

# Theoretische Informatik I



## Einheit 2.4

### Grammatiken



1. Arbeitsweise
2. Klassifizierung
3. Beziehung zu Automaten

# BESCHREIBUNGSFORMEN FÜR SPRACHEN

- **Mathematische Mengennotation**

- Prädikate beschreiben **Eigenschaften** der Wörter
- Extrem flexibel, nicht notwendig “berechenbar”

- **Endliche Automaten**

- Beschreibung der **Verarbeitung** von Sprachen
- Schwerpunkt ist **Erkennen** korrekter Wörter

- **Reguläre Ausdrücke**

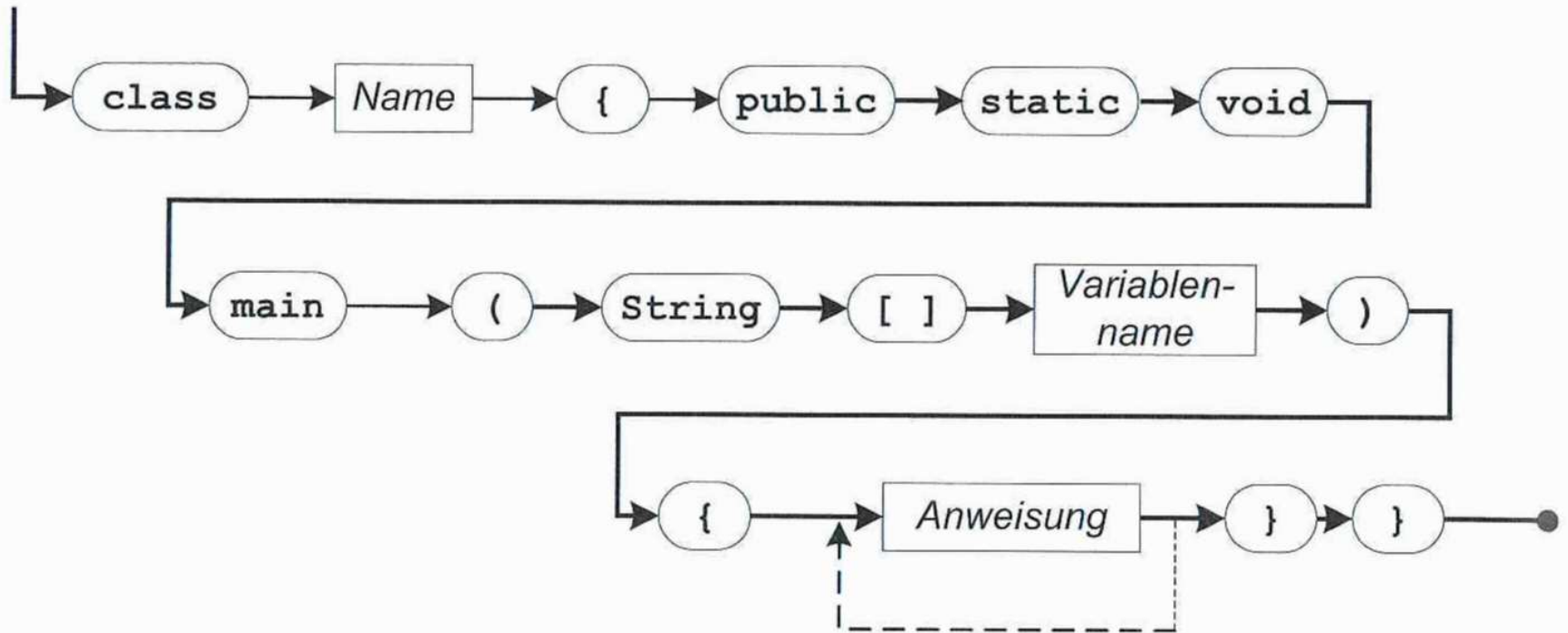
- Beschreibung der **Struktur** der Sprache

- **Grammatiken**

- **Produktionsregeln** beschreiben **Aufbau** der Wörter
- Auch für komplexere Strukturen als reguläre Sprachen
- Gängig für die Beschreibung von **Programmiersprachen**

