Vorlesung Übersetzerbau

Prof. G. Goos

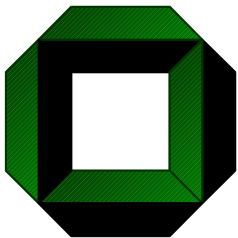
Universität Karlsruhe

Adenauerring 20a, R. 201

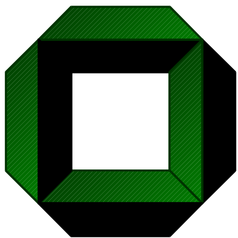
Tel. 608-4760

ggoos@ipd.info.uni-karlsruhe.de

www.info.uni-karlsruhe.de



Übung Übersetzerbau



Rubino Geiß

Universität Karlsruhe

Adenauerring 20a, R. 229

Tel. 608-8352

rubino@ipd.info.uni-karlsruhe.de

www.info.uni-karlsruhe.de

Übersetzerbau Praktikum

Themen

- Übersetzerbau in der Praxis
- Bau eines Übersetzers für MiniJava
- Einsatz von Werkzeugen
- Moderne Konzepte: OO, SSA
- Erprobung von Optimierungen

Organisation

- IPD, Lehrstuhl Goos
- Michael Beck und Götz Lindenmaier
  {beck | goetz}@ipd.info.uni-karlsruhe.de
- Vorbesprechung: Mi. 15.10.2003, 09:45
  Geb. 50.41 (AVG), SR 207
- 2 SWS, prüfbar
- http://www.info.uni-karlsruhe.de/

Ausgebucht

Algorithmen Praktikum

Themen

- Algorithmen in der Praxis
- Schwerpunkt auf Implementierung
- Definierte Testumgebung
- Laufzeitmessungen
- Framework für Visualisierungen

Organisation

- IPD, Lehrstuhl Goos
- Florian Liekweg, Rubino Geiß
  {liekweg | rubino}@ipd.info.uni-karlsruhe.de
- Vorbesprechung: Do. 16.10.03, 16:00
  Geb. 50.41 (AVG), SR 207
- 2 SWS, prüfbar
- http://www.info.uni-karlsruhe.de/

HPS
Vorlesung

Höhere Programmier-Sprachen

- Elemente und Konzepte
- Paradigmen: funktionale, logische, objekt-orientierte und Skript-Sprachen
- Exemplarisches Verständnis vieler Sprachen und deren Spezifika
- Definition von Semantik: operational, denotationell, axiomatisch

Organisation

- IPD, Lehrstuhl Goos
- Dr. Sabine Glesner
  glesner@ipd.info.uni-karlsruhe.de
- Mo. 14:00 - 15:30, Info -102
- 2 SWS, prüfbar
- http://www.info.uni-karlsruhe.de/

Kapitel 1: Einleitung

1. Motivation und Literatur
2. Übersetzungsarten
3. Semantik und korrekte Übersetzung
4. Architektur / Phasen
   - 4.1 Analyse
   - 4.2 Abbildung
   - 4.3 Codierung
   - 4.4. Datenstrukturen

1.1 Warum ist Übersetzerbau interessant?

- ältestes Gebiet der praktischen Informatik
- Modell für erfolgreiche theoretische Fundierung praktischer Entwicklungen
- stabile Software-Architektur: Musterbeispiel für software engineering bei mittelgroßen sequentiellen Software-Systemen
- hohe Korrektheits- und Zuverlässigkeitsforderungen

- grundlegend für Weiterentwicklungen der Programmiermethodik
- grundlegend für Weiterentwicklung der Prozessor-/Software-Schnittstelle
- liefert die Standardmethoden für die Verarbeitung textueller Eingaben und zur Generierung von Programmen aus Spezifikationen
- viele Anwendungen im Software Engineering: Textformatierung, Programmtransformationen, automatische Anwendung von Entwurfsmustern, Metaprogrammierung, aspektorientierte Programmierung, Verarbeitung von XML, Metriken, ...

