Einführung in den Compilerbau

Einleitung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Andreas Koch
Fachgebiet Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Fachbereich Informatik

Embedded Systems & Applications

Compiler

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Schnittstelle zwischen
  - Programmiersprache
  - Maschine

Compiler

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Schnittstelle zwischen
  - Programmiersprache
  - Maschine

  Programmiersprache Gut für Menschen handhabbar
    - Smalltalk
    - Java
    - C++

Compiler

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Schnittstelle zwischen
  - Programmiersprache
  - Maschine

Programmiersprache Gut für Menschen handhabbar

- Smalltalk
- Java
- C++

Maschine Getrimmt auf

- Ausführungsgeschwindigkeit
- Preis/Chip-Fläche
- Energieverbrauch
- Nur selten: Leichte Programmierbarkeit

Auswirkung von Compilern

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Entscheidet über dem Benutzer zugängliche Rechenleistung

Auswirkung von Compilern

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Entscheidet über dem Benutzer zugängliche Rechenleistung

Beispiel: Bildkompression auf Dothan CPU, 2 GHz

Compiler	Ausführungszeit	Programmgröße
GCC 3.3.6	7,5 ms	13 KB

Auswirkung von Compilern

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Entscheidet über dem Benutzer zugängliche Rechenleistung

Beispiel: Bildkompression auf Dothan CPU, 2 GHz

Compiler	Ausführungszeit	Programmgröße
GCC 3.3.6	7,5 ms	13 KB
ICC 9.0	6,5 ms	511 KB

Programmiersprachen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Hohe Ebene:
Smalltalk, Java, C++

```
let
  var i : Integer;
in
  i := i + 1;
```

Programmiersprachen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Hohe Ebene:
Smalltalk, Java, C++

```
let
  var i : Integer;
in
  i := i + 1;
```

Mittlere Ebene:
Assembler

```
LOAD  R1, (i)
LOADI R2, 1
ADD   R1, R1, R2
STORE R1, (i)
```

Programmiersprachen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Hohe Ebene:
Smalltalk, Java, C++

```
let
  var i : Integer;
in
  i := i + 1;
```

Mittlere Ebene:
Assembler

```
LOAD  R1, (i)
LOADI R2, 1
ADD   R1, R1, R2
STORE R1, (i)
```

Niedrige Ebene:
Maschinensprache

```
0110000100000110
0111001001000001
1011000100010010
1001000100000110
```

Unterschiedliche Abstraktionsebenen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Auf unteren Ebenen immer feinere Beschreibung
- Immer näher an Zielmaschine (Hardware)
- Details werden von Compiler hinzugefügt
  - Durch verschiedenste Algorithmen

Unterschiedliche Abstraktionsebenen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Auf unteren Ebenen immer feinere Beschreibung
- Immer näher an Zielmaschine (Hardware)
- Details werden von Compiler hinzugefügt
  - Durch verschiedenste Algorithmen
    - Analyse von Programmeigenschaften
    - Verfeinerung der Beschreibung durch Synthese von Details

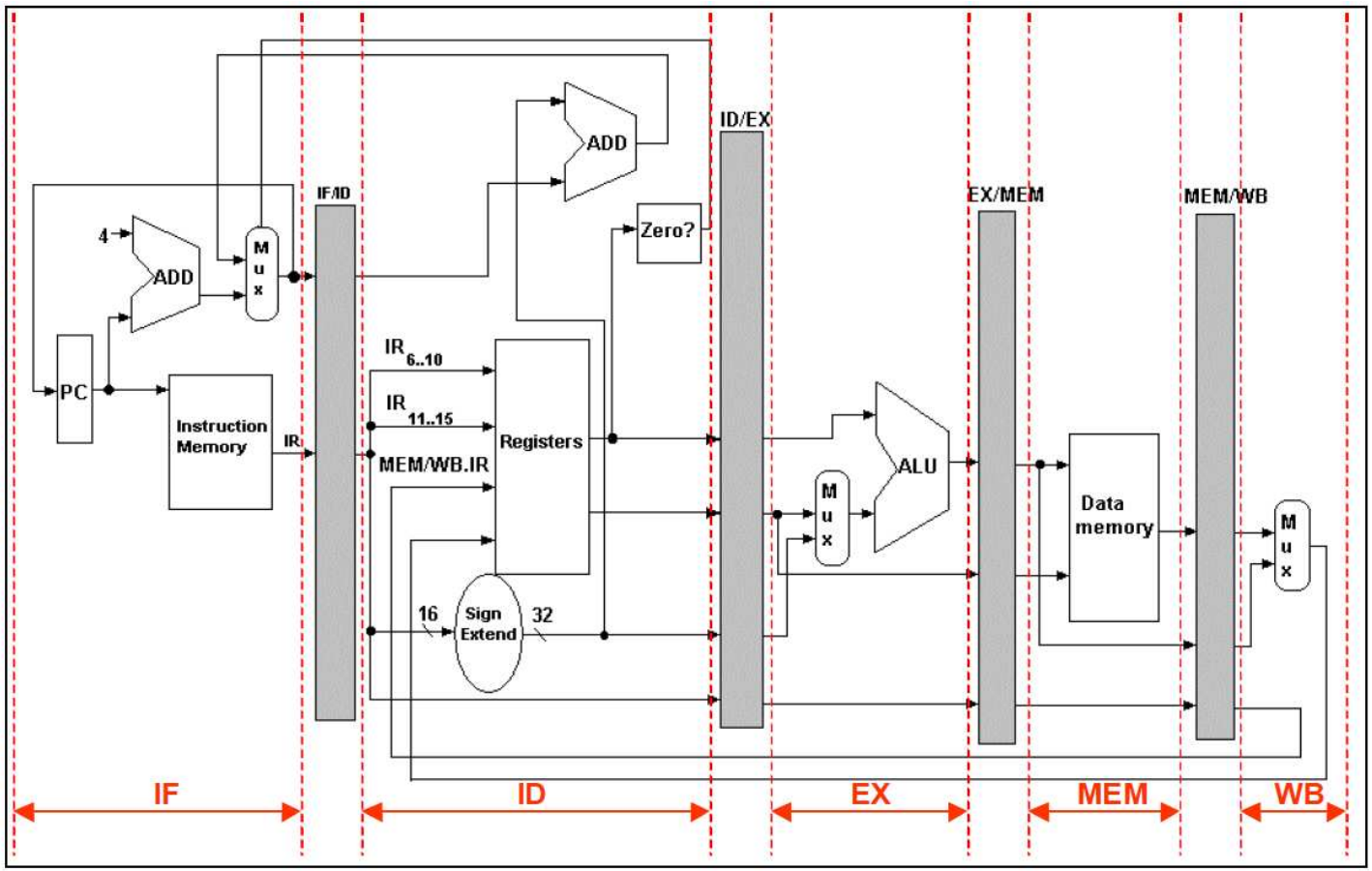
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Auswirkungen der Zielmaschine

Embedded Systems & Applications

Einfach: Hennessy & Patterson DLX

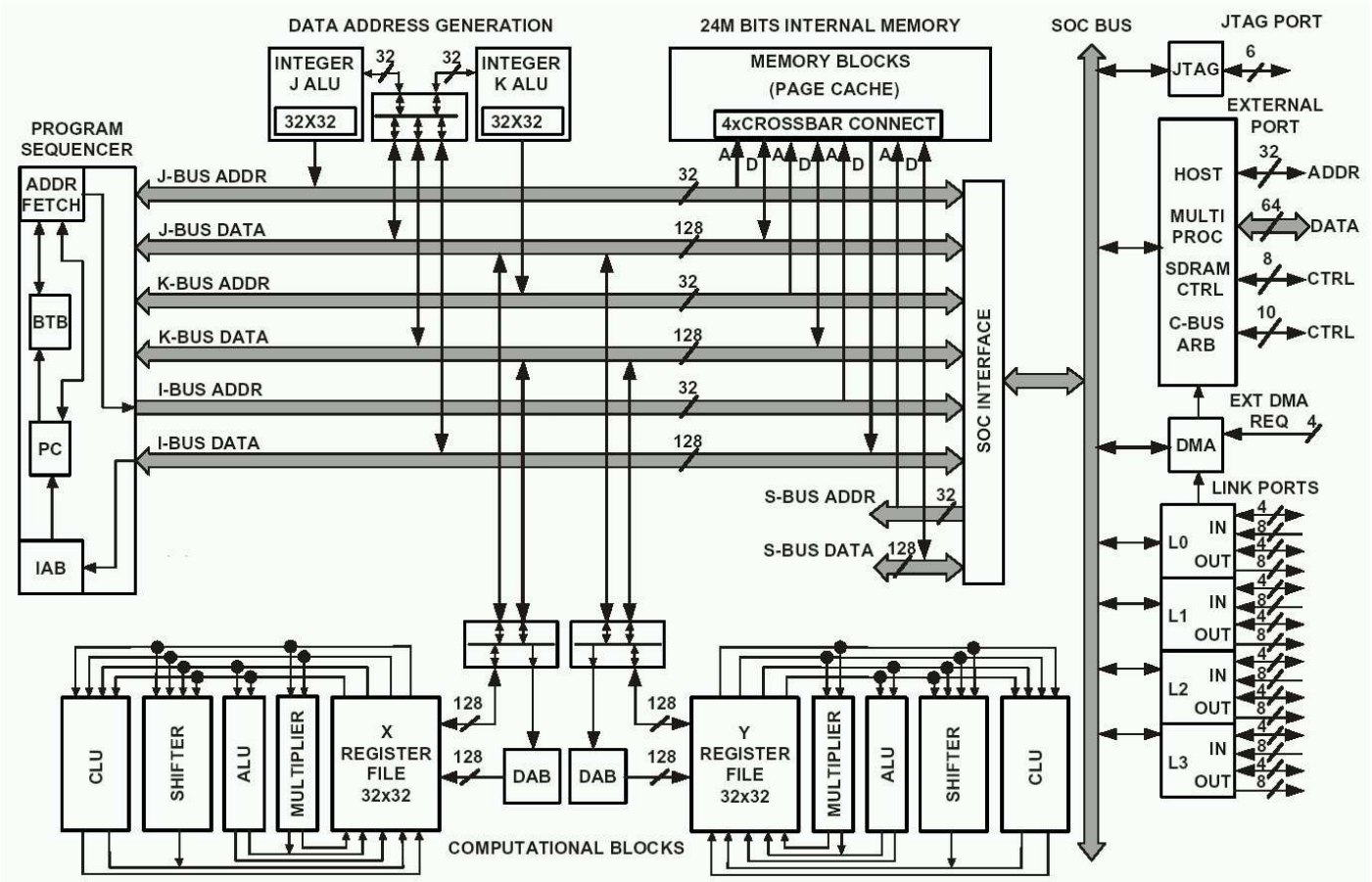
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Embedded Systems & Applications