# BEISPIEL: AUSZUG DER GRAMMATIK VON JAVA

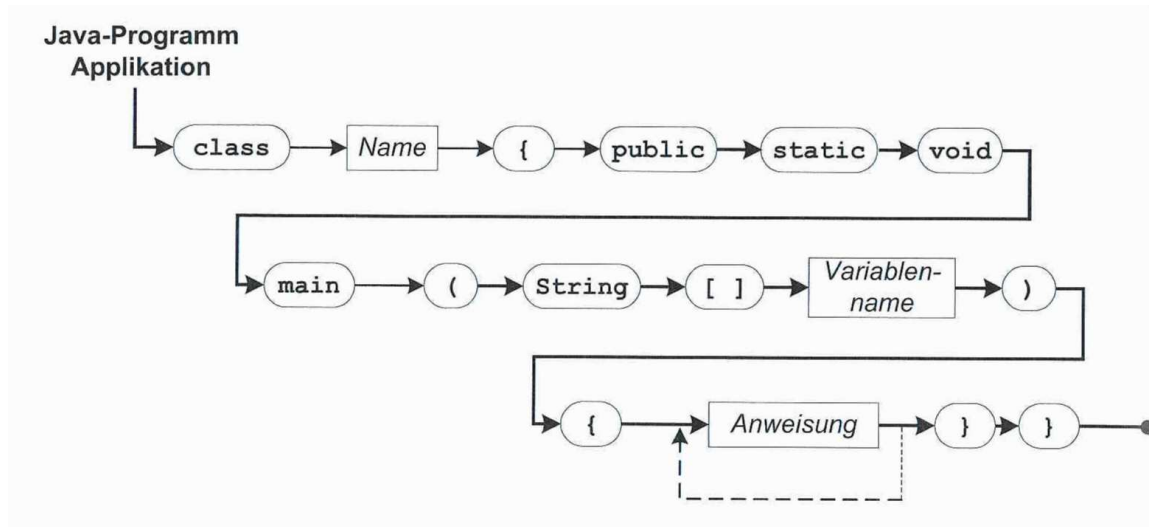
Java-Programm  
Applikation



# KOMPONENTEN VON GRAMMATIKEN

- **Terminalsymbole: Alphabet der Sprache**
  - Symbole, aus denen die erzeugten Wörter bestehen sollen
  - Bei Programmiersprachen meist **ASCII-Symbole ohne Kontrollzeichen**
- **Variablen: Hilfsalphabet für Verarbeitung**
  - Beschreiben die **syntaktischen Kategorien** der Sprache
  - Bei JAVA z.B. **Applikation, Name, Variablenname, Anweisung, ...**
  - Andere Bezeichnung: **Nichtterminale Symbole**
- **Produktionen: Regeln zur Erzeugung von Wörtern**
  - Erklären wie syntaktischen Kategorien aufgebaut sind
  - Erklären **Erzeugung von Wörtern der Sprache** in den einzelnen Kategorien
  - z.B. “Eine Applikation beginnt mit **class** gefolgt von einem Namen, ...”
- **Startsymbol**
  - Erklärt welche syntaktische Kategorie beschrieben werden soll

# GRAMMATIKEN – MATHEMATISCH PRÄZISIERT



Eine **Grammatik** ist ein 4-Tupel  $G = (V, T, P, S)$  mit

- $T$  endliches **Terminalalphabet**
- $V$  endliches **Hilfsalphabet** mit  $V \cap T = \emptyset$
- $P \subseteq \Gamma^+ \times \Gamma^*$  endliche Menge der **Produktionen** (wobei  $\Gamma = V \cup T$ )  
Schreibweise für Produktionen:  $l \rightarrow r \in P$  statt  $(l, r) \in P$
- $S \in V$  **Startsymbol**

## ARBEITSWEISE: PRODUKTION VON WÖRTERN DER ZIELSPRACHE

- $G_1 = (\{S\}, \{0, 1\}, P, S)$  mit  $P = \{S \rightarrow S1, S \rightarrow S0, S \rightarrow \epsilon\}$

