Informatik 1

Programming Languages

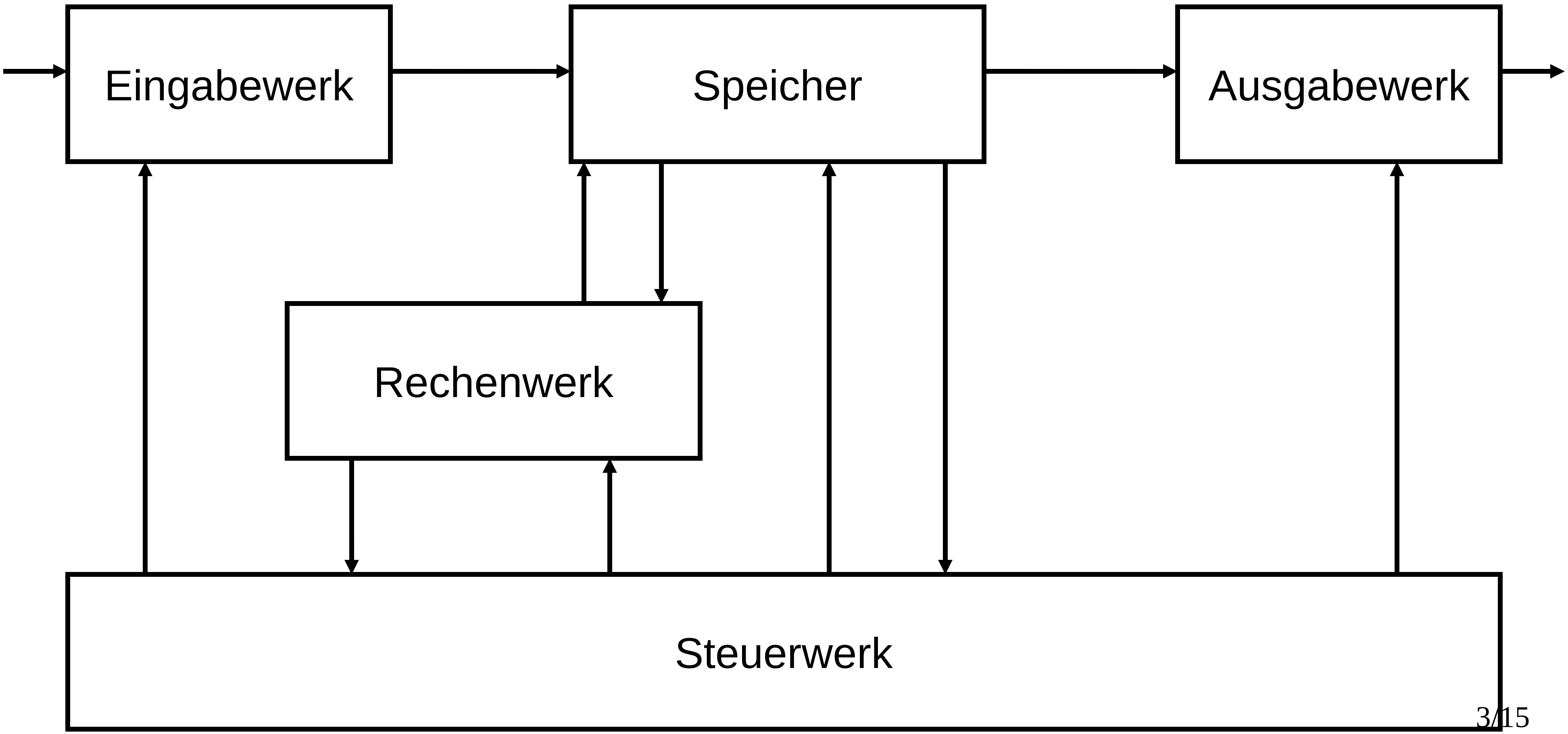
Beschreibung von Programmiersprachen

Wolfram Burgard
Cyrill Stachniss

Motivation und Einleitung

- Wir haben in den vorangehenden Kapiteln meistens vollständige Java-Programme als mögliche Beschreibungen von Algorithmen angegeben.
- Zumindest der Kern von Java gehört (zusammen mit `while`-Programmen und vielen anderen Programmiersprachen) zu der Klasse der **imperativen Programmiersprachen**.
- In diesem Kapitel werden wir die charakteristischen Aspekte imperativer Programmiersprachen diskutieren.
- Darüber hinaus werden wir diskutieren, wie man **Programmiersprachen spezifizieren** kann.
- Schließlich werden wir auch kurz auf **alternative Programmiersprachen** eingehen.

Struktur „normaler“ Computer mit Von-Neumann-Architektur



Eigenschaften dieser Komponenten (1)

- Der **Speicher** besteht aus **fortlaufend nummerierten Zellen**. Speicherzellen können über ihre **Adresse** (symbolisch: über ihren Namen) angesprochen werden.
- **Programm, Daten, Zwischen- und Endergebnis** werden **in demselben Speicher** abgelegt.
- Die im Speicher abgelegten **Befehle** werden über ein durch das **Steuerwerk kontrolliertes Befehlszählregister adressiert**.
- Das **Befehlszählregister** gibt den jeweils **nächsten auszuführenden Befehl** an.
- Es wird **in der Regel um 1 erhöht**, wenn nicht ein **Sprungbefehl eine Änderung der Bearbeitungsreihenfolge** erzwingt.

Eigenschaften dieser Komponenten (2)

- Das **Rechenwerk** enthält Befehle zur **Manipulation der Daten**. Darunter sind unter anderem:
  - arithmetische Befehle
  - logische Befehle
  - Transportbefehle
  - (bedingte) Sprünge
  - Schieben, Unterbrechen, Warten
  - ...