Komplizierter: Analog Devices TigerSHARC

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

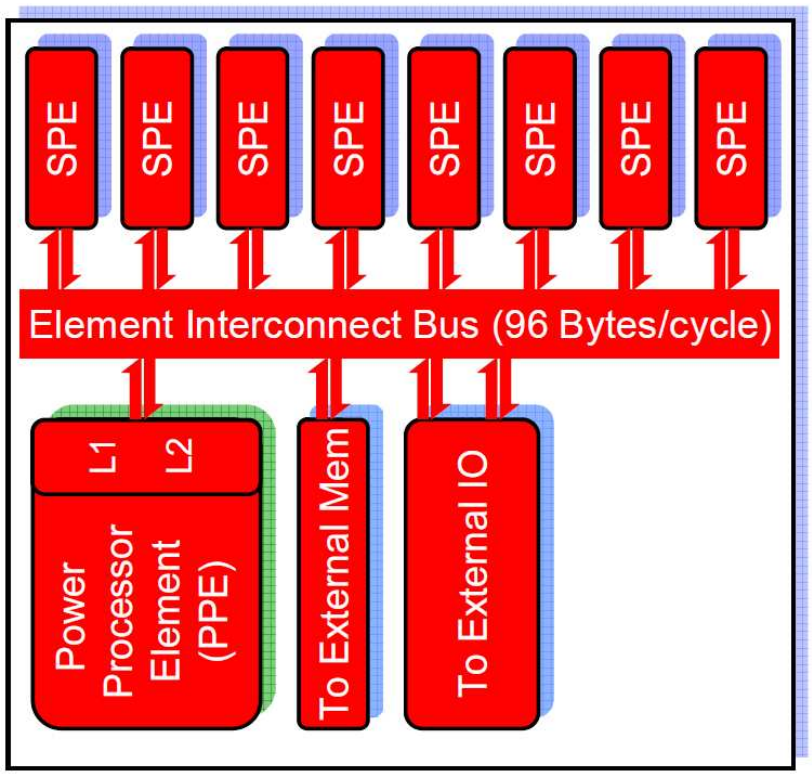


Embedded Systems & Applications

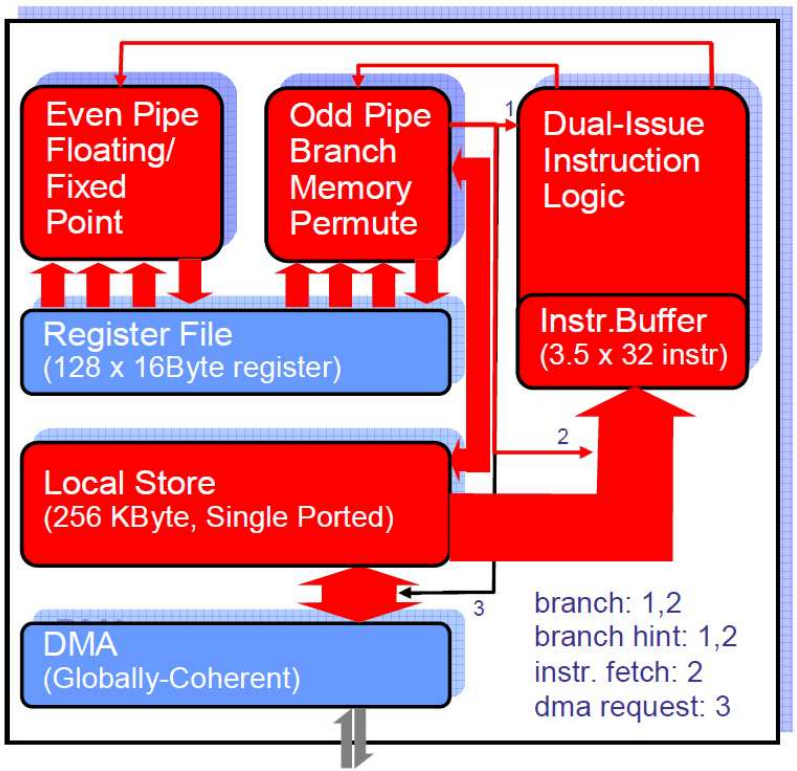
Problematisch: IBM/Sony Cell Processor

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Übersicht



SPE



Embedded Systems & Applications

Spezialisierte Anforderungen an CPUs

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Je nach Anwendungsgebiet mehr oder weniger wichtig . . .

- Rechenleistung (hoch/niedrig)
- Datentypen (Gleitkomma, ganzzahlig, Vektoren)
- Operationen (Multiplikationen, MACs)
- Speicherbandbreite (parallele Speicherzugriffe)
- Energieeffizienz
- Platzbedarf (für den Prozessorchip)

Spezialisierte Anforderungen an CPUs

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Je nach Anwendungsgebiet mehr oder weniger wichtig . . .

- Rechenleistung (hoch/niedrig)
- Datentypen (Gleitkomma, ganzzahlig, Vektoren)
- Operationen (Multiplikationen, MACs)
- Speicherbandbreite (parallele Speicherzugriffe)
- Energieeffizienz
- Platzbedarf (für den Prozessorchip)

. . . können häufig nur durch spezialisierte Prozessoren erfüllt werden

Spezialisierte Anforderungen an CPUs

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Je nach Anwendungsgebiet mehr oder weniger wichtig . . .

- Rechenleistung (hoch/niedrig)
- Datentypen (Gleitkomma, ganzzahlig, Vektoren)
- Operationen (Multiplikationen, MACs)
- Speicherbandbreite (parallele Speicherzugriffe)
- Energieeffizienz
- Platzbedarf (für den Prozessorchip)

. . . können häufig nur durch spezialisierte Prozessoren erfüllt werden

➥**Benötigen passende Compiler**

Königsklasse: Paralleles Rechnen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

DOI:10.1145/1461928.1461946

Research and education in compiler technology is more important than ever.

BY MARY HALL, DAVID PADUA, AND KESHAV PINGALI

Compiler Research: The Next 50 Years

Communications of the Association for Computing Machinery (CACM), Februar 2009

Embedded Systems & Applications

Technologie

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Taktfrequenz von Prozessoren nur mit Mühe steigerbar
- Trend weg von hochgetakteten Einzelprozessoren
- . . . hin zu vielen (aber langsameren) Prozessoren
- Wie parallele Strukturen programmieren?
- Erste praktische Ansätze
  - OpenMP: Mehr-Kern-CPUs
  - NVidia CUDA: GPUs
  - OpenCL: Heterogene Systeme (GPUs+CPUs, experimentell auch schon FPGAs)
- Aber noch wenig abstrakt
- *Keine* automatische Parallelisierung!

Extrem wichtiges Anwendungsgebiet: Ausführung von Machine Learning-Berechnungen (z.B. TensorFlow XLA, Glow, etc.)

Motivation: Compilerbau in der Lehre

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Kombination von verschiedenen Feldern der Informatik

- Theoretische Informatik (Parsing)
- Technische Informatik (Architektur der Zielmaschine)
- Praktische Informatik (Software-Engineering beim Aufbau des Compilers)

Motivation: Compilerbau in der Lehre

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Kombination von verschiedenen Feldern der Informatik

- Theoretische Informatik (Parsing)
- Technische Informatik (Architektur der Zielmaschine)
- Praktische Informatik (Software-Engineering beim Aufbau des Compilers)

➥**Programmieraufgaben betreffen alle Felder!**

Motivation: Compilerbau im Beruf

Auszug aus `www.compilerjobs.com`

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Apple Computer

Job Title	Sr Compiler Engineer
Posting Date	1/30/2006
Job Location	
Description	

Siemens

Job Title	Principal Compiler Engineer
Posting Date	
Job Location	
Description	

Sony Computer Entertainment

Job Title	Compiler Engineer
Posting Date	
Job Location	
Description	

RWTH University

Job Title	Research assistant/PhD candidate
Posting Date	11/15/2005
Job Location	Aachen, Germany
Description	The SSS division performs research and development on electronic design automation tools for embedded systems, e.g. future telecommunication and multimedia systems. Major research areas include compilers for

Embedded Systems & Applications

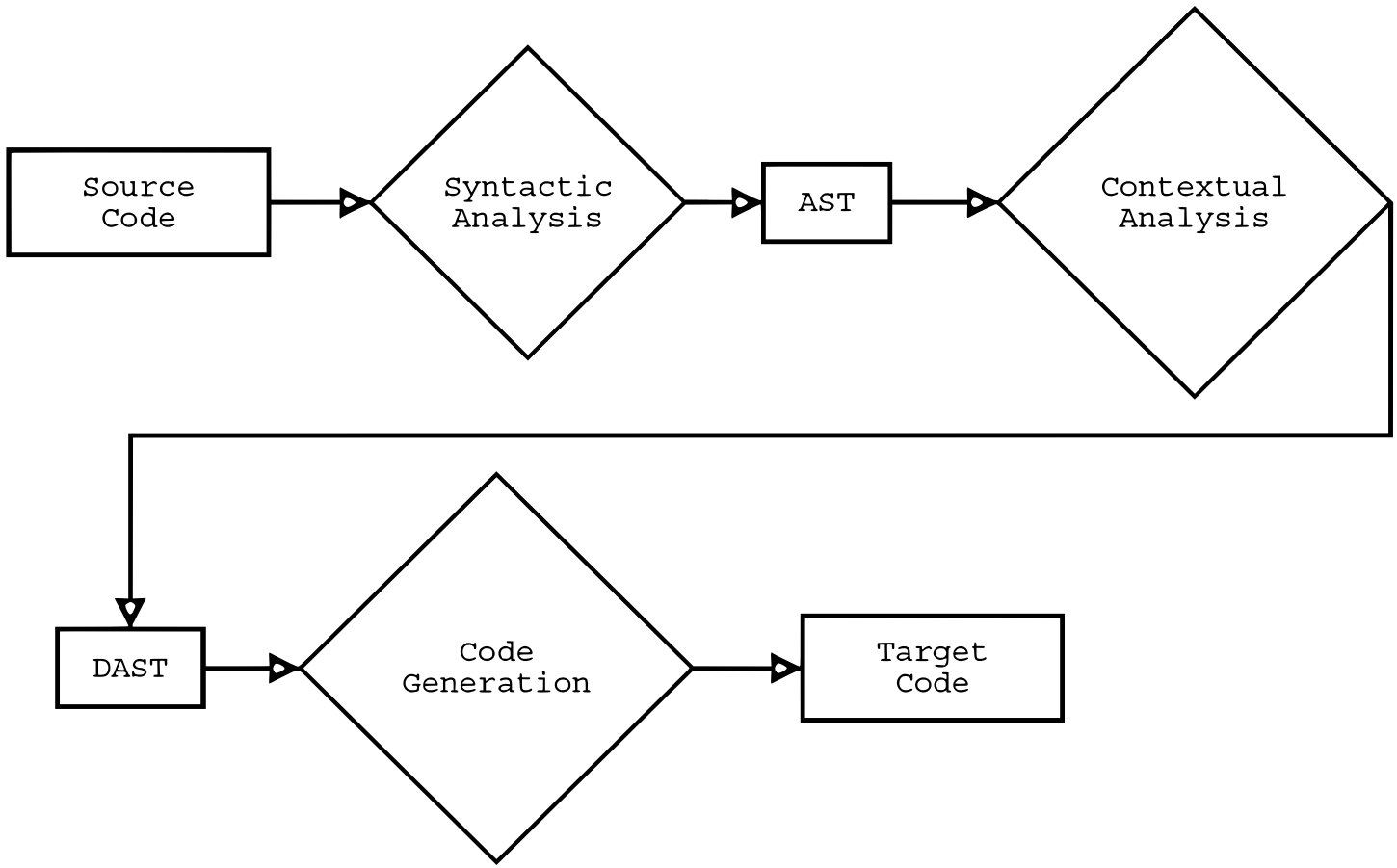
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Aufbau von Compilern