Erzeugung von Wörtern:

$$S \rightarrow \epsilon$$

$$S \rightarrow S0 \rightarrow 0$$

$$S \rightarrow S0 \rightarrow S10 \rightarrow S010 \rightarrow S0010 \rightarrow 0010$$

- Nur Wörter über dem Terminalalphabet sind von Interesse
- $\epsilon, 0, 0010$  gehören zur erzeugten Sprache
- $S, S0, S10, S010, S0010$  sind nur “Zwischenschritte”

- $G_2 = (\{S, A, B, C\}, \{0, 1\}, P, S)$  mit

$$P = \{S \rightarrow B, S \rightarrow CA0, A \rightarrow BBB, B \rightarrow C1, B \rightarrow 0, CC1 \rightarrow \epsilon\}$$

Ableitungen:

$$S \rightarrow B \rightarrow 0$$



$$S \rightarrow B \rightarrow C1$$

Erfolglos, kein Wort der Zielsprache erreichbar

$$S \rightarrow CA0 \rightarrow CBBB0 \rightarrow CC1BB0 \rightarrow BB0 \rightarrow 0B0 \rightarrow 000$$



# ARBEITSWEISE VON GRAMMATIKEN – PRÄZISIERT

- **Ableitungsrelation**  $\longrightarrow \subseteq \Gamma^+ \times \Gamma^*$

- $w \longrightarrow z \equiv \exists x, y \in \Gamma^*. \exists l \rightarrow r \in P. w = x l y \wedge z = x r y$

Anwendung von Produktionen auf Wörter

- **Erweiterte Ableitungsrelation**  $\xrightarrow{*} \subseteq \Gamma^+ \times \Gamma^*$

- $w \xrightarrow{0} z \equiv w = z$

- $w \xrightarrow{n+1} z \equiv \exists u \in \Gamma^*. w \longrightarrow u \wedge u \xrightarrow{n} z$

- $w \xrightarrow{*} z \equiv \exists n \in \mathbb{N}. w \xrightarrow{n} z$

- Grammatik durch optionalen Index  $G (\xrightarrow{*} G)$  spezifizierbar

- **Von  $G$  erzeugte Sprache**

- Menge der Terminalwörter, die aus  $S$  abgeleitet werden können

$$L(G) \equiv \{w \in T^* \mid S \xrightarrow{*} w\}$$

# GRAMMATIK FÜR $L = \{0^k 1^l \mid k \leq l\}$

•  $G_3 = (\{S\}, \{0, 1\}, P, S)$  mit  $P = \{S \rightarrow S1, S \rightarrow 0S1, S \rightarrow \epsilon\}$

• Zeige  $L(G_3) = L$  per Induktion über Länge der Ableitung

– Ableitungen der Länge 0 liefern keine Terminalwörter

– Zeige:  $\forall l \in \mathbb{N}. \forall w \in \{0, 1\}^*. S \xrightarrow{l+1} w \Leftrightarrow (\exists k \leq l. w = 0^k 1^l)$

• Basisfall

–  $S \xrightarrow{1} w \Leftrightarrow (S \rightarrow w) \in P \Leftrightarrow w = \epsilon \Leftrightarrow \exists k \leq 0. w = 0^k 1^0$



• Induktionsschritt

– Es gelte  $\forall w \in \{0, 1\}^*. S \xrightarrow{l+1} w \Leftrightarrow (\exists k \leq l. w = 0^k 1^l)$

–  $S \xrightarrow{l+2} v$

$\Leftrightarrow S \rightarrow S1 \xrightarrow{l+1} v \vee S \rightarrow 0S1 \xrightarrow{l+1} v$

$\Leftrightarrow \exists w \in \{0, 1\}^*. S \xrightarrow{l+1} w \wedge (v = w1 \vee v = 0w1)$

$\Leftrightarrow \exists w \in \{0, 1\}^*. \exists k \leq l. w = 0^k 1^l \wedge (v = w1 \vee v = 0w1)$  (Annahme)