- Die Rechnerstruktur ist problemunabhängig. **Problemabhängigkeit** wird durch ein im **Speicher** abgelegtes **Programm** realisiert.

Programmiersprachen: Abstraktion von der konkreten Architektur

- Die hier angegebene Beschreibung der **Von-Neumann-Rechner-Architektur** ist nur sehr grob.
- Sie ist nur auf die wesentlichen Komponenten beschränkt und sagt nicht, wie z.B. einzelne Befehle heißen und was sie bewirken.
- **Imperative Programmiersprachen orientieren sich** jedoch **an dieser Architektur** und stellen **abstrakte Befehle** zur **Manipulation der Daten** und zur **Kontrolle der Ausführung** zur Verfügung.
- Damit werden sie **unabhängig von dem konkreten Rechner**.
- Der **Compiler** sorgt dann dafür, dass sie in die Sprache des entsprechenden Rechners übersetzt werden.
- Darüber hinaus erlauben sie eine **Strukturierung des Programms**, was die Wartung und Entwicklung deutlich vereinfacht.

Techniken zur Beschreibung der Syntax von Programmiersprachen

- Um Programme übersetzen zu können, muss der Rechner die Programmiersprache kennen, d.h. er muss wissen, was **gültige Programme** sind.
- Programmiersprachen sind **künstliche Sprachen**.
- Eine **Sprache** ist nichts anderes als eine **(im allgemeinen unendliche) Menge von Sätzen**, die jeweils aus **einzelnen Symbolen** bestehen.
- Die einzelnen, **nicht weiter unterteilbaren Symbole** nennt man auch **Tokens** der Sprache.
- Bei der Analyse eines Programms wird es in der so genannten **lexikalischen Analyse** zunächst in die Folge seiner Tokens zerlegt.

Kategorien von Tokens

Reservierte Wörter: Dies sind **Schlüsselwörter**, wie z.B. `boolean`, `int`, `class`, `static` usw.

Konstanten: Dazu gehören **Literale**, wie z.B. `4711L` oder `"Mehrwertsteuer"`.

