq \varepsilon$ ,
- 2  $|vwx| \leq l$  und
- 3  $uv^iwx^iy \in L$  für alle  $i \geq 0$ .

## Beispiel

- Betrachte die Sprache  $L = \{a^n b^n \mid n \geq 0\}$ .
- Dann lässt sich jedes Wort  $z = a^n b^n = a^{n-1} a b b^{n-1}$  in  $L$  mit  $|z| \geq l = 2$  pumpen.
- Zerlegen wir nämlich  $z$  in

$$z = uvwxy \text{ mit } u = a^{n-1}, v = a, w = \varepsilon, x = b \text{ und } y = b^{n-1},$$

dann gilt

- ①  $vx = ab \neq \varepsilon$
- ②  $|vwx| = |ab| \leq 2$  und
- ③  $uv^i wx^i y = a^{n-1} a^i b^i b^{n-1} \in L$  für alle  $i \geq 0$



## Beispiel

- Die Sprache  $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$  ist nicht kontextfrei.
- Für eine vorgegebene Zahl  $l \geq 0$  hat nämlich das Wort  $z = a^l b^l c^l \in L$  die Länge  $|z| = 3l \geq l$ .
- Dieses Wort lässt sich aber nicht pumpen:

Für jede Zerlegung  $z = uvwxy$  mit  $vx \neq \varepsilon$  und  $|vwx| \leq l$  gehört  $z' = uv^0wx^0y$  nicht zu  $L$ :

- Wegen  $vx \neq \varepsilon$  ist  $|z'| < |z|$ .
- Wegen  $|vwx| \leq l$  kommen in  $vx$  nicht alle drei Zeichen  $a, b, c$  vor.
- Kommt aber in  $vx$  beispielsweise kein  $a$  vor, so ist  $\#_a(z) = \#_a(z')$  und somit gilt

$$|z'| < |z| = 3 \#_a(z) = 3 \#_a(z').$$

- Also gehört  $z'$  nicht zu  $L$ .



Wie wir gesehen haben, ist die Klasse CFL abgeschlossen unter

- Vereinigung,
- Produkt und
- Sternhülle.

## Satz

CFL ist nicht abgeschlossen unter

- Schnitt und
- Komplement.

Beweis von  $L_1, L_2 \in \text{CFL} \not\Rightarrow L_1 \cap L_2 \in \text{CFL}$ 

- Die beiden Sprachen

$$L_1 = \{a^n b^m c^m \mid n, m \geq 0\} \quad \text{und} \quad L_2 = \{a^n b^n c^m \mid n, m \geq 0\}$$

sind kontextfrei (siehe Übungen).

- Nicht jedoch ihr Schnitt  $L_1 \cap L_2 = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$ .
- Also ist CFL nicht unter Schnitt abgeschlossen.

Beweis von  $L \in \text{CFL} \not\Rightarrow \bar{L} \in \text{CFL}$ 

- Wäre CFL unter Komplement abgeschlossen, so wäre CFL wegen de Morgan auch unter Schnitt abgeschlossen.
- Mit  $A, B \in \text{CFL}$  wären dann nämlich auch  $\bar{A}, \bar{B} \in \text{CFL}$ , woraus wegen

$$\bar{A}, \bar{B} \in \text{CFL} \Rightarrow \overline{\bar{A} \cap \bar{B}} = \bar{A} \cup \bar{B} \in \text{CFL}$$

wiederum  $A \cap B \in \text{CFL}$  folgen würde.

## Definition

Eine Grammatik  $(V, \Sigma, P, S)$  ist in **Chomsky-Normalform (CNF)**, falls  $P \subseteq V \times (V^2 \cup \Sigma)$  ist, d.h. alle Regeln haben die Form  $A \rightarrow BC$  oder  $A \rightarrow a$ .

## Satz

Zu jeder kontextfreien Sprache  $L \in \text{CFL}$  gibt es eine CNF-Grammatik  $G'$  mit  $L(G') = L \setminus \{\varepsilon\}$ .

## Anwendungen der Chomsky-Normalform

- CNF-Grammatiken ermöglichen den Beweis des Pumping-Lemmas für kontextfreie Sprachen.
- Zudem bilden sie die Basis für eine effiziente Lösung des Wortproblems für kontextfreie Sprachen.

## Das Wortproblem für kontextfreie Grammatiken

Gegeben: Eine kontextfreie Grammatik  $G$  und ein Wort  $x$ .

Gefragt: Ist  $x \in L(G)$ ?

## Satz

Das Wortproblem für kontextfreie Grammatiken ist effizient entscheidbar.