$\Leftrightarrow \exists k \leq l. v = 0^k 1^{l+1} \vee v = 0^{k+1} 1^{l+1}$

$\Leftrightarrow \exists k \leq (l+1). v = 0^k 1^{l+1}$





# KLASSIFIZIERUNG VON GRAMMATIKEN

- **allgemein (Typ 0)**: keine Einschränkung an die Produktionen
- **kontextsensitiv (Typ 1)**
  - nur Regeln der Form  $x A y \rightarrow x z y$  oder  $S \rightarrow \epsilon$  ( $x, y, z \in \Gamma^*$ ,  $A \in V$ ,  $z \neq \epsilon$ )  
( $S \rightarrow \epsilon$  nur erlaubt, wenn  $S$  nicht rechts in einer anderen Regel auftaucht)
- **expansiv**
  - nur Regeln der Form  $x \rightarrow z$  mit  $|x| \leq |z|$ , oder  $S \rightarrow \epsilon$  ( $x \in \Gamma^+$ ,  $z \in (\Gamma - \{S\})^+$ )
- **kontextfrei (Typ 2)**
  - nur Regeln der Form  $A \rightarrow z$  ( $z \in \Gamma^*$ ,  $A \in V$ )
- **linear**
  - nur Regeln der Form  $A \rightarrow \epsilon$  oder  $A \rightarrow u B v$  ( $A, B \in V$ ,  $u, v \in T^*$ )
- **rechtslinear (Typ 3)**
  - nur Regeln der Form  $A \rightarrow \epsilon$  oder  $A \rightarrow a B$  ( $A, B \in V$ ,  $a \in T$ )  
Manche Bücher: nur Regeln der Form  $A \rightarrow \epsilon$  oder  $A \rightarrow v B$  ( $A, B \in V$ ,  $v \in T^*$ )
- **linkslinear**
  - nur Regeln der Form  $A \rightarrow \epsilon$  oder  $A \rightarrow B a$  ( $A, B \in V$ ,  $a \in T$ )

# BEISPIELE FÜR GRAMMATIKKLASSEN

- **kontextsensitiv**: Regeln  $x A y \rightarrow x z y$  oder  $S \rightarrow \epsilon$
- **expansiv**: Regeln  $x \rightarrow z$  mit  $|x| \leq |z|$ , oder  $S \rightarrow \epsilon$
- **kontextfrei**: Regeln  $A \rightarrow z$
- **linear**: Regeln  $A \rightarrow \epsilon$  oder  $A \rightarrow u B v$
- **rechtslinear**: Regeln  $A \rightarrow \epsilon$  oder  $A \rightarrow a B$
- **linkslinear**: Regeln  $A \rightarrow \epsilon$  oder  $A \rightarrow B a$

- $G_1 = (\{S\}, \{0, 1\}, P, S)$  mit  $P = \{S \rightarrow S1, S \rightarrow S0, S \rightarrow \epsilon\}$   
– linkslinear, kontextfrei, nicht expansiv, nicht kontextsensitiv ( $S$  rechts,  $S \rightarrow \epsilon$ )
- $G_2 = (\{S, A, B, C\}, \{0, 1\}, P, S)$  mit  
 $P = \{S \rightarrow B, S \rightarrow CA0, A \rightarrow BBB, B \rightarrow C1, B \rightarrow 0, CC1 \rightarrow \epsilon\}$   
– allgemein (keine anderen Bedingungen erfüllt)
- $G_3 = (\{S\}, \{0, 1\}, P, S)$  mit  $P = \{S \rightarrow S1, S \rightarrow 0S1, S \rightarrow \epsilon\}$   
– kontextfrei, nicht expansiv, nicht kontextsensitiv
- $G_4 = (\{S, A, B, C\}, \{a, b, c\}, P, S)$  mit  $P = \{S \rightarrow aSBC, S \rightarrow aBC, CB \rightarrow BC, aB \rightarrow ab, bB \rightarrow bb, bC \rightarrow bc, cC \rightarrow cc\}$   
– expansiv, nicht kontextfrei