Sonderzeichen: Z.B. `+`, `-`, `=`, `;`, ... für Operatoren und Begrenzer.

Bezeichner: Alle **benutzerdefinierten Namen** zur Benennung von Variablen, Methoden, etc

Kommentare: Besonders gekennzeichnete Zeichenfolgen, die **vom Compiler übersprungen** werden.

...

Syntax von Programmiersprachen

- Unter der **Syntax einer Programmiersprache** versteht man die Regeln, die **festlegen, was gültige Programme sind**.
- Eine typische Form zur Formulierung dieser Regeln sind so genannte **kontextfreien Grammatiken**.
- Obwohl manche Teile der Syntax-Definition nicht durch kontextfreie Grammatiken erfasst werden können, hat diese Form der Syntaxbeschreibung große Vorteile.
- Dazu gehört insbesondere, dass **Analyseprogramme für Programme** (so genannte **Parser**) **automatisch konstruiert** werden können.

Arithmetische Ausdrücke

Arithmetische Ausdrücke können induktiv folgendermaßen definiert werden:

1. Jede Zahl ist ein arithmetischer Ausdruck.
2. Ist E ein arithmetischer Ausdruck, so ist auch (E) ein arithmetischer Ausdruck.
3. Sind E_1 und E_2 arithmetische Ausdrücke, so sind auch $E_1 + E_2$, $E_1 - E_2$ und $E_1 * E_2$, E_1 / E_2 arithmetische Ausdrücke.
4. Nur die auf diese Weise erhältlichen Zeichenreihen sind syntaktisch korrekt gebildete, arithmetische Ausdrücke.

Eine kontextfreie Grammatik für arithmetische Ausdrücke

$$\langle \text{Ziffer} \rangle \rightarrow 0 \,|\, 1 \,|\, 2 \,|\, 3 \,|\, 4 \,|\, 5 \,|\, 6 \,|\, 7 \,|\, 8 \,|\, 9$$

$$\langle \text{Zahl} \rangle \rightarrow \langle \text{Ziffer} \rangle \,|\, \langle \text{Ziffer} \rangle \langle \text{Zahl} \rangle$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \rightarrow \langle \text{Zahl} \rangle$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \rightarrow (\langle \text{Ausdruck} \rangle)$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \rightarrow \langle \text{Ausdruck} \rangle + \langle \text{Ausdruck} \rangle$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \rightarrow \langle \text{Ausdruck} \rangle - \langle \text{Ausdruck} \rangle$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \rightarrow \langle \text{Ausdruck} \rangle * \langle \text{Ausdruck} \rangle$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \rightarrow \langle \text{Ausdruck} \rangle / \langle \text{Ausdruck} \rangle$$

Typen von Symbolen in Grammatiken

Bei den einzelnen Symbolen unterscheidet man:

Metasymbole: Zeichen wie → und |, die **zur Formulierung der Regeln benötigt** werden.

Terminalsymbole: Sie entsprechen den **Tokens der Sprache** und sind die einzigen Zeichen, die in Sätzen der Sprache auftreten können. In unserem Beispiel sind dies 0, 1, 2 , 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, (,), +, - und *.

Nichtterminalsymbole: Dies sind die in spitze Klammern eingeschlossenen Zeichenreihen. Sie werde manchmal auch **Variablen oder syntaktische Kategorien** genannt.

Bedeutung der Komponenten

- Die oben angegebene Grammatik besteht aus einer Menge von **Regeln** oder **Produktionen**.
- Mit Hilfe der Regeln lassen sich, ausgehend von einem Startsymbol (hier: <Ausdruck>), Zeichenreihen erzeugen, indem man ein Vorkommen **eines Nichtterminalsymbols**, das **auf der linken Seite einer Regel** vorkommt, in der Zeichenreihe **durch die rechte Seite ersetzt**.
- Tritt auf der rechten Seite das **Metasymbol |** auf, so fasst man die dadurch abgetrennten Zeichenreihen als **alternative Ersetzungsmöglichkeiten** auf.
- Die erste Regel ist somit als Abkürzung für zehn einzelne Regeln der Form:

$$\langle \text{Ziffer} \rangle \rightarrow n$$

für $n = 0, \ldots, 9$ aufzufassen

Anwendungsbeispiele

$$\langle \text{Ziffer} \rangle \to 0\,|\,1\,|\,2\,|\,3\,|\,4\,|\,5\,|\,6\,|\,7\,|\,8\,|\,9$$

$$\langle \text{Zahl} \rangle \to \langle \text{Ziffer} \rangle \,|\, \langle \text{Ziffer} \rangle \langle \text{Zahl} \rangle$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \to \langle \text{Zahl} \rangle$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \to (\langle \text{Ausdruck} \rangle)$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \to \langle \text{Ausdruck} \rangle + \langle \text{Ausdruck} \rangle$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \to \langle \text{Ausdruck} \rangle - \langle \text{Ausdruck} \rangle$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \to \langle \text{Ausdruck} \rangle * \langle \text{Ausdruck} \rangle$$

$$\langle \text{Ausdruck} \rangle \to \langle \text{Ausdruck} \rangle / \langle \text{Ausdruck} \rangle$$

Anwendungsbeispiel

$$
\begin{aligned}
\langle\text{Ausdruck}\rangle \quad & \text{Þ} \quad \langle\text{Ausdruck}\rangle * \langle\text{Ausdruck}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(\langle\text{Ausdruck}\rangle\big) * \langle\text{Ausdruck}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(\langle\text{Ausdruck}\rangle + \langle\text{Ausdruck}\rangle\big) * \langle\text{Ausdruck}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(\langle\text{Zahl}\rangle + \langle\text{Ausdruck}\rangle\big) * \langle\text{Ausdruck}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(\langle\text{Zahl}\rangle\langle\text{Ziffer}\rangle + \langle\text{Ausdruck}\rangle\big) * \langle\text{Ausdruck}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(\langle\text{Ziffer}\rangle\langle\text{Ziffer}\rangle + \langle\text{Ausdruck}\rangle\big) * \langle\text{Ausdruck}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(1\langle\text{Ziffer}\rangle + \langle\text{Ausdruck}\rangle\big) * \langle\text{Ausdruck}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(17 + \langle\text{Ausdruck}\rangle\big) * \langle\text{Ausdruck}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(17 + \langle\text{Zahl}\rangle\big) * \langle\text{Ausdruck}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(17 + 4\big) * \langle\text{Ausdruck}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(17 + 4\big) * \langle\text{Zahl}\rangle\langle\text{Ziffer}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(17 + 4\big) * \langle\text{Zahl}\rangle\langle\text{Ziffer}\rangle\langle\text{Ziffer}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(17 + 4\big) * \langle\text{Ziffer}\rangle\langle\text{Ziffer}\rangle\langle\text{Ziffer}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(17 + 4\big) * 3\langle\text{Ziffer}\rangle\langle\text{Ziffer}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(17 + 4\big) * 3\langle\text{Ziffer}\rangle\langle\text{Ziffer}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(17 + 4\big) * 37\langle\text{Ziffer}\rangle \\
& \text{Þ} \quad \big(17 + 4\big) * 372
\end{aligned}
$$

Eine formale Definition von Grammatiken

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

1. Einer Menge V von **Nichtterminalsymbolen** (Variablen),
2. einer Menge T von **Terminalsymbolen** (Tokens) mit $V \cap T = \emptyset$,
3. einer Menge P von **Produktionen** (Regeln) der Form $p \rightarrow q$ mit $p \in (V \cup T)^*$ und $q \in (V \cup T)^*$ sowie
4. einem **Startsymbol** $S \in V$.

Hierbei bedeutet $v \in V^*$, dass v eine **Zeichenkette** ist, die aus den Variablen in V gebildet wird.