Embedded Systems & Applications

Vorgehen: Bearbeitung in mehreren Phasen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Zwischendarstellung(en) für den Informationsaustausch

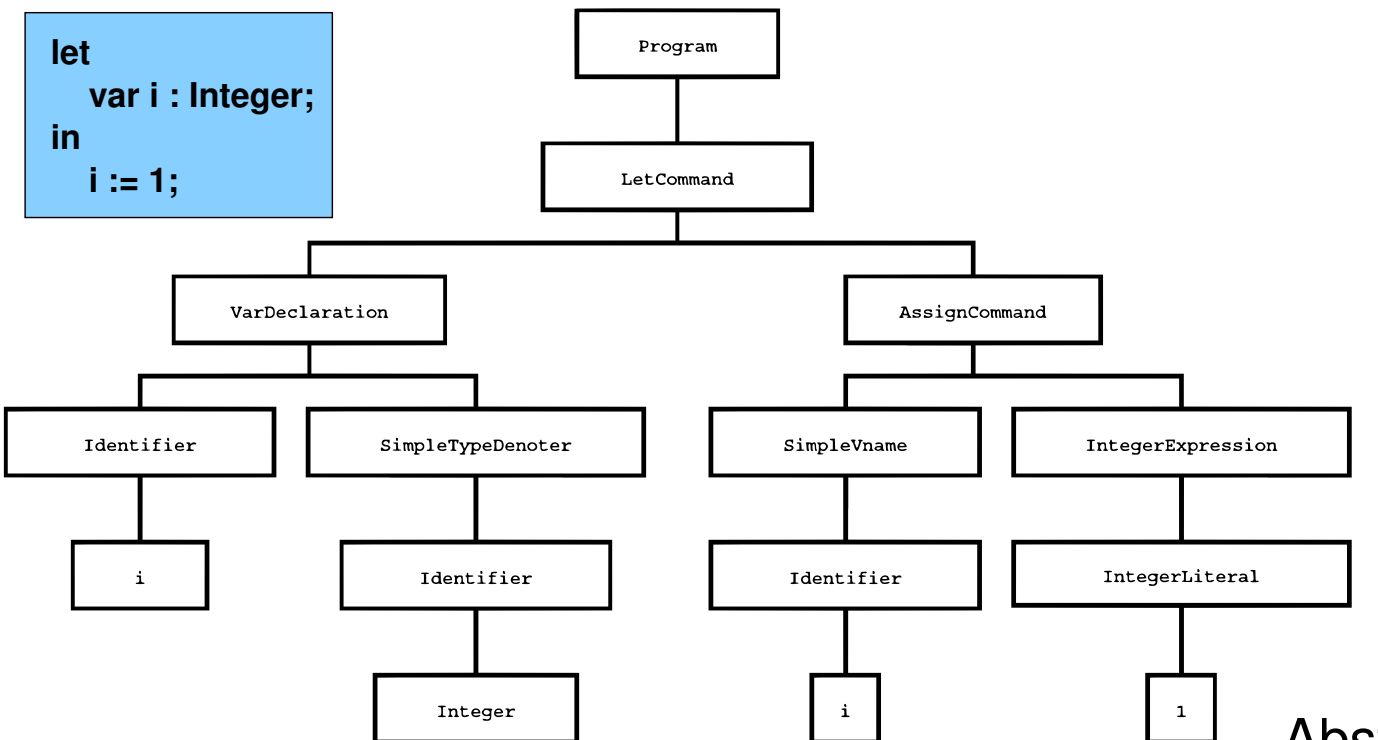
Embedded Systems & Applications

Syntaxanalyse

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Überprüfung ob Programm Syntaxregeln gehorcht
- Speichern des Programmes in geeigneter Darstellung

```
let
   var i : Integer;
in
   i := 1;
```



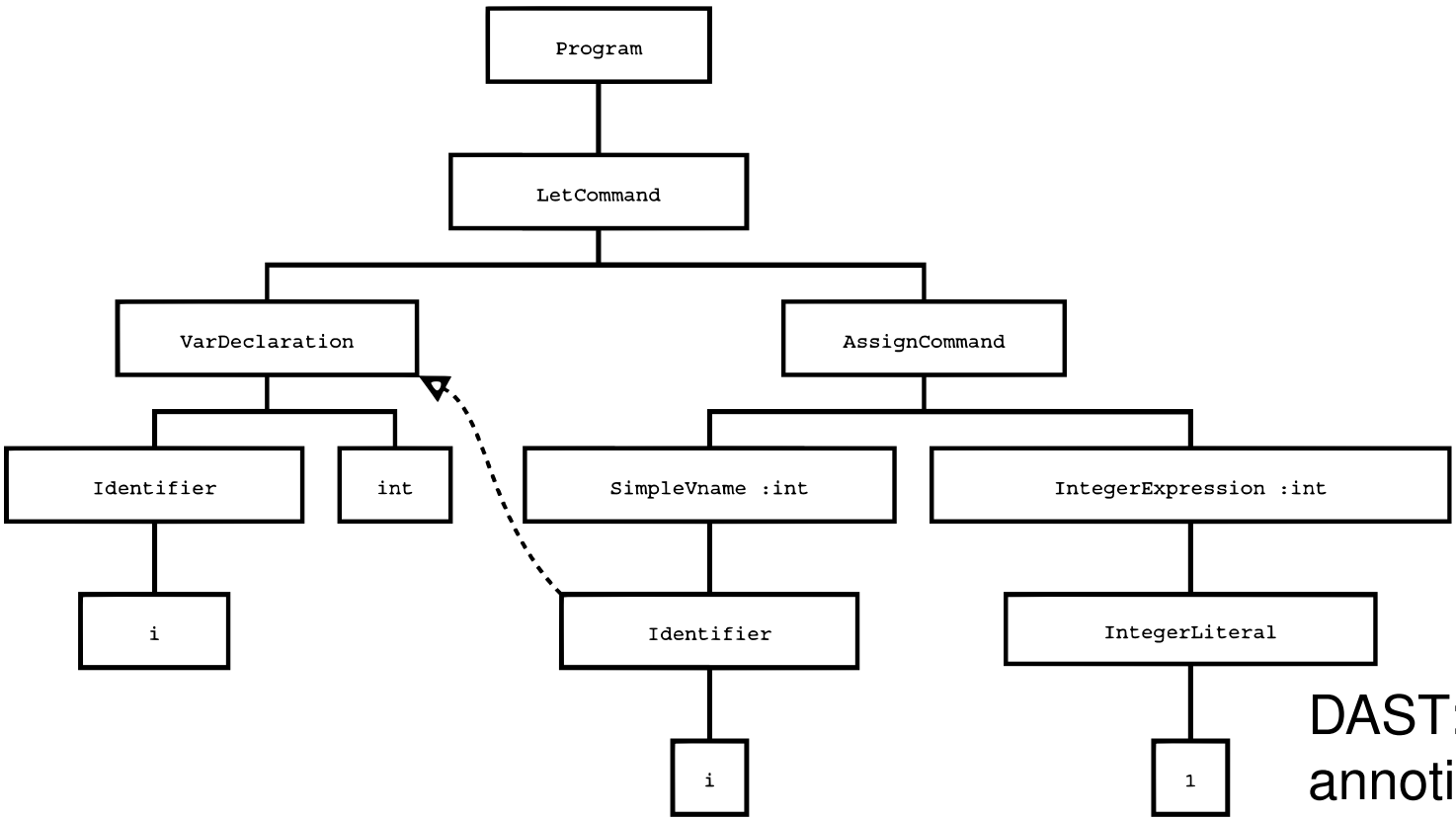
Abstrakter Syntaxbaum

Embedded Systems & Applications

Kontextanalyse - Identifikation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Ordne Variablen ihren Deklarationen zu
- Berechne Typen von Ausdrücken



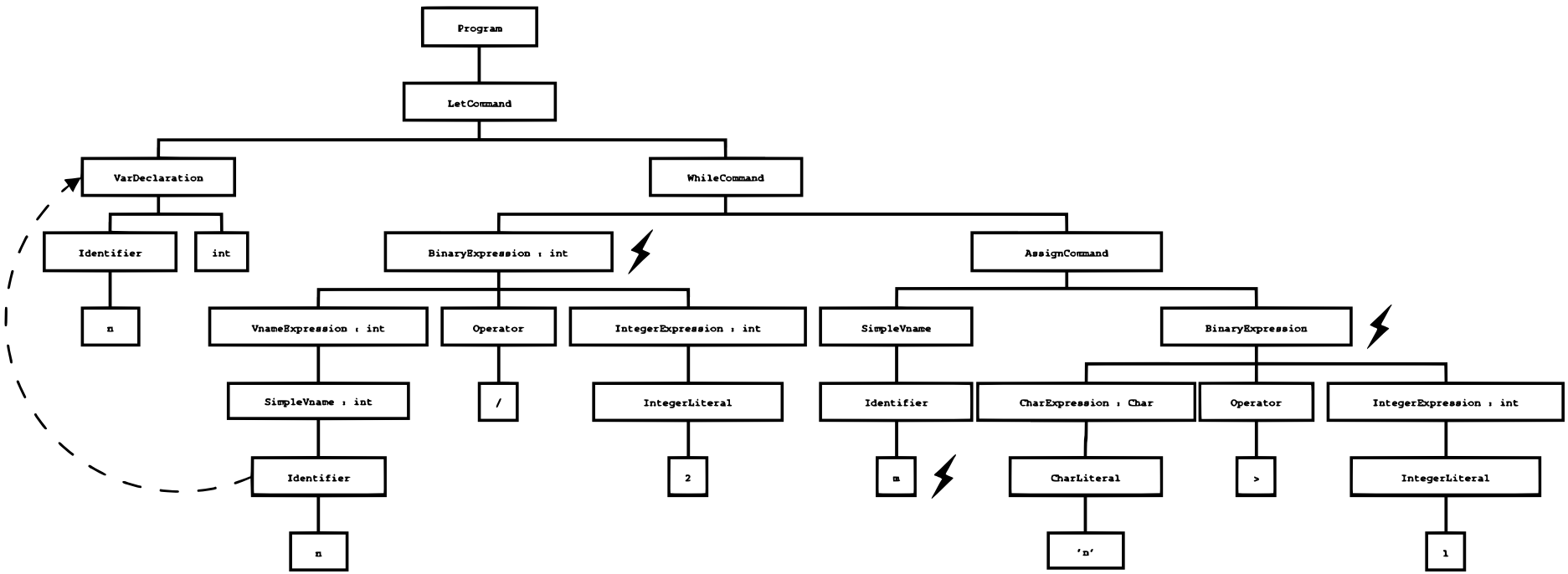
DAST: Dekorierter bzw. annotierter AST

Embedded Systems & Applications

Kontextanalyse - Überprüfung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Erkenne Fehler in Variablen- und Typzuordnung



Embedded Systems & Applications

Code-Erzeugung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Programm ist syntaktisch und kontextuell korrekt

Code-Erzeugung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Programm ist syntaktisch und kontextuell korrekt
- Übersetzung in Zielsprache
  - Maschinensprache
  - Assembler
  - C
  - Andere Hochsprache