1.1 Literatur

W.M. Waite, G. Goos: Compiler Construction, Springer 1984,
http://www.info.uni-karlsruhe.de/teaching.php?id=20021

A.W. Appel: Modern Compiler Implementation in Java.
Cambridge University Press 1998, umfassendes leicht lesbares Buch

R. Morgan: Building an Optimizing Compiler. Butterworth-Heinemann 1998,
erstklassiges Buch über Optimierung

S.S. Muchnik: Advanced Compiler Design & Implementation. Morgan-Kaufmann 1997.

R. Wilhelm, D. Maurer: Übersetzerbau, 2. Aufl. Springer 1997,
behandelt ausführlich auch funkt. und logische Programmiersprachen,
Einführung in Baumautomaten

W.M. Waite, L.R. Carter: An Introduction to Compiler Construction,
Harper-Collins 1992, praktisch, leicht lesbar, Architektur

A.V. Aho, R. Sethi, J.D. Ullman: Compilers: Principles, Techniques and Tools,
Addison-Wesley 1986, Standardverfahren der Optimierung und Codegen.

M. Wolfe: High-Performance Compilers for Parallel Computing. Addison-Wesley 1996.

4 Anwendungsfelder

- Text → Information
  - Textanlyse
  - Beispiel: LaTeX, Word, Konfigurationsdateien
- Text → Text
  - Quell-Quell-Transformation
  - Beispiel: Präprozessor, UML nach C
- Programm → Kellercode
  - Beispiel: Java Byte Code, .NET MSIL
- Programm → Maschinencode
  - Beispiel: Alle C-Übersetzer

1.1 Übersetzen

Übersetzen:

Text aus Quellsprache in Zielsprache übertragen unter Erhaltung der Bedeutung (bedeutungsäquivalent, semantikerhaltend)

- Quell-/Zielsprache können identisch sein
- Ziel kann maschinen-interpretierbare Sprache sein.
- Bei Programmiersprachen: Semantik durch Ausführung - Interpretation - des Quell-/Zieltexts gegeben

1.1 Zielkriterien

- Korrektheit
- Minimaler Betriebsmittelaufwandzur Laufzeit (Rechenzeit, Speicher, Energie)
- Kompatibilität mit anderen Übersetzern
  - gleicher Sprachumfang akzeptiert
  - Interaktion mit Programmen
    - anderer Sprachen
    - anderer Übersetzer
    - auf anderen Rechnern
    - dynamische Verknüpfung
- Übersetzungsgeschwindigkeit

- Achtung: diese Ziele widersprechen sich teilweise

1.1 Bedeutung (Semantik)

definiert durch Komposition

- Programmtext hat Struktur (Syntax)
- Bedeutung den Strukturelementen zugeordnet
- Gesamtbedeutung durch Komposition

Strukturelemente imperativer Sprachen

- Datentypen, Objekte (Variable, benannte Konstante, Literale) und Operationen
- ablaufsteuernde Elemente
- statische Strukturelemente (definieren Gültigkeitsbereiche)

also:

- Programmtext hat keine Bedeutung als Text
- Bedeutung erst nach Identifikation der Strukturelemente erfaßbar

1.1 Spezifikation von Übersetzungen

Aufzählung:

- Gib zu jedem Quellprogramm ein (oder mehrere) Zielprogramme an
- Aber: Quellsprachen erlauben i.a. abzählbar unendlich viele Elemente (Programme)

Intensionale Definition:

- Kompositionalität der Sprachen nutzen
- Sprachelemente definieren Bedeutung
- Übersetzungsdefinition für alle Sprachelemente definiert Übersetzer unter Nutzung der Kompositionalität

1.1 Anforderungsanalyse bei Übersetzern

- Festlegung der Quellsprache
  (Norm, Erweiterungen, Einschränkungen, ...)
- Festlegung des Niveaus der Interpretation und der Zielsprache:
  - abstrakte Maschine definieren
  - Abgrenzung Hardware/Laufzeitsystem
  - Entwurf Laufzeitsystem
- Systemeinbettung:
  - andere Übersetzer, andere Sprachen, BS-Anschluß, ... berücksichtigen
- formales Modell der Semantik zur genauen Definition von „Korrektheit" der Bedeutungsäquivalenz (wird leider meist unterlassen)