Um eine kontextfreie Grammatik in Chomsky-Normalform zu bringen, müssen wir neben den  $\varepsilon$ -Regeln  $A \rightarrow \varepsilon$  auch sämtliche Variablenumbenennungen  $A \rightarrow B$  loswerden.

## Definition

Regeln der Form  $A \rightarrow B$  heißen **Variablenumbenennungen**.

## Satz

Zu jeder kontextfreien Grammatik  $G$  ex. eine kontextfreie Grammatik  $G'$  ohne Variablenumbenennungen mit  $L(G') = L(G)$ .

## Beweis

- Zuerst entfernen wir sukzessive alle Zyklen

$$A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_k \rightarrow A_1.$$

Hierzu entfernen wir diese Regeln aus  $P$  und ersetzen alle Vorkommen der Variablen  $A_2, \dots, A_k$  in den übrigen Regeln durch  $A_1$ .

(Sollte sich unter den entfernten Variablen  $A_2, \dots, A_k$  die Startvariable  $S$  befinden, so sei  $A_1$  die neue Startvariable.)

## Beispiel (Fortsetzung)

$$\begin{array}{lll}
 P: S \rightarrow aY, bX, Z & Y \rightarrow b, bS, aYY & T \rightarrow U \\
 X \rightarrow a, aS, bXX & Z \rightarrow c, S, T, cZ & U \rightarrow abc
 \end{array}$$

- Entferne den Zyklus  $S \rightarrow Z \rightarrow S$  und ersetze alle Vorkommen von  $Z$  durch  $S$ :

$$\begin{array}{lll}
 S \rightarrow aY, bX, c, T, cS & Y \rightarrow b, bS, aYY & T \rightarrow U \\
 X \rightarrow a, aS, bXX & U \rightarrow abc &
 \end{array}$$

# Entfernen von Variablenumbenennungen

## Satz

Zu jeder kontextfreien Grammatik  $G$  ex. eine kontextfreie Grammatik  $G'$  ohne Variablenumbenennungen mit  $L(G') = L(G)$ .

## Beweis

- Zuerst entfernen wir alle Zyklen

$$A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_k \rightarrow A_1.$$

- Nun werden wir sukzessive die restlichen Variablenumbenennungen los, indem wir
  - eine Regel  $A \rightarrow B$  wählen, so dass in  $P$  keine Variablenumbenennung  $B \rightarrow C$  mit  $B$  auf der linken Seite existiert,
  - diese Regel  $A \rightarrow B$  aus  $P$  entfernen und
  - für jede Regel  $B \rightarrow v$  in  $P$  die Regel  $A \rightarrow v$  zu  $P$  hinzunehmen.  $\square$

## Entfernen von Variablenumbenennungen

## Beispiel (Fortsetzung)

$$\begin{array}{lll}
 S \rightarrow aY, bX, c, T, cS & Y \rightarrow b, bS, aYY & T \rightarrow U \\
 X \rightarrow a, aS, bXX & U \rightarrow abc &
 \end{array}$$

- Entferne die Regel  $T \rightarrow U$  und füge die Regel  $T \rightarrow abc$  hinzu (wegen  $U \rightarrow abc$ ):

$$\begin{array}{lll}
 S \rightarrow aY, bX, c, T, cS & Y \rightarrow b, bS, aYY & T \rightarrow abc \\
 X \rightarrow a, aS, bXX & U \rightarrow abc &
 \end{array}$$

- Entferne dann auch die Regel  $S \rightarrow T$  und füge die Regel  $S \rightarrow abc$  (wegen  $T \rightarrow abc$ ) hinzu:

$$\begin{array}{lll}
 S \rightarrow abc, aY, bX, c, cS & Y \rightarrow b, bS, aYY & T \rightarrow abc \\
 X \rightarrow a, aS, bXX & U \rightarrow abc &
 \end{array}$$

- Da  $T$  und  $U$  nirgends mehr auf der rechten Seite vorkommen, können wir die Regeln  $T \rightarrow abc$  und  $U \rightarrow abc$  weglassen:

$$S \rightarrow abc, aY, bX, c, cS \quad Y \rightarrow b, bS, aYY \quad X \rightarrow a, aS, bXX \quad \triangleleft$$

Bereits gezeigt:

## Korollar

Zu jeder kontextfreien Grammatik  $G$  ex. eine kontextfreie Grammatik  $G'$  ohne  $\varepsilon$ -Regeln und ohne Variablenumbenennungen mit  $L(G') = L(G) \setminus \{\varepsilon\}$ .