Code-Erzeugung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

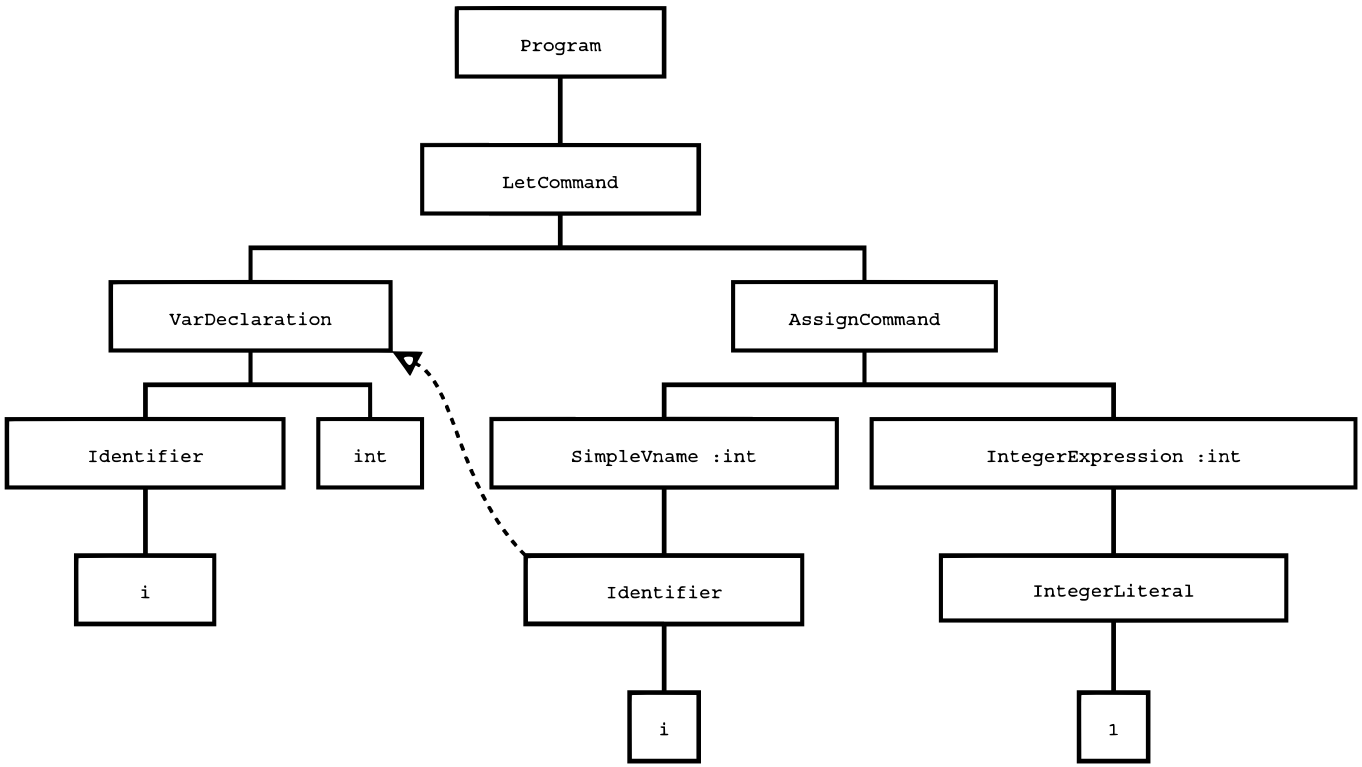
- Programm ist syntaktisch und kontextuell korrekt
- Übersetzung in Zielsprache
  - Maschinensprache
  - Assembler
  - C
  - Andere Hochsprache
- Ordne DAST-Teilen Instruktionen der Zielsprache zu

Code-Erzeugung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Programm ist syntaktisch und kontextuell korrekt
- Übersetzung in Zielsprache
  - Maschinensprache
  - Assembler
  - C
  - Andere Hochsprache
- Ordne DAST-Teilen Instruktionen der Zielsprache zu
- Handhabung von Variablen
  1. Deklaration: Reserviere Speicherplatz für eine Variable
  2. Verwendung: Referenziere immer den zugeordneten Speicherplatz

Code-Erzeugung 2




```
0:  PUSH      1          ; Platz fuer 'i' schaffen, Adresse 0[SB]
1:  LOADL     1          ; Wert 1 auf Stack legen
2:  STORE (1) 0[SB]      ; ein Datenwort vom Stack nach Adresse 0[SB] schreiben
3:  POP (0)   1          ; Platz von 'i' wieder aufgeben
4:  HALT                 ; Ausfuehrung beenden
```

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Optimierung

Embedded Systems & Applications

Optimierender Compiler

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Front-End: Syntaktische/kontextuelle Analyse

Embedded Systems & Applications

Optimierender Compiler

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Front-End: Syntaktische/kontextuelle Analyse
- Back-End: Code-Erzeugung

Embedded Systems & Applications

Optimierender Compiler

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Front-End: Syntaktische/kontextuelle Analyse
- Back-End: Code-Erzeugung
- Middle-End: Transformation von Zwischendarstellungen

Embedded Systems & Applications

Optimierender Compiler

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Front-End: Syntaktische/kontextuelle Analyse
- Back-End: Code-Erzeugung
- Middle-End: Transformation von Zwischendarstellungen
  - Intermediate Representation (IR)
  - Keine direkte Code-Erzeugung aus Front-End IR
  - Verwendet in der Regel zusätzliche interne Darstellungen

Embedded Systems & Applications

Optimierender Compiler

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Front-End: Syntaktische/kontextuelle Analyse
- Back-End: Code-Erzeugung
- Middle-End: Transformation von Zwischendarstellungen
  - Intermediate Representation (IR)
  - Keine direkte Code-Erzeugung aus Front-End IR
  - Verwendet in der Regel zusätzliche interne Darstellungen

Ziel: Verbesserung des erzeugten Codes in Bezug auf bestimmte Gütemaße

Beispiele für Optimierung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Constant-Folding

```
x = (2+3) * y          x = 5*y
```

Beispiele für Optimierung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Constant-Folding

```
x = (2+3) * y          x = 5*y
```

Common-Subexpression Elimination

```
x = 5 * a + b;
y = 5 * a + c;
```

```
t = 5 * a;
x = t + b;
y = t + c;
```

Beispiele für Optimierung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Constant-Folding

```
x = (2+3) * y
```

```
x = 5*y
```

Common-Subexpression Elimination

```
x = 5 * a + b;
y = 5 * a + c;
```

```
t = 5 * a;
x = t + b;
y = t + c;
```

Strength Reduction

```
for (i=0; i <= j; ++i) {
   a[i*3] = 42;
}
```

```
int t = 0;
for (i=0; i <= j; ++i) {
   a[t] = 42;
   t = t + 3;
}
```

Beispiele für Optimierung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Constant-Folding

```
x = (2+3) * y
```

```
x = 5*y
```

Common-Subexpression Elimination

```
x = 5 * a + b;
y = 5 * a + c;
```

```
t = 5 * a;
x = t + b;
y = t + c;
```

Strength Reduction

```
for (i=0; i <= j; ++i) {
   a[i*3] = 42;
}
```

```
int t = 0;
for (i=0; i <= j; ++i) {
   a[t] = 42;
   t = t + 3;
}
```

Loop-invariant Code Motion

```
int t;
for (i=0; i <= j; ++i) {
   t = x * y;
   a[i] = t * i;
}
```

```
int t = x * y;
for (i=0; i <= j; ++i) {
   a[i] = t * i;
}
```

Organisatorisches

Studienleistung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Wechsel auf anderen Foliensatz...

Material: Grundlage der Vorlesung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Grundlagen von Compilern: Fast vollständig

Programming Language Processors in Java
von David Watt und Deryck Brown, Prentice-Hall 2000

Auszugsweise noch weiteres Material, z.B. zum ANTLR Parsergenerator.

Übersichtswerk

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Guter allgemeiner Überblick, aber im Detail mit anderen Schwerpunkten als bei uns

Compilers, 2. Auflage (!)
von Aho, Sethi, Ullmann, Lam, Addison-Wesley 2006

Auch auf Deutsch verfügbar

Aufbau der Veranstaltung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Überblick über Front-End[1] (ca. 3 Wochen)

- Lexing/Parsing
- Zwischendarstellungen

Aufbau der Veranstaltung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Überblick über Front-End[1] (ca. 3 Wochen)

- Lexing/Parsing
- Zwischendarstellungen

Überblick über Middle-End[1] (ca. 2 Wochen)

- Semantische / Kontextanalyse

Aufbau der Veranstaltung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Überblick über Front-End[1] (ca. 3 Wochen)

- Lexing/Parsing
- Zwischendarstellungen

Überblick über Middle-End[1] (ca. 2 Wochen)

- Semantische / Kontextanalyse

Überblick über Back-End[1] (ca. 4 Wochen)

- Laufzeitorganisation
- Code-Erzeugung

Aufbau der Veranstaltung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Überblick über Front-End[1] (ca. 3 Wochen)

- Lexing/Parsing
- Zwischendarstellungen

Überblick über Middle-End[1] (ca. 2 Wochen)

- Semantische / Kontextanalyse

Überblick über Back-End[1] (ca. 4 Wochen)

- Laufzeitorganisation
- Code-Erzeugung

[1]: Diese Teile lehnen sich an an die Veranstaltungen

- IMT3052 von Ivar Farup, Universität Gjøvik, Norwegen
- Vertalerbouw von Theo Ruys, Universität Twente, Niederlande

Aufbau der Veranstaltung 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Weiterführende Themen

- Verwendung von Front-End-Generatoren (ca. 2-3 Wochen)
- Java Virtuelle Maschine (ca. 1-2 Wochen)

Multimedianutzung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Streaming der Veranstaltung auf `https://lect.stream`

- Zugänglich aus TU Netz (WLAN oder VPN)
- Anmelden mit TU ID
- DSGVO-konformes Streaming auf TU-eigenen Servern
- Darüber auch interaktive Quizzes in Vorlesung

Vorlesungsaufzeichnungen

- Im H.264 Videoformat, abspielbar z.B. mittels VLC
- Zugänglich auf Webseite des FG ESA

Syntax

Syntax oder Grammatik

PLPJ, Kapitel 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Beschreibt die Satzstruktur von korrekten Programmen

- `n := n + 1;`
  Syntaktisch korrektes Statement in Triangle
- “Ein Kreis hat zwei Ecken.”
  Syntaktisch korrekte Aussage in Deutsch

Kontextuelle Einschränkungen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Dazu gehören Regeln für den Geltungsbereich (*scope*) und den Typ von Aussagen.

- `n` muß bei Auftreten des Statements passend deklariert sein.
- Kreise haben im allgemeinen keine Ecken.
  Hier passen die Typen offenbar nicht.

Semantik

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Die Bedeutung einer Anweisung/Aussage in einer Sprache. Wird bei Programmiersprachen häufig beschrieben . . .

Semantik

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Die Bedeutung einer Anweisung/Aussage in einer Sprache. Wird bei Programmiersprachen häufig beschrieben . . .

Operationell Welche Schritte laufen ab, wenn das Programm gestartet wird?

Semantik

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Die Bedeutung einer Anweisung/Aussage in einer Sprache. Wird bei Programmiersprachen häufig beschrieben . . .