1.1 Abstrakte Maschinen

gegeben durch Typen, Objekte und Operationen, Ablaufsteuerung

- Sprache definiert eine abstrakte Maschine
  - Objekte bestimmen die Speicherelemente
  - Operationen und Ablaufsteuerung die Befehle

Beispiel: virtuelle Java-Maschine, .NET CLR

- Interpretation: Ausführung des Programms auf der Ebene der abstrakten Maschine
- Umkehrung: Jede abstrakte Maschine definiert Sprache

Kapitel 1: Einleitung

1. Motivation und Literatur
2. Übersetzungsarten
3. Semantik und korrekte Übersetzung
4. Architektur / Phasen
    4.1 Analyse
    4.2 Abbildung
    4.3 Codierung
    4.4. Datenstrukturen

1.2 Ebenen der Interpretation bzw. Übersetzung

- Reiner Interpretierer
- Vorübersetzung
- Laufzeitübersetzer
- Vollständige Übersetzung
- Makrosprachen

1.2 Reiner Interpretierer

- liest Quelltext jeder Anweisung bei jeder Ausführung und interpretiert sie
- billig, wenn nur einmal ausgeführt
- sinnvoll bei Kommandosprachen

1.2 Interpretation nach Vorübersetzung

- Analyse der Quelle und Transformation in eine für den Interpretierer günstigere Form, z.B. durch
  - Zuordnung Bezeichnergebrauch - Vereinbarung
  - Transformation in Postfixform
- nicht unbedingt Maschinenniveau
- Beispiel: Java-Bytecode, Smalltalk-Bytecode, Pascal P-Code

1.2 Laufzeitübersetzer

- Übersetzung während Programmausführung
- Auszuführender Code wird übersetzt und eingesetzt
  - schneller als reine Interpretation
  - Speichergewinn: Quelle kompakter als Zielprogramm
  - langsamer als vollständige Übersetzung, da nur lokaler Kontext benutzt (es ist auch Besseres denkbar, aber sehr schwierig)
  - gut im Test (nur kleiner Teil des Codes ausgeführt)
  - kann dynamisch ermittelte Laufzeiteigenschaften berücksichtigen (dynamische Optimierung)
- Übersetzung mit Substitution
- Beispiel: .NET, das sich wegen fehlender Typinformation nicht für Interpretation eignet

Laufzeitübersetzung erfunden 1974, CMU

1.2 Vollständige Übersetzung

Auch (maschinennahe) Zielsprache definiert eine abstrakte Maschine

- Interpretierer definiert durch
  - die Hardware der Zielmaschine
  - Betriebssystem
  - Laufzeitsystem (E/A-Unterprogramme, Speicherverwaltung, -bereinigung, ...)

1.2 Makrosprachen

- Zielsprache identisch mit (Ausschnitt der) Quellsprache
- Makros werden nach vorgegebenen Vorschriften ersetzt
- Beispiele: Textformatierung, Textverarbeitung, Vorverarbeitung (Präprozessor) von C, C++

Kapitel 1: Einleitung

1. Motivation und Literatur
2. Übersetzungsarten
3. Semantik und korrekte Übersetzung
4. Architektur / Phasen
   - 4.1 Analyse
   - 4.2 Abbildung
   - 4.3 Codierung
   - 4.4. Datenstrukturen

1.3 Definition formaler Semantik

- Algebraische Spezifikationen,
- denotationelle Semantik: Programm definiert Abbildungen,
- ...
- operationelle Semantik:
  - abstrakte Zustandsmaschinen (*abstract state machines, ASM*): Programm definiert Zustandsübergänge
  - natürliche Semantik

Am IPD benutzen wir ASMs bzw. natürliche Semantik, weil dies gleichmäßig die Beschreibung der Quell- und Zielsprache erlaubt