Noch zu zeigen:

## Satz

Zu jeder kontextfreien Sprache  $L \in \text{CFL}$  gibt es eine CNF-Grammatik  $G'$  mit  $L(G') = L \setminus \{\varepsilon\}$ .

# Umwandlung in Chomsky-Normalform

## Satz

Zu jeder kontextfreien Sprache  $L \in \text{CFL}$  gibt es eine CNF-Grammatik  $G'$  mit  $L(G') = L \setminus \{\varepsilon\}$ .

## Beweis

- Sei  $G = (V, \Sigma, P, S)$  eine kontextfreie Grammatik ohne  $\varepsilon$ -Regeln und ohne Variablenumbenennungen für  $L \setminus \{\varepsilon\}$ .
- Wir transformieren  $G$  wie folgt in eine CNF-Grammatik.
- Füge für jedes Terminalsymbol  $a \in \Sigma$  eine neue Variable  $X_a$  zu  $V$  und eine neue Regel  $X_a \rightarrow a$  zu  $P$  hinzu.
- Ersetze alle Vorkommen von  $a$  durch  $X_a$ , außer wenn  $a$  alleine auf der rechten Seite einer Regel steht.
- Ersetze jede Regel  $A \rightarrow B_1 \dots B_k$ ,  $k \geq 3$ , durch die  $k - 1$  Regeln
 
$$A \rightarrow B_1 A_1, A_1 \rightarrow B_2 A_2, \dots, A_{k-3} \rightarrow B_{k-2} A_{k-2}, A_{k-2} \rightarrow B_{k-1} B_k,$$
 wobei  $A_1, \dots, A_{k-2}$  neue Variablen sind.

## Beispiel (Fortsetzung)

- Betrachte die Regeln

$$S \rightarrow abc, aY, bX, cS, c \quad X \rightarrow aS, bXX, a \quad Y \rightarrow bS, aYY, b$$

- Ersetze  $a$ ,  $b$  und  $c$  durch  $A$ ,  $B$  und  $C$  (außer wenn sie alleine rechts vorkommen) und füge die Regeln  $A \rightarrow a$ ,  $B \rightarrow b$ ,  $C \rightarrow c$  hinzu:

$$S \rightarrow ABC, AY, BX, CS, c \quad X \rightarrow AS, BXX, a$$

$$Y \rightarrow BS, AYY, b \quad A \rightarrow a, B \rightarrow b, C \rightarrow c$$

- Ersetze die Regeln  $S \rightarrow ABC$ ,  $X \rightarrow BXX$  und  $Y \rightarrow AYY$  durch die Regeln  $S \rightarrow AS'$ ,  $S' \rightarrow BC$ ,  $X \rightarrow BX'$ ,  $X' \rightarrow XX$  und  $Y \rightarrow AY'$ ,  $Y' \rightarrow YY$ :

$$S \rightarrow AS', AY, BX, CS, c, \quad S' \rightarrow BC \quad X \rightarrow AS, BX', a, \quad X' \rightarrow XX$$

$$Y \rightarrow BS, AY', b, \quad Y' \rightarrow YY \quad A \rightarrow a, B \rightarrow b, C \rightarrow c$$



# Links- und Rechtsableitungen

## Definition

Sei  $G = (V, \Sigma, P, S)$  eine kontextfreie Grammatik.

- Eine Ableitung

$$\underline{S} \Rightarrow l_1 \underline{A_1} r_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow l_{m-1} \underline{A_{m-1}} r_{m-1} \Rightarrow \alpha_m$$

heißt **Linksableitung** von  $\alpha_m$  (kurz  $S \Rightarrow_L^* \alpha_m$ ), falls in jedem Ableitungsschritt die am weitesten links stehende Variable ersetzt wird, d.h. es gilt  $l_i \in \Sigma^*$  für  $i = 1, \dots, m-1$ .

- **Rechtsableitungen**  $S_0 \Rightarrow_R^* \alpha_m$  sind analog definiert.
- $G$  heißt **mehrdeutig**, wenn es ein Wort  $x \in L(G)$  gibt, das zwei verschiedene Linksableitungen hat. Andernfalls heißt  $G$  **eindeutig**.

## Es gilt:

Für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt:  $x \in L(G) \Leftrightarrow S \Rightarrow^* x \Leftrightarrow S \Rightarrow_L^* x \Leftrightarrow S \Rightarrow_R^* x$ .