# SPRACHKLASSEN

- **Typ-0 Sprachen**
  - Sprachen der Form  $L = L(G)$  für eine beliebige Grammatik  $G$
- **Typ-1 Sprachen (kontextsensitive Sprachen)**
  - Sprachen der Form  $L = L(G)$  für eine kontextsensitive Grammatik  $G$
  - $L$  ist kontextsensitiv g.d.w.  $L = L(G)$  für eine expansive Grammatik  $G$
- **Typ-2 Sprachen (kontextfreie Sprachen)**
  - Sprachen der Form  $L = L(G)$  für eine kontextfreie Grammatik  $G$
- **Lineare Sprachen**
  - Sprachen der Form  $L = L(G)$  für eine lineare Grammatik  $G$
- **Typ-3 Sprachen (reguläre Sprachen)**
  - Sprachen der Form  $L = L(G)$  für eine rechtslineare Grammatik  $G$
  - $L$  ist regulär g.d.w.  $L = L(G)$  für eine linkslineare Grammatik  $G$

$$\mathcal{L}_i \equiv \{ L \mid L \text{ ist Sprache vom Typ } i \}$$

# TYP-3 SPRACHEN VS. REGULÄRE SPRACHEN

## Wie hängen Grammatiken und Automaten zusammen?

- **Automaten verarbeiten Eingabewörter**

- Jedes Symbol wird in einem Schritt abgearbeitet
- Symbol bestimmt, ob Automat im Zustand bleibt oder wechselt

- **Grammatiken erzeugen Wörter**

- Hilfssymbole werden im Endeffekt in Terminalwörter umgewandelt
- Nichtlineare Grammatiken erzeugen mehrere Symbole gleichzeitig
- Ableitungen in rechts-/linkslinearen Grammatiken erzeugen pro Schritt ein Terminalsymbol und verwenden jeweils nur ein Hilfssymbol

- **Wie kann man umwandeln?**

- Konstruiere zu jedem DEA eine äquivalente rechtslineare Grammatik
- Konstruiere zu jeder rechtslinearen Grammatik einen äquivalenten DEA

$$\mapsto \mathcal{L}_3 = \{ L \mid L \text{ ist regulär} \}$$

# UMWANDLUNG VON DEAS IN TYP-3 GRAMMATIKEN

Für jeden DEA  $A$  gibt es eine  
Typ-3 Grammatik  $G$  mit  $L(G) = L(A)$

● Gegeben DEA  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$

- Wandle Abarbeitung von Symbolen in Erzeugung durch Grammatik um
- Setze  $G := (Q, \Sigma, P, q_0)$  mit  $P = \{q \rightarrow aq' \mid \delta(q, a) = q'\} \cup \{q \rightarrow \epsilon \mid q \in F\}$
- $G$  ist per Konstruktion rechtslinear, also vom Typ 3

● Zeige  $L(G) = L(A)$

$$w = w_1..w_n \in L(G)$$

$$\Leftrightarrow q_0 \xrightarrow{*} w_1..w_n$$

$$\Leftrightarrow \exists q_1, \dots, q_n \in Q. q_0 \longrightarrow w_1q_1 \longrightarrow w_1w_2q_2 \longrightarrow \dots \longrightarrow w_1..w_nq_n \longrightarrow w_1..w_n$$

$$\Leftrightarrow \exists q_1, \dots, q_n \in Q. q_0, w_1..w_n \vdash q_1, w_2..w_n \vdash \dots \vdash q_{n-1}, w_n \vdash q_n, \epsilon \wedge q_n \in F$$

$$\Leftrightarrow \exists q_n \in F. q_0, w_1..w_n \vdash^* q_n, \epsilon$$

$$\Leftrightarrow w \in L(A)$$



# UMWANDLUNG VON TYP-3 GRAMMATIKEN IN NEAs

Für jede Typ-3 Grammatik  $G$  gibt es einen  
NEA  $A$  mit  $L(A) = L(G)$

● Gegeben Grammatik  $G = (V, T, P, S)$

- Wandle Erzeugung von Symbolen in Abarbeitung durch DEA um
- Setze  $A := (V, T, \delta, S, F)$  mit  $\delta(X, a) = \{X' \mid X \rightarrow aX' \in P\}$   
und  $F = \{X \in V \mid X \rightarrow \epsilon \in P\}$