Operationell Welche Schritte laufen ab, wenn das Programm gestartet wird?

Denotational Abbildung von Eingaben auf Ausgaben

Art der Spezifikation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Für alle drei Teile
  1. Syntax
  2. Kontextuelle Einschränkungen
  3. Semantik

Art der Spezifikation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Für alle drei Teile
  1. Syntax
  2. Kontextuelle Einschränkungen
  3. Semantik
- . . . gibt es jeweils zwei Spezifikationsarten
  - Formal
  - Informal

Art der Spezifikation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Für alle drei Teile
  1. Syntax
  2. Kontextuelle Einschränkungen
  3. Semantik
- . . . gibt es jeweils zwei Spezifikationsarten
  - Formal
  - Informal

Triangle-Spezifikation

- Formale Syntax (reguläre Ausdrücke, EBNF)
- Informale kontextuelle Einschränkungen
- Informale Semantik

Syntax

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Eine **Sprache** ist eine Menge von **Zeichenketten** aus einem **Alphabet**

Syntax

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Eine **Sprache** ist eine Menge von **Zeichenketten** aus einem **Alphabet**

- Wie diese Menge angeben?
- Bei endlichen Sprachen: Einfach Elemente aufzählen
- Geht nicht bei unendlichen Sprachen

Syntax

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Eine **Sprache** ist eine Menge von **Zeichenketten** aus einem **Alphabet**

- Wie diese Menge angeben?
- Bei endlichen Sprachen: Einfach Elemente aufzählen
- Geht nicht bei unendlichen Sprachen
- Einige mögliche Vorgehensweisen
  1. Mathematische Mengennotation
  2. Reguläre Ausdrücke
  3. Kontextfreie Grammatik

Syntax durch Mengenbeschreibung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Beispiele für die beschriebenen Zeichenketten

- $L = \{\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}\}$ beschreibt **a**, **b**, **c**
- $L = \{\mathbf{x}^n | n > 0\}$ beschreibt **x**, **xx**, **xxx**, ...
- $L = \{\mathbf{x}^n\mathbf{y}^m | n > 0, m > 0\}$ beschreibt **xxy**, **xyy**, **xxxyy**, ...
- $L = \{\mathbf{x}^n\mathbf{y}^n | n > 0\}$ beschreibt **xy**, **xxyy**, ..., aber z.B. nicht **xxy**

Syntax durch Mengenbeschreibung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Beispiele für die beschriebenen Zeichenketten

- $L = \{\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}\}$ beschreibt **a**, **b**, **c**
- $L = \{\mathbf{x}^n | n > 0\}$ beschreibt **x**, **xx**, **xxx**, ...
- $L = \{\mathbf{x}^n\mathbf{y}^m | n > 0, m > 0\}$ beschreibt **xxy**, **xyy**, **xxxyy**, ...
- $L = \{\mathbf{x}^n\mathbf{y}^n | n > 0\}$ beschreibt **xy**, **xxyy**, ..., aber z.B. nicht **xxy**

Offensichtlich keine sonderlich nützliche und gut zu handhabende Spezifikationsform für komplexere Sprachen.

Reguläre Ausdrücke (REs)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Erweitere Zeichenketten aus dem Alphabet um Operatoren

- $|$ zeigt Alternativen an
- $*$ zeigt Null oder mehr Vorkommen des vorangehenden Zeichens an
- ε ist die leere Zeichenkette
- $(\ldots)$ erlauben die Gruppierung von Teilausdrücken durch Klammerung

Reguläre Ausdrücke (REs)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Erweitere Zeichenketten aus dem Alphabet um Operatoren

- $|$ zeigt Alternativen an
- $*$ zeigt Null oder mehr Vorkommen des vorangehenden Zeichens an
- ε ist die leere Zeichenkette
- $(\ldots)$ erlauben die Gruppierung von Teilausdrücken durch Klammerung

Beispiele

- $L = \mathbf{a}|\mathbf{b}|\mathbf{c}$ ergibt **a**, **b**, **c**
- $L = \mathbf{ab}*$ ergibt **a**, **ab**, **abb**, ...
- $L = (\mathbf{ab})*$ ergibt die leere Zeichenkette ε, **ab**, **abab**, **ababab**, ...
- $L = \mathbf{a}(\mathbf{b}|\varepsilon)$ ergibt **a** oder **ab**

Embedded Systems & Applications

Mächtigkeit von REs?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Kann man die Menge aller regulären Ausdrücke selber durch einen regulären Ausdruck beschreiben?

Mächtigkeit von REs?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Kann man die Menge aller regulären Ausdrücke selber durch einen regulären Ausdruck beschreiben?

Nein! REs sind daher ungeeignet zur Beschreibung der Syntax komplexer Programmiersprachen

Mächtigkeit von REs?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Kann man die Menge aller regulären Ausdrücke selber durch einen regulären Ausdruck beschreiben?

Nein! REs sind daher ungeeignet zur Beschreibung der Syntax komplexer Programmiersprachen

. . . also Weitersuchen nach geeigneter Beschreibungsform für Syntax

Mächtigkeit von REs?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Kann man die Menge aller regulären Ausdrücke selber durch einen regulären Ausdruck beschreiben?

Nein! REs sind daher ungeeignet zur Beschreibung der Syntax komplexer Programmiersprachen

. . . also Weitersuchen nach geeigneter Beschreibungsform für Syntax

Aber: REs sind trotzdem innerhalb eines Compilers nützlich
(siehe PLPJ Kapitel 4, Scanner).

Kontextfreie Grammatiken (CFGs) 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Eine kontextfreie Grammatik besteht aus

- Einer Menge von Terminalsymbolen T aus Alphabet
- Einer Menge von Nicht-Terminalsymbolen N
- Einem Startsymbol $S \in N$
- Einer Menge von Produktionen P
  - Beschreiben, wie Nicht-Terminalsymbole aus Terminalsymbolen zusammengesetzt sind.

Kontextfreie Grammatiken (CFGs) 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Produktionen in Backus-Naur-Form (BNF)

Nicht-Terminal ::= **Zeichenkette** aus Terminal und Nicht-Terminalsymbolen

Kontextfreie Grammatiken (CFGs) 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Produktionen in Backus-Naur-Form (BNF)

Nicht-Terminal ::= **Zeichenkette** aus Terminal und Nicht-Terminalsymbolen

Produktionen in Extended BNF (EBNF)

Nicht-Terminal ::= **RE** aus Terminal und Nicht-Terminalsymbolen

BNF Beispiel 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$T = \{\mathbf{x}, \mathbf{y}\}$, $N = \{\mathbf{S}, \mathbf{B}\}$, $S = \mathbf{S}$, $P = \{$

$$
\begin{aligned}
\mathbf{S} &::= \mathbf{xS} && (1)\\
\mathbf{S} &::= \mathbf{yB} && (2)\\
\mathbf{S} &::= \mathbf{x} && (3)\\
\mathbf{B} &::= \mathbf{yB} && (4)\\
\mathbf{B} &::= \mathbf{y} \quad \} && (5)
\end{aligned}
$$

BNF Beispiel 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$T = \{\mathbf{x}, \mathbf{y}\}$, $N = \{\mathbf{S}, \mathbf{B}\}$, $S = \mathbf{S}$, $P = \{$

$$
\begin{aligned}
\mathbf{S} &::= \mathbf{xS} && (1)\\
\mathbf{S} &::= \mathbf{yB} && (2)\\
\mathbf{S} &::= \mathbf{x} && (3)\\
\mathbf{B} &::= \mathbf{yB} && (4)\\
\mathbf{B} &::= \mathbf{y} \quad \} && (5)
\end{aligned}
$$

Ist die Zeichenkette **xxyyy** Element der durch T, N, S, P beschriebenen Sprache?

Embedded Systems & Applications

BNF Beispiel 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$T = \{\mathbf{x}, \mathbf{y}\}$, $N = \{\mathbf{S}, \mathbf{B}\}$, $S = \mathbf{S}$, $P = \{$

$$
\begin{aligned}
\mathbf{S} &::= \mathbf{xS} && (1)\\
\mathbf{S} &::= \mathbf{yB} && (2)\\
\mathbf{S} &::= \mathbf{x} && (3)\\
\mathbf{B} &::= \mathbf{yB} && (4)\\
\mathbf{B} &::= \mathbf{y} \quad \} && (5)
\end{aligned}
$$

Ist die Zeichenkette **xxyyy** Element der durch T, N, S, P beschriebenen Sprache?

$$\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{xS} \rightarrow \mathbf{xxS} \rightarrow \mathbf{xxyB} \rightarrow \mathbf{xxyyB} \rightarrow \mathbf{xxyyy}$$

➥Ja, da sie sich aus S herleiten läßt.

Embedded Systems & Applications

BNF Beispiel 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$T = \{\mathbf{x}, \mathbf{y}\}$, $N = \{\mathbf{S}, \mathbf{B}\}$, $S = \mathbf{S}$, $P = \{$

$$\mathbf{S} ::= \mathbf{xS} \tag{6}$$
$$\mathbf{S} ::= \mathbf{yB} \tag{7}$$
$$\mathbf{S} ::= \mathbf{x} \tag{8}$$
$$\mathbf{B} ::= \mathbf{yB} \tag{9}$$
$$\mathbf{B} ::= \mathbf{y} \quad \} \tag{10}$$

Embedded Systems & Applications

BNF Beispiel 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$T = \{\mathbf{x}, \mathbf{y}\}$, $N = \{\mathbf{S}, \mathbf{B}\}$, $S = \mathbf{S}$, $P = \{$

$$\begin{aligned}
\mathbf{S} &::= \mathbf{xS} && (6)\\
\mathbf{S} &::= \mathbf{yB} && (7)\\
\mathbf{S} &::= \mathbf{x} && (8)\\
\mathbf{B} &::= \mathbf{yB} && (9)\\
\mathbf{B} &::= \mathbf{y} \quad \} && (10)
\end{aligned}$$

Ist die Zeichenkette **xy** Element der durch T, N, S, P beschriebenen Sprache?

BNF Beispiel 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$T = \{\mathbf{x}, \mathbf{y}\}$, $N = \{\mathbf{S}, \mathbf{B}\}$, $S = \mathbf{S}$, $P = \{$

$$
\begin{aligned}
\mathbf{S} &::= \mathbf{xS} && (6)\\
\mathbf{S} &::= \mathbf{yB} && (7)\\
\mathbf{S} &::= \mathbf{x} && (8)\\
\mathbf{B} &::= \mathbf{yB} && (9)\\
\mathbf{B} &::= \mathbf{y} \quad \} && (10)
\end{aligned}
$$

Ist die Zeichenkette **xy** Element der durch T, N, S, P beschriebenen Sprache?

$$\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{xS} \rightarrow \mathbf{xyB} \rightarrow ?$$

➥Nein, da sie sich nicht aus S herleiten läßt.

Embedded Systems & Applications

Mehrdeutigkeit in BNF

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Gegeben seien die Produktionen:

$$\mathbf{S} \quad ::= \quad \mathbf{S+S} \tag{11}$$

$$\mathbf{S} \quad ::= \quad \mathbf{x} \tag{12}$$

Mehrdeutigkeit in BNF

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Gegeben seien die Produktionen:

$$\mathbf{S} \quad ::= \quad \mathbf{S+S} \tag{11}$$

$$\mathbf{S} \quad ::= \quad \mathbf{x} \tag{12}$$

Wie läßt sich die Zeichenkette **x+x+x** herleiten?