## Beispiel

- In  $G = (\{S\}, \{a, b\}, \{S \rightarrow aSbS, \varepsilon\}, S)$  gibt es **8** Ableitungen für das Wort  $aabb$ :

$\underline{S} \Rightarrow_L a\underline{S}bS \Rightarrow_L aa\underline{S}bSbS \Rightarrow_L aab\underline{S}bS \Rightarrow_L aabb\underline{S} \Rightarrow_L aabb$

$\underline{S} \Rightarrow a\underline{S}bS \Rightarrow aa\underline{S}bSbS \Rightarrow aabSb\underline{S} \Rightarrow aab\underline{S}b \Rightarrow aabb$

$\underline{S} \Rightarrow a\underline{S}bS \Rightarrow aaSb\underline{S}bS \Rightarrow aa\underline{S}bbS \Rightarrow aabb\underline{S} \Rightarrow aabb$

$\underline{S} \Rightarrow a\underline{S}bS \Rightarrow aaSb\underline{S}bS \Rightarrow aaSbb\underline{S} \Rightarrow aa\underline{S}bb \Rightarrow aabb$

$\underline{S} \Rightarrow a\underline{S}bS \Rightarrow aaSbSb\underline{S} \Rightarrow aa\underline{S}bSb \Rightarrow aab\underline{S}b \Rightarrow aabb$

$\underline{S} \Rightarrow a\underline{S}bS \Rightarrow aaSbSb\underline{S} \Rightarrow aaSb\underline{S}b \Rightarrow aa\underline{S}bb \Rightarrow aabb$

$\underline{S} \Rightarrow aSb\underline{S} \Rightarrow a\underline{S}b \Rightarrow aa\underline{S}bSb \Rightarrow aab\underline{S}b \Rightarrow aabb$

$\underline{S} \Rightarrow_R aSb\underline{S} \Rightarrow_R a\underline{S}b \Rightarrow_R aaSb\underline{S}b \Rightarrow_R aa\underline{S}bb \Rightarrow_R aabb$

- Darunter sind genau eine **Links-** und genau eine **Rechtsableitung**.



## Beispiel

- Die Grammatik  $G = (\{S\}, \{a, b\}, \{S \rightarrow aSbS, \varepsilon\}, S)$  ist eindeutig.
- Dies liegt daran, dass keine Satzform von  $G$  das Teilwort  $Sa$  enthält.
- Daher muss auf die aktuelle Satzform  $y\underline{S}\beta$  einer Linksableitung

$$S \Rightarrow_L^* y\underline{S}\beta \Rightarrow_L^* yz = x$$

genau dann die Regel  $S \rightarrow aSbS$  angewandt werden, wenn in  $x$  auf das Präfix  $y$  ein  $a$  folgt.

- Dagegen ist die Grammatik  $G' = (\{S\}, \{a, b\}, \{S \rightarrow aSbS, ab, \varepsilon\}, S)$  mehrdeutig, da das Wort  $x = ab$  zwei Linksableitungen hat:

$$\underline{S} \Rightarrow ab \text{ und } \underline{S} \Rightarrow a\underline{S}bS \Rightarrow ab\underline{S} \Rightarrow ab.$$



# Gerichtete Bäume und Wälder

Sei  $G = (V, E)$  ein Digraph.

- Ein (gerichteter)  $v_0$ - $v_k$ -Weg in  $G$  ist eine Folge von Knoten  $v_0, \dots, v_k$  mit  $(v_i, v_{i+1}) \in E$  für  $i = 0, \dots, k-1$ . Seine Länge ist  $k$ .
- Ein Weg heißt Pfad, falls alle Knoten paarweise verschieden sind.
- Ein  $u$ - $v$ -Weg der Länge  $\geq 1$  mit  $u = v$  heißt Zyklus.
- $G$  heißt azyklisch, wenn es in  $G$  keinen Zyklus gibt.
- $G$  heißt gerichteter Wald, wenn  $G$  azyklisch ist und jeder Knoten  $v \in V$  Eingangsgrad  $\deg^-(v) \leq 1$  hat.
- Ein Knoten  $u \in V$  vom Ausgangsgrad  $\deg^+(u) = 0$  heißt Blatt.
- Ein Knoten  $w \in V$  heißt Wurzel von  $G$ , falls alle Knoten  $v \in V$  von  $w$  aus erreichbar sind (d.h. es gibt einen  $w$ - $v$ -Weg in  $G$ ).
- Ein gerichteter Wald, der eine Wurzel hat, heißt gerichteter Baum.
- Da die Kantenrichtungen durch die Wahl der Wurzel eindeutig bestimmt sind, kann auf ihre Angabe verzichtet werden. Man spricht dann auch von einem Wurzelbaum.