● Zeige  $L(A) = L(G)$

$$w = w_1..w_n \in L(A)$$

$$\Leftrightarrow \exists X_n \in F. \quad S, w_1..w_n \vdash^* X_n, \epsilon$$

$$\Leftrightarrow \exists X_1, \dots, X_n \in V. S, w_1..w_n \vdash X_1, w_2..w_n \vdash \dots \vdash X_n, \epsilon \wedge X_n \in F$$

$$\Leftrightarrow \exists X_1, \dots, X_n \in V. S \longrightarrow w_1 X_1 \longrightarrow \dots \longrightarrow w_1..w_n X_n \longrightarrow w_1..w_n$$

$$\Leftrightarrow S \xrightarrow{*} w$$

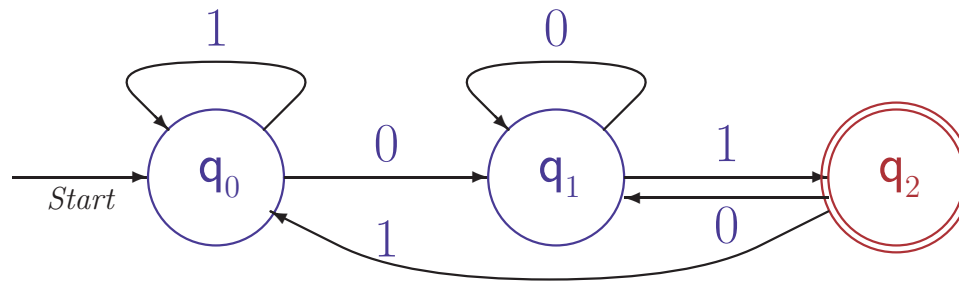
$$\Leftrightarrow w \in L(G)$$



# UMWANDLUNGEN AM BEISPIEL

- **Konvertiere DEA für  $(0+1)^*01$**

- $A = (\{q_0, q_1, q_2\}, \{0,1\}, \delta, q_0, \{q_2\})$  mit



- **Erzeugte Grammatik**

- $G = (\{q_0, q_1, q_2\}, \{0,1\}, P, q_0)$  mit

$$P = \{ q_0 \rightarrow 1q_0, q_0 \rightarrow 0q_1, q_1 \rightarrow 1q_2, q_1 \rightarrow 0q_1, q_2 \rightarrow 1q_0, q_2 \rightarrow 0q_1, q_2 \rightarrow \epsilon \}$$

- **Umwandlung von  $G$  in einen NEA**

- Transformation erzeugt ursprünglichen Automaten

# DIE CHOMSKY HIERARCHIE

$$\mathcal{L}_3 \subset \mathcal{L}_2 \subset \mathcal{L}_1 \subset \mathcal{L}_0$$

## ● Wichtige Vertreter

- $\mathcal{L}_2 - \mathcal{L}_3$ :  $\{0^n 1^n \mid n \in \mathbb{N}\}$
- $\mathcal{L}_1 - \mathcal{L}_2$ :  $\{0^n 1^n 2^n \mid n \in \mathbb{N}\}$
- $\mathcal{L}_0 - \mathcal{L}_1$ :  $\{w_i \in \{0, 1\}^* \mid \text{Das Programm mit Codierung } w_i \text{ hält bei Eingabe } w_i \}$

## ● Zugehörige Automatenmodelle

- $\mathcal{L}_0$ : Turingmaschine
- $\mathcal{L}_1$ : linear platzbeschränkte nichtdeterministische Turingmaschine
- $\mathcal{L}_2$ : nichtdeterministischer endlicher Automat mit Kellerspeicher
- $\mathcal{L}_3$ : endlicher Automat

Mehr in zukünftigen Vorlesungen