1.3 abstrakte Zustandsmaschinen

ASMs verallgemeinern endliche Zustandsmaschinen, d.h. endl. Automaten

- jeder Zustand q_t ist eine Algebra mit Wertemenge und Operationen
- durch einen Zustandsübergang $q_t \rightarrow q_{t+1}$ werden die Ergebnisse von Funktionsaufrufe verändert
  - q_{t+1} unterscheidet sich von q_t nur durch diese veränderten Funktionsergebnisse
- die Veränderungen können unter Bedingung stehen usw.

Beispiel: (`ct` bezeichnet den „Befehlszähler" `current-task`, nullstellige Fkt.)

```
if ct = While then
   if value(ct,condition) = true then ct := truetask(ct)
   else ct := falsetask(ct)
   endif
endif
```

1.3 Zustände

Sequentielles Programm durchläuft Zustände

$q_0\, q_1\, q_2 \ldots.$

- Zustand q_t besteht aus Objekten, die zum Zeitpunkt t existieren: $q_t = (q_t^0, q_t^1, \ldots, q_t^n)$
- Operation im Interpretierer entspricht Übergang $q_t \to q_{t+1}$
- Zustandsmenge Q die während Programmlauf existieren kann: Zustandsraum eines Programms (abhängig von Programm & Eingaben)

1.3 Beispiel: Zustände und Zustandsfolgen

- Beispiel:

```
while ( i != j )
   if (i>j)  i=i-j  else  j=j-i
```

- Algorithmus durchläuft die Zustandsfolge

```
Anfang: i = 36 j = 24
        i = 12 j = 24
Ende:   i = 12 j = 12
```

1.3 Beispiel: Äquivalenter Algorithmus

- ```
  while ( i != j )
     if (i>j)  i=i%j  else  j=j%i
  ```
- liefert für `i = 36, j = 24`
  die gleiche Zustandsfolge
- Einsicht: Algorithmus kann durch besseren ersetzt werden, wenn es nur auf das Endergebnis ankommt
  ```

1.3 Maschinenprogramm für Beispiel

```
;; Code für alpha-Prozessor
;; $i: Registernummern
;; Annahme $10 = i, $9 = j

L0:
      cmpeq   $10, $9, $0
      bne     $0, L9
      cmplt   $9, $10, $1
      beq     $1, L7
      subl    $10, $9, $10
      br      L0
L7:
      subl    $9, $10, $9
      br      L0
L9:
      end
```

Bei der Übersetzung ändert sich der Zustandsraum; insbesondere können es mehr Zustände werden ($0, $1).

Die Zuordnung von Variablen zu Registern kann sich auch ändern.

1.3 Beobachtbare Zustände

beobachtbar:

- Anfangs- und Endzustand
- Ein- und Ausgaben
- Im beobachtbaren Zustand q nur bestimmte Objekte $\underline{q}$ beobachtbar: $\underline{q}$ Ausschnitt aus $q_t = (q_t^0, q_t^1, \ldots, q_t^n)$
- Berechnung nicht beobachtbarer Objekte unerheblich, wenn sie terminiert
- Zwischenzustände unerheblich, wenn es nicht unendlich viele sind

1.3 Korrekte Übersetzung

- Betrachte nur beobachtbare Zustände terminierender Programme:
  - deterministische Programme: Folge von beobachtbaren Zuständen
  - indeterministische Programme: azyklischer Graph von beobachtbaren Zuständen,
    Programmausführung entspricht Pfad vom Anfangs- zum Endzustand in Graph

1.3 Azyklischer Zustandsgraph

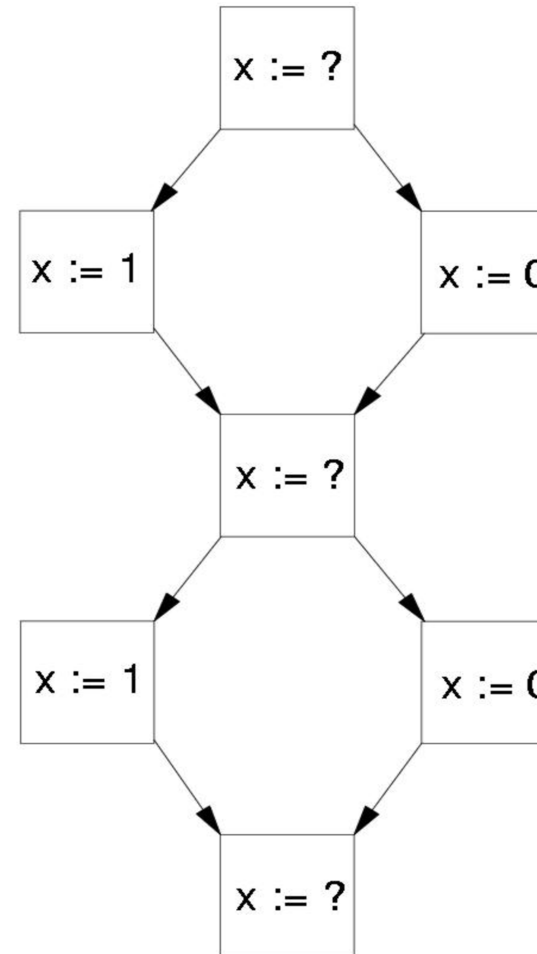
Indeterministisches Programm:

```
do
      true -> x:=1
[]    true -> x:=0
od
```

Korrekte Ausführung auch:

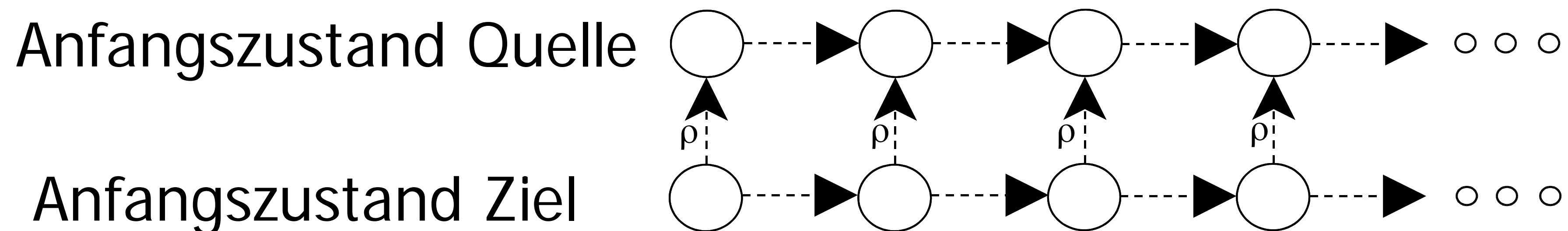
```
do true -> x:=1 od
```

Bei nichtdeterministischer Programmausführung darf sich der Übersetzer einen gültigen Pfad aussuchen.



1.3 Korrekte Übersetzung I

- Quellprogramm π
- Zielprogramm π'
- Bisimulation:
  Bei gleicher Eingabe gleiche beobachtbare Objekte in beobachtbarer Zustandsfolge
  (Relation ρ zwischen beobachtbaren Zuständen)



1.3 Eigenschaften korrekter Übersetzung

- Zulässige Zustandsfolgen bzw. Pfade werden durchlaufen
- Zielprogramm divergiert nur, wenn auch Quellprogramm divergiert
- Aber: Endlichkeit von Betriebsmitteln:
  Zielprogramm darf mit Fehler enden, auch wenn Quellprogramm mathematisch korrekt

  - Mögliche Verschärfung: Bis zur Fehlermeldung muss das Zielprogramm korrekt sein (d.h. bis zum letzten beobachtbaren Zustand vor dem Fehlerzustand korrekt)

1.3 Beschränkung der Zahlbereiche

- `for i := v up to n do ... end`
- Betrachte `n = maxint`:
  - Überprüfung, ob Überlauf bei Berechnung von (i+1)
  - Bei Überlauf: `maxint+1 = -maxint-1` bei Benutzung des Zweierkomplements
  - ☞ Schleife würde nicht terminieren
  - aktuelles Beispiel: Aufzählung aller Zeichen vom Typ character

1.3 Korrekte Übersetzung II

- π' ist korrekte Übersetzung von π, wenn für alle zulässigen Eingaben gilt:
  - wenn π' regulär einen nächsten beobachtbaren Zustand q' erreicht, dann kann π einen Zustand q mit $q \rho q'$ erreichen;