Mehrdeutigkeit in BNF

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Gegeben seien die Produktionen:

$$\mathbf{S} \quad ::= \quad \mathbf{S+S} \tag{11}$$

$$\mathbf{S} \quad ::= \quad \mathbf{x} \tag{12}$$

Wie läßt sich die Zeichenkette **x+x+x** herleiten?

$$\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{S+S} \rightarrow \mathbf{x+S} \rightarrow \mathbf{x+S+S} \rightarrow \mathbf{x+x+S} \rightarrow \mathbf{x+x+x}$$

Mehrdeutigkeit in BNF

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Gegeben seien die Produktionen:

$$\mathbf{S} \quad ::= \quad \mathbf{S+S} \tag{11}$$
$$\mathbf{S} \quad ::= \quad \mathbf{x} \tag{12}$$

Wie läßt sich die Zeichenkette **x+x+x** herleiten?

$$\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{S+S} \rightarrow \mathbf{x+S} \rightarrow \mathbf{x+S+S} \rightarrow \mathbf{x+x+S} \rightarrow \mathbf{x+x+x}$$

Aber auch anders:

$$\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{S+S} \rightarrow \mathbf{S+x} \rightarrow \mathbf{S+S+x} \rightarrow \mathbf{S+x+x} \rightarrow \mathbf{x+x+x}$$

Eindeutige CFG

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Für sinnvolle praktische Anwendungen müssen CFGs eindeutig sein.

Eindeutige Produktionen für die gleiche CFG:

$$\mathbf{S} \quad ::= \quad \mathbf{x+S} \tag{13}$$

$$\mathbf{S} \quad ::= \quad \mathbf{x} \tag{14}$$

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

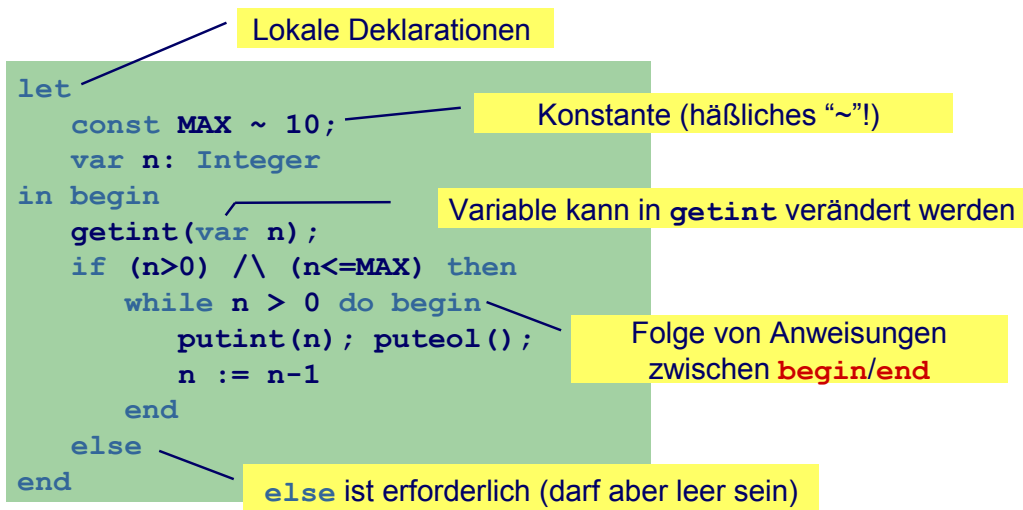
(Mini-) Triangle

Embedded Systems & Applications

(Mini-) Triangle

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Pascal-artige Sprache als Anschauungsobjekt
- Compiler-Quellcode auf Web-Page
- In der Vorlesung: Mini-Triangle
  - Weiter vereinfachte Version
  - Z.B. keine Definition von Unterfunktionen



Embedded Systems & Applications

Produktionen der Mini-Triangle CFG 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
Program ::= single-Command
single-Command ::= empty
         | V-name := Expression
         | Identifier ( Expression )
         | if Expression then single-Command
                              else single-Command
         | while Expression do single-Command
         | let Declaration in single-Command
         | begin Command end
Command ::= single-Command
           | Command ; single-Command
...
```


Embedded Systems & Applications

Produktionen der Mini-Triangle CFG 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
Expression
  ::= primary-Expression
    | Expression Operator primary-Expression
primary-Expression
  ::= Integer-Literal
    | V-name
    | Operator primary-Expression
    | ( Expression )
V-name ::= Identifier
Identifier ::= Letter
             | Identifier Letter
             | Identifier Digit
Integer-Literal ::= Digit
                  | Integer-Literal Digit
Operator ::= + | - | * | / | < | > | =
```


Embedded Systems & Applications

Produktionen der Mini-Triangle CFG 3

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
Declaration
   ::= single-Declaration
     | Declaration ; single-Declaration
single-Declaration
   ::= const Identifier ~ Expression
     | var Identifier : Type-denoter
Type-denoter ::= Identifier
```

Produktionen der Mini-Triangle CFG 4

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
Comment ::= ! CommentLine eol
CommentLine ::= Graphic CommentLine
Graphic ::= any printable character or space
Digit  ::= 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9
```


Embedded Systems & Applications

Terminologie

Terminologie

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Phrase Von einem gegebenen Nicht-Terminalsymbol herleitbare Kette von Terminalsymbolen.
Z.B. Expression-Phrase, Command-Phrase ...

Terminologie

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Phrase Von einem gegebenen Nicht-Terminalsymbol herleitbare Kette von Terminalsymbolen.
Z.B. Expression-Phrase, Command-Phrase ...

Satz *S*-Phrase, wobei *S* das Startsymbol der CFG ist

Terminologie

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Phrase Von einem gegebenen Nicht-Terminalsymbol herleitbare Kette von Terminalsymbolen.
Z.B. Expression-Phrase, Command-Phrase ...

Satz *S*-Phrase, wobei *S* das Startsymbol der CFG ist

Beispiel:

```
let                    (1)
  var y : Integer      (2)
in                     (3)
  y := y + 1           (4)
```

- Das gesamte Program ist ein *Satz* der CFG

Terminologie

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Phrase Von einem gegebenen Nicht-Terminalsymbol herleitbare Kette von Terminalsymbolen.
Z.B. Expression-Phrase, Command-Phrase ...

Satz *S*-Phrase, wobei *S* das Startsymbol der CFG ist

Beispiel:

```
let                    (1)
  var y : Integer      (2)
in                     (3)
  y := y + 1           (4)
```

- Das gesamte Program ist ein *Satz* der CFG
- Zeile 2 ist eine single-Declaration-Phrase

Terminologie

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Phrase Von einem gegebenen Nicht-Terminalsymbol herleitbare Kette von Terminalsymbolen.
Z.B. Expression-Phrase, Command-Phrase ...

Satz *S*-Phrase, wobei *S* das Startsymbol der CFG ist

Beispiel:

```
let                    (1)
  var y : Integer      (2)
in                     (3)
  y := y + 1           (4)
```

- Das gesamte Program ist ein *Satz* der CFG
- Zeile 2 ist eine single-Declaration-Phrase
- Zeile 4 ist eine single-Command-Phrase

Syntaxbäume

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Ein Syntaxbaum ist ein geordneter, markierter Baum bei dem

- . . . die Blätter mit Terminalsymbolen markiert sind
- . . . die inneren Knoten mit Nicht-Terminalsymbolen markiert sind
- . . . jeder innere Knoten **N** (von links nach rechts) die Kinder $\mathbf{X}_1, \ldots, \mathbf{X}_n$ hat, entsprechend der Produktion $\mathbf{N} := \mathbf{X}_1 \ldots \mathbf{X}_n$

Syntaxbäume

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

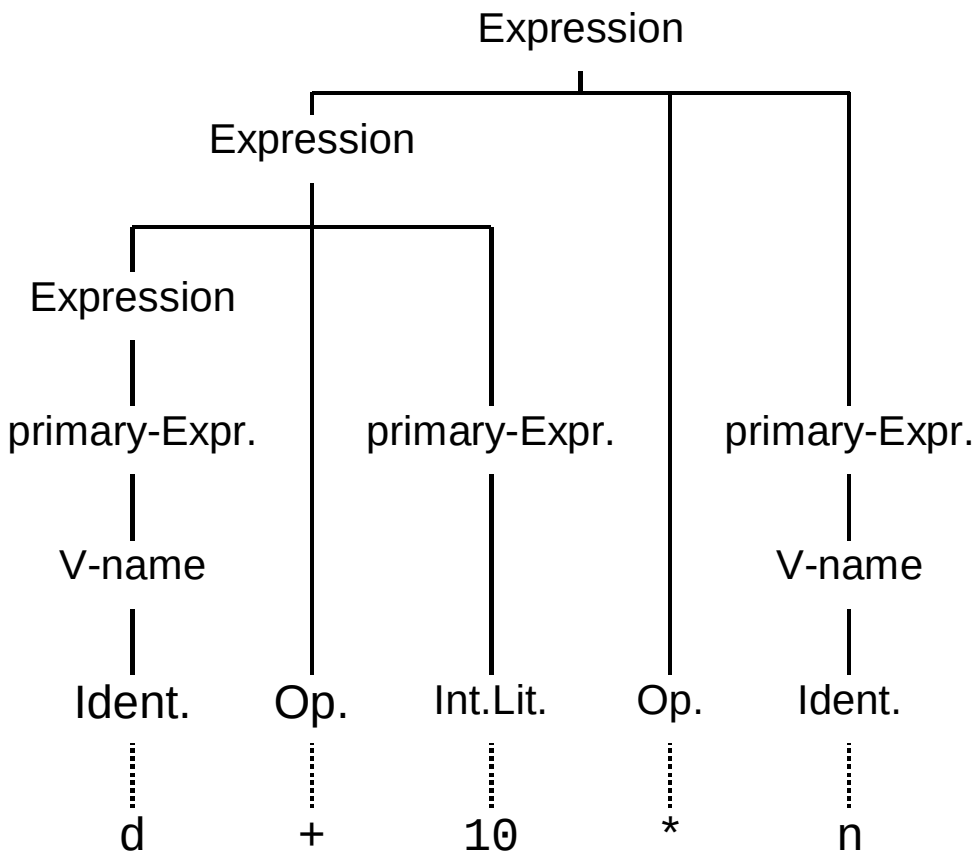
Ein Syntaxbaum ist ein geordneter, markierter Baum bei dem

- . . . die Blätter mit Terminalsymbolen markiert sind
- . . . die inneren Knoten mit Nicht-Terminalsymbolen markiert sind
- . . . jeder innere Knoten **N** (von links nach rechts) die Kinder $\mathbf{X}_1, \ldots, \mathbf{X}_n$ hat, entsprechend der Produktion $\mathbf{N} := \mathbf{X}_1 \ldots \mathbf{X}_n$

Ein *N*-Baum ist ein Baum mit einem *N* Nicht-Terminalsymbol am Wurzelknoten.