Ableitbarkeit

- Sei $x=x_1...p...x_n$ ein Wort aus $(V \cup T)^*$, das die linke Seite einer Regel $p \rightarrow q \in P$ enthält.

- Dann kann man durch Ersetzen von p durch q in x ein Wort $y=y_1...q...y_n$ erhalten und schreibt dafür: $x \Rightarrow y$ oder, falls erforderlich, oder $x \underset{G}{\Rightarrow} y$ $x \underset{p \rightarrow q}{\Rightarrow} y$

  Wir sagen, dass ***y* in einem Schritt aus *x* ableitbar** ist.

- ***y* heißt ableitbar aus *x*** mithilfe von G, kurz $x \overset{*}{\underset{G}{\Rightarrow}} y$, wenn entweder $x=y$ ist oder es Worte $x_1, x_2, \ldots, x_n$ gibt mit $x=x_1$ und $y=x_n$, $x_i \underset{G}{\Rightarrow} x_{i+1}$ und $n \geq 2$, für $i=1, \ldots, n-1$.

Von einer Grammatik erzeugte Sprache

- Die **von einer Grammatik erzeugte Sprache** ist die Menge der aus dem Startsymbol ableitbaren Worte, die nur aus Terminalzeichen bestehen:

$$L(G) = \left\{ W \mid S \stackrel{*}{\Longrightarrow} W \text{ und } W \in T^* \right\}.$$

- *L(G)* ist also die **Menge aller aus dem Startsymbol in endlich vielen Schritten ableitbaren Terminalzeichenreihen**.
- Meistens gibt man nur die Produktionen von *G* an und legt damit *V* und *T* implizit fest.
- Für unsere Grammatik *G* zur Definition arithmetischer Ausdrücke ist also *L(G)* die Menge aller syntaktisch korrekt gebildeten, arithmetischen Ausdrücke.

Beispiel (1)

G=(V,T,P,S) sei eine Grammatik mit

$$V = \{S, A, B\}$$

$$T = \{a, b\}$$

$$P = \{S \to AB, A \to AA, A \to a, B \to BB, B \to b\}$$

Dann sieht man leicht, dass gilt:

$$L(G) = \{a^m b^n \mid m, n \geq 1 \,\text{und}\, m, n \in \mathbb{N}\}$$

Beispiel (2)

G=(V,T,P,S) sei eine Grammatik mit

$$V = \{S\}$$

$$T = \{a, b\}$$

$$P = \{S \rightarrow aSb, S \rightarrow \varepsilon\}$$

wobei ε das leere Wort bezeichnet. Dann ist

$$L(G) = \{a^n b^n \mid n \geq 0 \,\text{und}\, n \in \mathbb{N}\}$$

- Offensichtlich kann man mit Regeln dieser Art **Klammerstrukturen** erzeugen.
- In Java kommen solche Strukturen z.B. in Form von `{...}` oder `if ... then ... else` vor.

Typen von Grammatiken

- Nach der Art der zugelassenen Regeln klassifiziert man Grammatiken in verschiedene Typen (Chomsky-Hierarchie: Typ 0 bis Typ 3).
- Dies geht zurück auf Noam Chomsky, 1959, und wird in der theoretischen Informatik genauer studiert.

Die Chomsky-Hierarchie

Typ	Bezeichnung	Regelart $p \to q$
0	**unbeschränkte Grammatiken**	$p \in (V \cup T)^* \setminus \{\epsilon\}$ $q \in (V \cup T)^*$
1	**kontextsensitive Grammatiken** oder monotone Grammatiken	$p \in (V \cup T)^* \setminus \{\epsilon\}$ $q \in (V \cup T)^*$ Länge$(p) \leq$ Länge(q)
2	**kontextfreie Grammatiken**	$p \in V$ $q \in (V \cup T)^*$
3	**reguläre Grammatiken** d.h. linkslineare Grammatiken oder rechtslineare Grammatiken mit	$p \to qt \mid \epsilon$ $p \to tq \mid \epsilon$ $p, q \in V, t \in T$