  - wenn π regulär und deterministisch einen beobachtbaren Zustand q erreicht, dann erreicht π' regulär einen Zustand q' mit $q \rho q'$ oder π' terminiert mit einer Fehlermeldung wegen Verletzung von Betriebsmittelbeschränkungen;

- regulär: endliche viele Schritte ohne Fehlermeldung

1.3 Korrekte Übersetzung III: präzise Definition

π' ist korrekte Übersetzung von π, wenn für alle zulässigen Eingaben eine der folgenden Aussagen gilt:

- Zu jeder Folge beobachtbarer Zustände $q_0', q_1', \ldots, q_k'$ von π' die regulär terminiert, gibt es eine terminierende Zustandsfolge $q_0, q_1, \ldots, q_k$ von π mit $q_i \rho q_i'$ für $0 \le i \le k$;
- Zu jeder nicht-terminierende Folge beobachtbarer Zustände $q_0', q_1', \ldots,$ von π' gibt es eine Zustandsfolge $q_0, q_1, \ldots,$ von π mit $q_i \rho q_i'$ für alle i;
- Zu jeder Folge beobachtbarer Zustände $q_0', q_1', \ldots, q_{k+1}'$ von π', die mit einer Fehlermeldung wegen Verletzung von Betriebsmittelbeschränkungen terminiert, gibt es eine Zustandsfolge $q_0, q_1, \ldots, q_k, \ldots$von π mit $q_i \rho q_i'$ für $0 \le i \le k$;

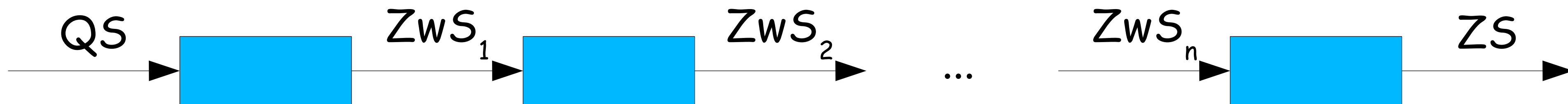
regulär: endliche viele Schritte ohne Fehlermeldung

ρ: korrespondierende beobachtbare Zustandsvariable haben gleichen Wert

Kapitel 1: Einleitung

1. Motivation und Literatur
2. Übersetzungsarten
3. Semantik und korrekte Übersetzung
4. Architektur / Phasen
    4.1 Analyse
    4.2 Abbildung
    4.3 Codierung
    4.4. Datenstrukturen

1.4 Fließbandarchitektur eines Übersetzer