Expression-**Baum für** `d + 10 * n`

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

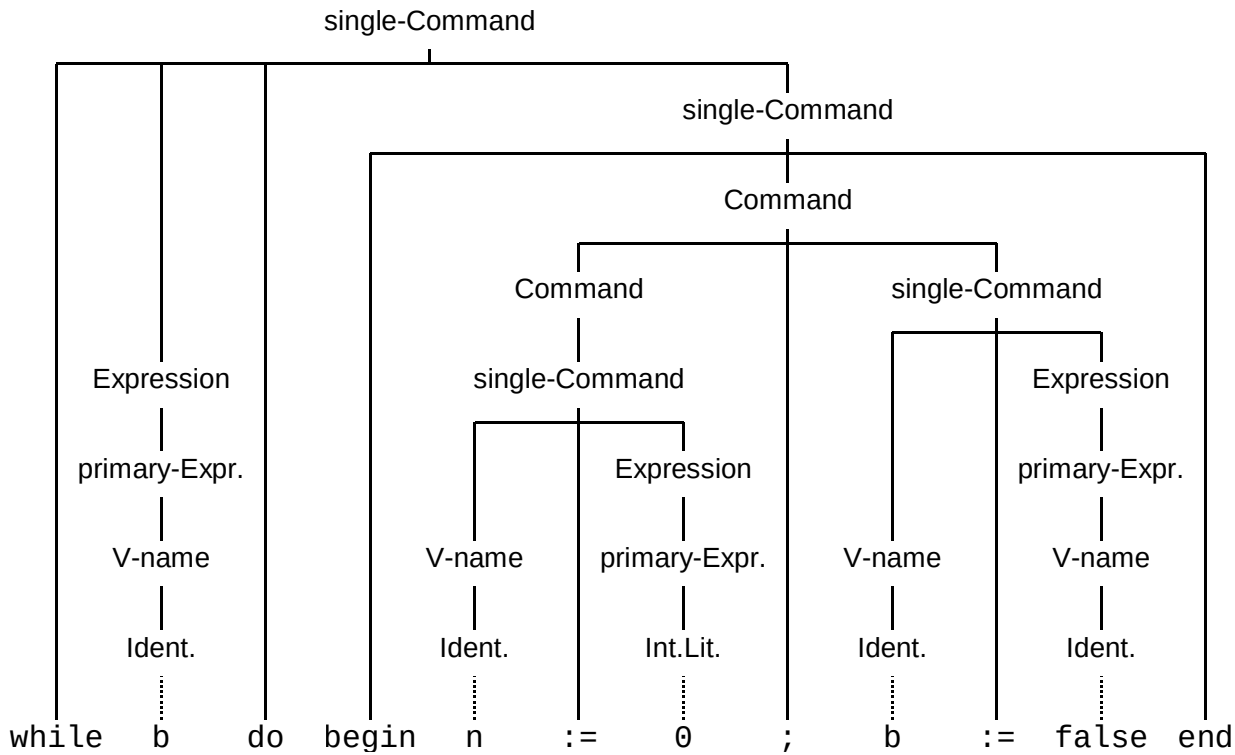


Embedded Systems & Applications

single-Command**-Baum**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
while b do begin
  n := 0;
  b := false
end
```



Embedded Systems & Applications

Konkrete und abstrakte Syntax

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Grammatik spezifiziert präzise syntaktische Details
  - `do`, `:=`, ...

➥Konkrete Syntax, wichtig für das Verfassen korrekter Programme

Konkrete und abstrakte Syntax

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Grammatik spezifiziert präzise syntaktische Details
  - **`do`**, **`:=`**, ...

➥Konkrete Syntax, wichtig für das Verfassen korrekter Programme

- Konkrete Syntax hat aber *keinen* Einfluß auf Semantik der Programme
  - **`V = E`**
  - **`V := E`**
  - **`set V = E`**
  - **`assign E to V`**
  - **`V` $\leftarrow$ `E`**
- ...können alle das gleiche bedeuten: Eine Zuweisung von **E** nach **V**

Konkrete und abstrakte Syntax

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Grammatik spezifiziert präzise syntaktische Details
  - **`do`**, **`:=`**, ...

➥Konkrete Syntax, wichtig für das Verfassen korrekter Programme

- Konkrete Syntax hat aber *keinen* Einfluß auf Semantik der Programme
  - **`V = E`**
  - **`V := E`**
  - **`set V = E`**
  - **`assign E to V`**
  - **`V` $\leftarrow$ `E`**
- ...können alle das gleiche bedeuten: Eine Zuweisung von **E** nach **V**

➥Für weitere Verarbeitung Darstellung vereinfachen!

Abstrakte Syntax 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Modelliert nur essentielle Information
- Idee: Orientierung an der Subphrasen-Struktur der Produktionen
- Beispiel: `V-name := Expression` hat zwei Subphrasen
  1. `V-name`
  2. `Expression`

Abstrakte Syntax 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Schlüsselworte, Begrenzer wie **`do`**, **`:=`** sind irrelevant
- Unterscheidungen zwischen
  - **`Command`** und **`single-Command`**
  - **`Declaration`** und **`single-Declaration`**
  - **`Expression`** und **`primary-Expression`**
- . . . ... sind nur für das Erkennen des Programmes relevant, nicht zur Darstellung seiner Semantik.

Abstrakte Syntax 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Schlüsselworte, Begrenzer wie **`do`**, **`:=`** sind irrelevant
- Unterscheidungen zwischen
  - **`Command`** und **`single-Command`**
  - **`Declaration`** und **`single-Declaration`**
  - **`Expression`** und **`primary-Expression`**
- . . . ... sind nur für das Erkennen des Programmes relevant, nicht zur Darstellung seiner Semantik.

➥Alle dafür unwichtigen Details weglassen!

Auszug aus der abstrakten Syntax 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
Command
 ::= V-name := Expression                    AssignCmd
   | Identifier ( Expression )               CallCmd
   | if Expression then Command
                  else Command               IfCmd
   | while Expression do Command             WhileCmd
   | let Declaration in Command              LetCmd
   | Command ; Command                       SequentialCmd
```

Auszug aus der abstrakten Syntax 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

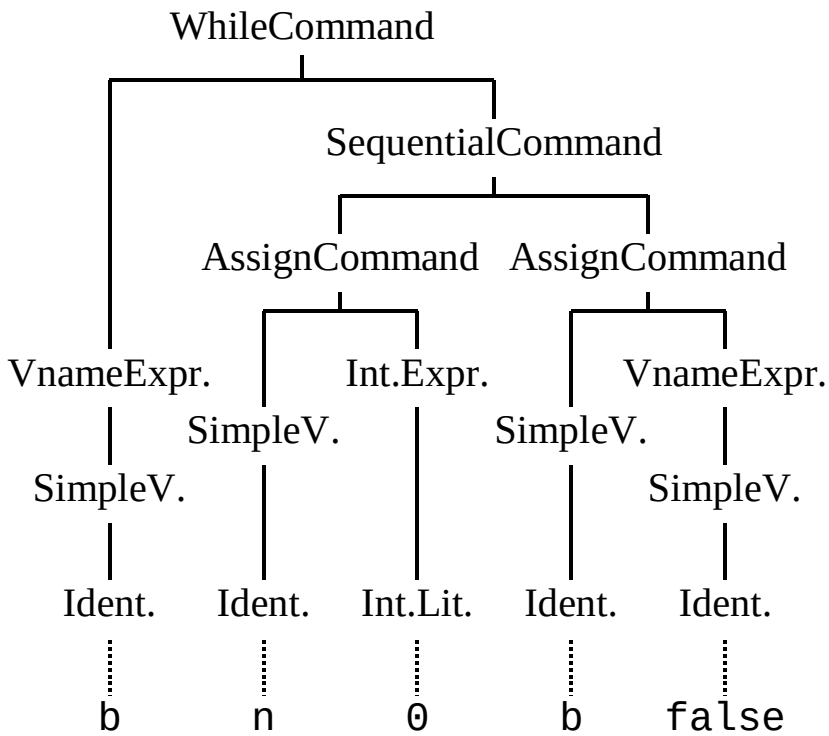
```
Expression
  ::= Integer-Literal                    IntegerExp
    | V-name                             VnameExp
    | Operator Expression                UnaryExp
    | Expression Op Expression           BinaryExp
V-name::= Identifier                     SimpleVName
```