Ein Beispiel für eine Typ-0-Grammatik

- Beide oben angegebenen Sprachen sind kontextfrei!
- Betrachten wir die folgende Typ-0-Grammatik:

$V = \{S,a,b,c,d,n\}$, $T = \{0,1\}$,
$P = \{S \to anb,\ d \to 0,\ d \to 1,\ n \to d,\ n \to dn,\ 1b \to b0,\ 0b \to c1,\ ab \to 1,$
$1c \to c1,\ 0c \to c0,\ ac \to \in \}$

Anwendungen:

Vergleich dieser Sprachtypen

- Eine Sprache *L* heißt vom Typ *i*, 0 £ *i* £ 3, wenn es eine Grammatik vom Typ *i* gibt mit *L=L(G)*.
- Bezeichnet L_i die Familie der Sprachen vom Typ *i*, so gilt der (hier nicht bewiesene) **Hierarchiesatz**:

$$L_o \supset L_1 \supset L_2 \supset L_3$$

- Somit ist jede Sprache vom Typ *i* echt mächtiger als eine Sprache vom Typ *i*+1.

Existiert eine Grammatik für Java?

- Es ist möglich, eine Grammatik *G* anzugeben, so dass *L(G)* die Menge der korrekt gebildeten Java-Programme ist (bis auf die semantischen Nebenbedingungen).
- Aufgrund der semantischen Nebenbedingungen kann ein der Grammatik entsprechendes Java-Programm eventuell nicht übersetzbar sein.
- Beispielsweise kann man aus der Grammatik nicht ableiten, dass eine Variable erst deklariert werden muss, bevor sie benutzt wird.
- Eine Grammatik für Java findet man z.B. in: R. Kühnel, Java Fibel, Addison Wesley, 1996, Anhang A.

Backus-Naur-Form (BNF)

- Für die Spezifikation der Syntax von Programmiersprachen verwendet man häufig kontextfreie Grammatiken.
- Allerdings werden die Regeln meist in der **Backus-Naur-Form** (BNF) dargestellt:
  - Anstelle von → wird ::= (oder =) verwendet.
  - Mit dem Metasymbol | werden Regeln zusammengefasst.
  - Nichtterminalsymbole werden als in spitzen Klammern eingeschlossene Zeichenreihen repräsentiert.
- Beispiel:

<Zahl> ::= <Ziffer> | <Zahl><Ziffer>
<Ziffer> ::= 0|1|2|3|4|5|6|7|8|9

Erweiterte Backus-Naur-Form (EBNF)

- Hierbei stehen Terminalzeichen in Anführungszeichen oder werden anderweitig hervorgehoben.
- Für $n \geq 0$ Wiederholungen verwendet man die Notation `{...}`.
- Optionale Teile hingegen werden in eckige Klammern `[...]` eingeschlossen.
- Lässt man führende Nullen zu, so kann man eine `Integer`-Zahl folgendermaßen beschreiben:

Integer ::= [+|-]Ziffer{Ziffer}

Zusammenfassung

- **Imperative Programmiersprachen** wie Java **orientieren sich an der Funktionsweise der Von-Neumann-Rechner**.
- Sie stellen **abstrakte Anweisungen** zur Verfügung.
- Zur Beschreibung von Programmiersprachen verwendet man **Grammatiken**.
- Die von einer **Grammatik erzeugte Sprache** ist die Menge aller in **endlich vielen Schritten ableitbaren, variablenfreie Zeichenketten**.
- Je nach **Struktur der Regeln** sind **Grammatiken unterschiedlich mächtig**.
- Die **Chomsky-Hierarchie klassifiziert** verschiedene Arten von **Grammatiken**.
- Die **(erweiterte) Backus-Naur-Form** ist eine typische Art **Grammatiken von Programmiersprachen** zu **notieren**.