Embedded Systems & Applications

Beispiel abstrakte Syntax

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
while b do begin
  n := 0;
  b := false
end
```



Embedded Systems & Applications

AST als Zwischendarstellung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- AST ist eine weit verbreitete Form der IR
- High-level IR
- Sehr nah an der Eingabesprache
- Gut geeignet für weitreichende Analysen und Transformationen
  - Unabhängig von Architektur der Zielmaschine
  - Verschieben von Anweisungen
  - Änderungen der Programmstruktur

AST als Zwischendarstellung 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Schlechter geeignet für maschinennahe Analysen und Transformationen

- Ausnutzung von Maschinenregistern
- Ausnutzung von speziellen Maschinenbefehlsfolgen

AST als Zwischendarstellung 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Schlechter geeignet für maschinennahe Analysen und Transformationen

- Ausnutzung von Maschinenregistern
- Ausnutzung von speziellen Maschinenbefehlsfolgen

➥Hier: Konzentration auf maschinenunabhängige Ebene

- (D)AST ist Hauptrepräsentation
- Für einzelne Bearbeitungsschritte: Andere IRs

Kontextuelle Einschränkungen

Kontextuelle Einschränkungen: Geltungsbereiche

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Syntaktische Korrektheit reicht nicht aus für sinnvolle Übersetzung

Kontextuelle Einschränkungen: Geltungsbereiche

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

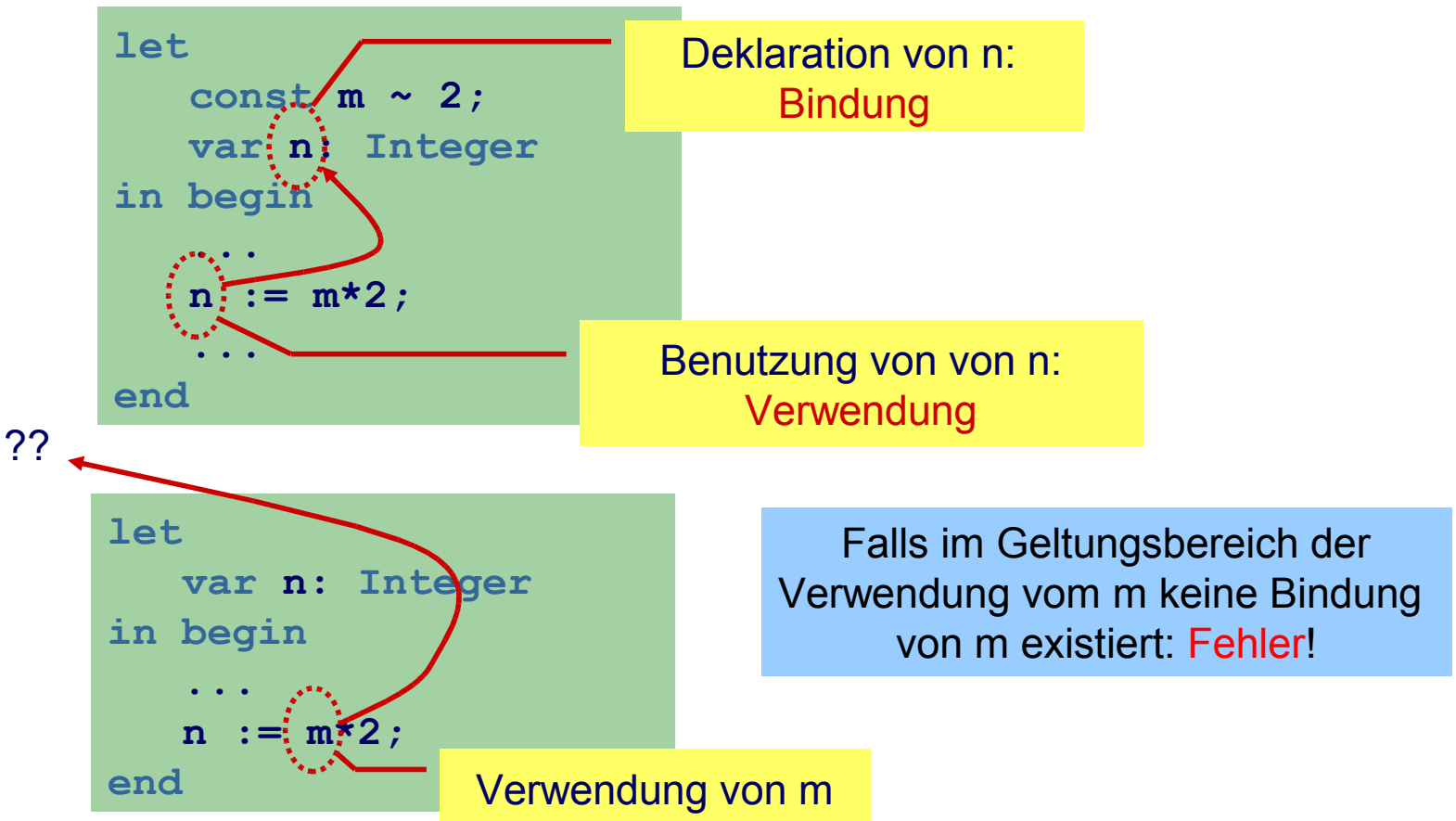
Syntaktische Korrektheit reicht nicht aus für sinnvolle Übersetzung

Geltungsbereiche (Scope)

- Betreffen *Sichtbarkeit* von Bezeichern
- Jeder verwendete Bezeichner muss vorher *deklariert* werden
  - . . . nicht bei allen Programmiersprachen
- Deklaration ist sog. *bindendes Auftreten* des Bezeichners
- Benutzung ist sog. *verwendendes Auftreten* des Bezeichners
- Aufgabe: Bringe jede Verwendung mit genau der einen passenden Bindung in Zusammenhang

Beispiele Geltungsbereiche

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Embedded Systems & Applications

Kontextuelle Einschränkungen: Typen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Typen

- Jeder Wert hat einen Typ
- Jede Operation
  - . . . hat Anforderungen an die Typen der Operanden
  - . . . hat Regeln für den Typ des Ergebnisses

Kontextuelle Einschränkungen: Typen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Typen

- Jeder Wert hat einen Typ
- Jede Operation
  - . . . hat Anforderungen an die Typen der Operanden
  - . . . hat Regeln für den Typ des Ergebnisses

. . . auch nicht bei allen Programmiersprachen.

- Hier: statische Typisierung (zur Compile-Zeit)
- Alternativ: dynamische Typisierung (zur Laufzeit)

Beispiele Typen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
let
   var n: Integer
in begin
   ...
   while n > 0 do
      n := n-1;
   ...
end
```

Typregel für $E_1 > E_2$ (GreaterOp):
Wenn E_1 und E_2 beide vom Typ int, dann ist Ergebnis vom Typ bool.

Typregel für **while** E **do** C (WhileCmd):
E muss vom Typ boolean sein.

Typregel für $V := E$ (AssignCmd):
Die Typen von V und E müssen äquivalent sein.

Typregel für $E_1 - E_2$ (SubOp):
Wenn E_1 und E_2 beide vom Typ int, dann ist Ergebnis vom Typ int.

Embedded Systems & Applications

Semantik

Semantik 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Semantik beschreibt die Bedeutung eines Programmes zur Ausführungszeit.
Allgemeine Terminologie:

Semantik 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Semantik beschreibt die Bedeutung eines Programmes zur Ausführungszeit.
Allgemeine Terminologie:

Anweisungen

. . . werden ausgeführt. Mögliche Seiteneffekte:

- Ändern der Werte von Variablen
- Ein-/Ausgabeoperationen

Semantik 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Ausdrücke

. . . werden ausgewertet (evaluiert), um ein Ergebnis zu erhalten.

- Die Evaluation kann in einigen Sprachen auch Seiteneffekte haben.

Semantik 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Ausdrücke

. . . werden ausgewertet (evaluiert), um ein Ergebnis zu erhalten.

- Die Evaluation kann in einigen Sprachen auch Seiteneffekte haben.

Deklarationen

. . . werden elaboriert um eine Bindung vorzunehmen. Mögliche Seiteneffekte:

- Allokieren von Speicherplatz
- Initialisieren von Speicherplatz

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 1

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Die Beschreibung orientiert sich am AST.

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Die Beschreibung orientiert sich am AST.

AssignCmd `V := E`

1. Der Ausdruck `E` wird evaluiert um einen Wert *v* zu erhalten

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Die Beschreibung orientiert sich am AST.

AssignCmd `V := E`

1. Der Ausdruck `E` wird evaluiert um einen Wert *v* zu erhalten
2. *v* wird an die Variable `V` zugewiesen

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Die Beschreibung orientiert sich am AST.

AssignCmd `V := E`

1. Der Ausdruck `E` wird evaluiert um einen Wert *v* zu erhalten
2. *v* wird an die Variable `V` zugewiesen

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 1

Die Beschreibung orientiert sich am AST.

AssignCmd `V := E`

1. Der Ausdruck `E` wird evaluiert um einen Wert v zu erhalten
2. v wird an die Variable `V` zugewiesen

BinaryExp $\texttt{E}_1$ `op` $\texttt{E}_2$

1. Der Ausdruck $\texttt{E}_1$ wird evaluiert um einen Wert v_1 zu erhalten

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Die Beschreibung orientiert sich am AST.

AssignCmd `V := E`

1. Der Ausdruck `E` wird evaluiert um einen Wert v zu erhalten
2. v wird an die Variable `V` zugewiesen

BinaryExp $\texttt{E}_1$ `op` $\texttt{E}_2$

1. Der Ausdruck $\texttt{E}_1$ wird evaluiert um einen Wert v_1 zu erhalten
2. Der Ausdruck $\texttt{E}_2$ wird evaluiert um einen Wert v_2 zu erhalten

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Die Beschreibung orientiert sich am AST.

AssignCmd `V := E`

1. Der Ausdruck `E` wird evaluiert um einen Wert v zu erhalten
2. v wird an die Variable `V` zugewiesen

BinaryExp $\texttt{E}_1\ \texttt{op}\ \texttt{E}_2$

1. Der Ausdruck $\texttt{E}_1$ wird evaluiert um einen Wert v_1 zu erhalten
2. Der Ausdruck $\texttt{E}_2$ wird evaluiert um einen Wert v_2 zu erhalten
3. Die Werte v_1 und v_2 werden mit dem Operator `op` zu einem Wert v_3 verknüpft.

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Die Beschreibung orientiert sich am AST.

AssignCmd `V := E`

1. Der Ausdruck `E` wird evaluiert um einen Wert v zu erhalten
2. v wird an die Variable `V` zugewiesen

BinaryExp $\texttt{E}_1\ \texttt{op}\ \texttt{E}_2$

1. Der Ausdruck $\texttt{E}_1$ wird evaluiert um einen Wert v_1 zu erhalten
2. Der Ausdruck $\texttt{E}_2$ wird evaluiert um einen Wert v_2 zu erhalten
3. Die Werte v_1 und v_2 werden mit dem Operator `op` zu einem Wert v_3 verknüpft.
4. v_3 ist das Ergebnis der BinaryExp

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Declaration `var I : T`

1. Der Bezeichner `I` wird an eine Variable vom Typ `T` gebunden

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Declaration `var I : T`

1. Der Bezeichner `I` wird an eine Variable vom Typ `T` gebunden
2. Es wird ein für `T` passender Speicherbereich bereitgestellt

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Declaration `var I : T`

1. Der Bezeichner `I` wird an eine Variable vom Typ `T` gebunden
2. Es wird ein für `T` passender Speicherbereich bereitgestellt
3. Der Speicherbereich ist *nicht* initialisiert

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Declaration `var I : T`

1. Der Bezeichner `I` wird an eine Variable vom Typ `T` gebunden
2. Es wird ein für `T` passender Speicherbereich bereitgestellt
3. Der Speicherbereich ist *nicht* initialisiert
4. Der Geltungsbereich für `I` ist der eingeschlossene Block (LetCmd)

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Declaration `var I : T`

1. Der Bezeichner `I` wird an eine Variable vom Typ `T` gebunden
2. Es wird ein für `T` passender Speicherbereich bereitgestellt
3. Der Speicherbereich ist *nicht* initialisiert
4. Der Geltungsbereich für `I` ist der eingeschlossene Block (LetCmd)
5. Am Ende des Blockes wird die Bindung aufgehoben

Beispiele Semantik von (Mini)Triangle 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Declaration `var I : T`

1. Der Bezeichner `I` wird an eine Variable vom Typ `T` gebunden
2. Es wird ein für `T` passender Speicherbereich bereitgestellt
3. Der Speicherbereich ist *nicht* initialisiert
4. Der Geltungsbereich für `I` ist der eingeschlossene Block (LetCmd)
5. Am Ende des Blockes wird die Bindung aufgehoben
6. . . . und der Speicherbereich wieder freigegeben

Triangle

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Embedded Systems & Applications

Triangle

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- In Vorlesung: Mini-Triangle
  - Stark vereinfacht
  - Z.B. Keine Unterprogramme (Prozeduren/Funktionen)

Triangle

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- In Vorlesung: Mini-Triangle
  - Stark vereinfacht
  - Z.B. Keine Unterprogramme (Prozeduren/Funktionen)
- Im praktischen Teil: Triangle
  - Pascal-artige Sprache
  - Arrays, Records, Prozeduren, Funktionen
  - Parameterübergabe durch Wert oder Referenz
  - Prozeduren/Funktionen als Parameter erlaubt
  - Ausdrücke haben *keine* Seiteneffekte

Triangle

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- In Vorlesung: Mini-Triangle
  - Stark vereinfacht
  - Z.B. Keine Unterprogramme (Prozeduren/Funktionen)
- Im praktischen Teil: Triangle
  - Pascal-artige Sprache
  - Arrays, Records, Prozeduren, Funktionen
  - Parameterübergabe durch Wert oder Referenz
  - Prozeduren/Funktionen als Parameter erlaubt
  - Ausdrücke haben *keine* Seiteneffekte
- Beschreibung in PLPJ, Anhang B

Zusammenfassung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Überblick
- Organisation
- Material in PLPJ, Kapitel 1
  - Syntax (konkrete und abstrakte)
  - Kontextuelle Einschränkungen
  - Semantik
  - AST als IR
  - (Mini-)Triangle