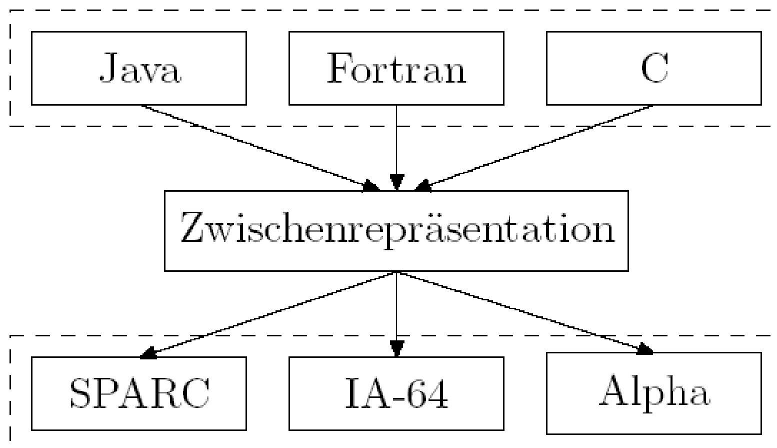
QS: Quellsprache
ZwS_i: Zwischensprache i
ZS: Zielsprache

- Die Fließbandarchitektur wurde auf Grund von Speicherbeschränkungen eingeführt worden (pragmatische Entscheidung), nicht auf Grund einer mathematischen Notwendigkeit.

1.4 Komponenten eines Übersetzers

Analyse	Symbolentschlüsselung	Lesen, Symbole erkennen
	syntaktische Analyse (Zerteilung)	Strukturbaum erzeugen
	semantische Analyse	Namens-, Typ-, Operatoranalyse, Konsistenzprüfung
Abbildung	Transformation	Daten abbilden, Operationen abbilden
	globale Optimierung	Konstantenfaltung, gemeinsame Teilausdrücke erkennen, globale Zusammenhänge erkennen und nutzen, Programmreorganisation
Codierung	Codeerzeugung	Ausführungsreihenfolge bestimmen, Befehlsauswahl, Registerzuteilung, Nachoptimierung
	Assemblieren und Binden	interne und externe Adressen auflösen, Befehle, Adressen, Daten codieren

1.4 UNCOL



- Erfunden 1961 von T. B. Steel, Jr.
- UNCOL: UNiversal Computer Oriented Language.
- Niemals direkt implementiert

- Beste Annäherung an UNCOL: .NET CLI/CLR
- Argumente
  - Ablaufsteuerung in allen Sprachen fast gleich
  - Anzahl der Basistypen gering und ähnlich
  - OO-Eigenschaften durch Verbunde simulierbar

1.4.1 Analysephase

- Aufgaben:
  - Feststellung der bedeutungstragenden Elemente
  - Zuordnung statischer Bedeutung
  - Konsistenzprüfung
- Linguistik: Syntax umfasst gesamte Analysephase
  - Problem: Nicht mit kontextfreier Grammatik (also effizient) zerteilbar; deshalb Aufteilung
  -
- Schritte:
  - Symbolentschlüsselung
  - Syntaktische Analyse (Zerteilung)
  - Semantische Analyse
  - noch keine Übersetzung! nur Analyse

1.4.1 Symbolentschlüsselung

- zerlegt Quellprogramm (Text) in Sequenz bedeutungstragender Einheiten (Symbolfolge)
- beseitigt überflüssige Zeichen(folgen) wie
- Kommentar,
- Leerzeichen, Tabulatoren usw
- Abgetrennt von Zerteilung, dadurch
  - reguläre Automaten möglich
  - Geschwindigkeit höher

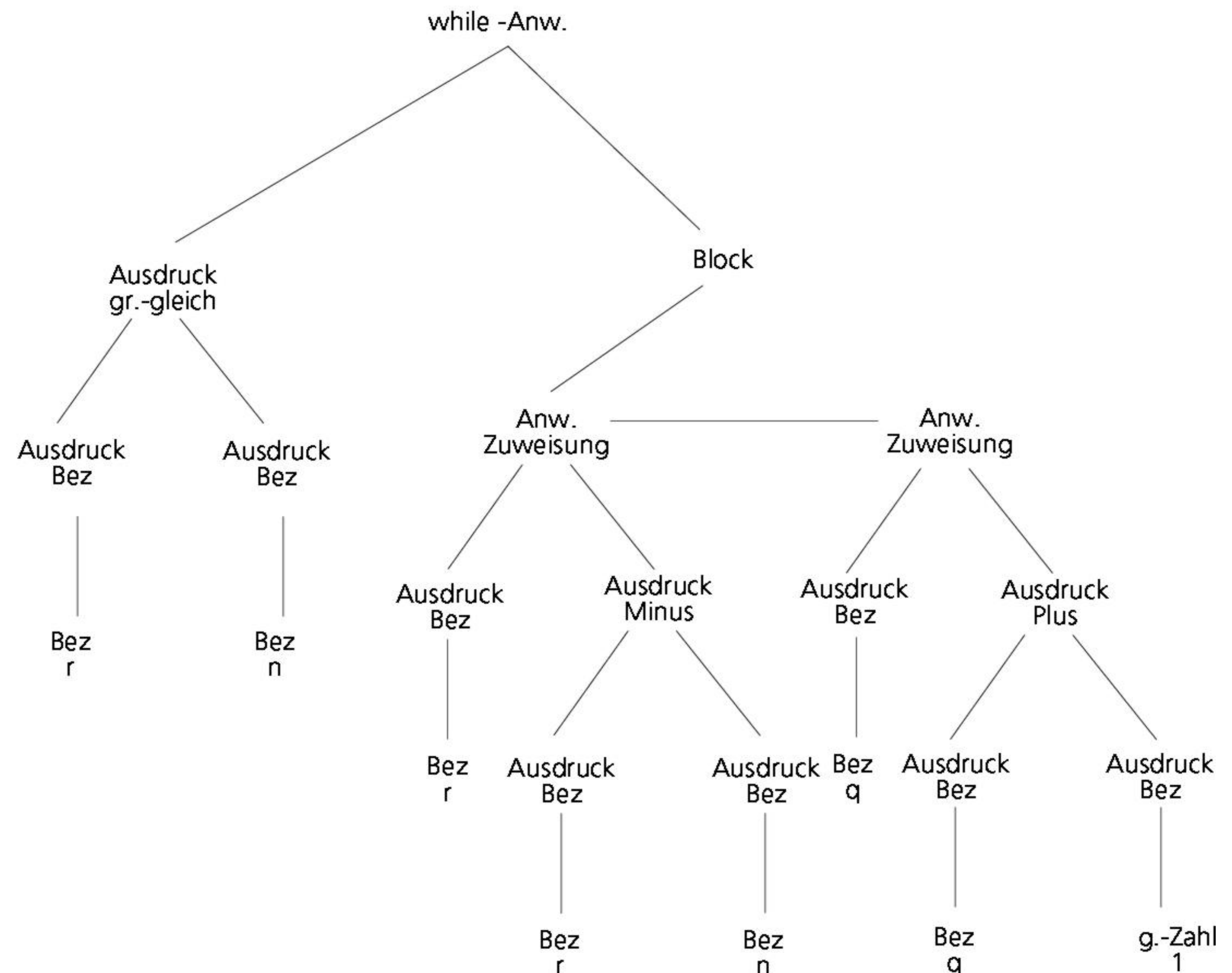
1.4.1 Zerteilung

- liest Symbolfolge
- liefert Struktur(-baum) des Programms
- aus softwaretechnischen Gründen deterministische kontextfreie Grammatik als Spezifikation

1.4.1 Strukturbaum

Beispiel:

```
while (r>=n)
{
r=r-n;
q=q+1
};
```



1.4.1 Semantische Analyse

- Analyse des Strukturbaums
  - notwendig, da Programmiersprachen kontextsensitiv
  - Bedeutung von Bezeichnern
- Namens- und Typanalyse
  - ist eng verschränkt
- Konsistenzprüfungen
  - sind Einschränkungen der Programmiersprache
  - Beispiel: Statische negative Array-Grenzen
- Bedeutungsbindung (soweit möglich)
  - Operatoridentifikation
  - Zuordnung von Namensverwendungen zu ihren Definitionen

1.4.2 Abbildungsphase

- Transformation
  - eigentliche Übersetzung
  - Speicherlayout der Objekte auf der Zielmaschine
  - Übersetzung der Operationen
  - Übersetzung der Ablaufsteuerung
  - Noch kein Zielcode generiert
- Optimierung
  - genauer optimierende Transformationen (mit Korrektheitsnachweis)
  - „interessantester Teil“ heutiger Übersetzerforschung

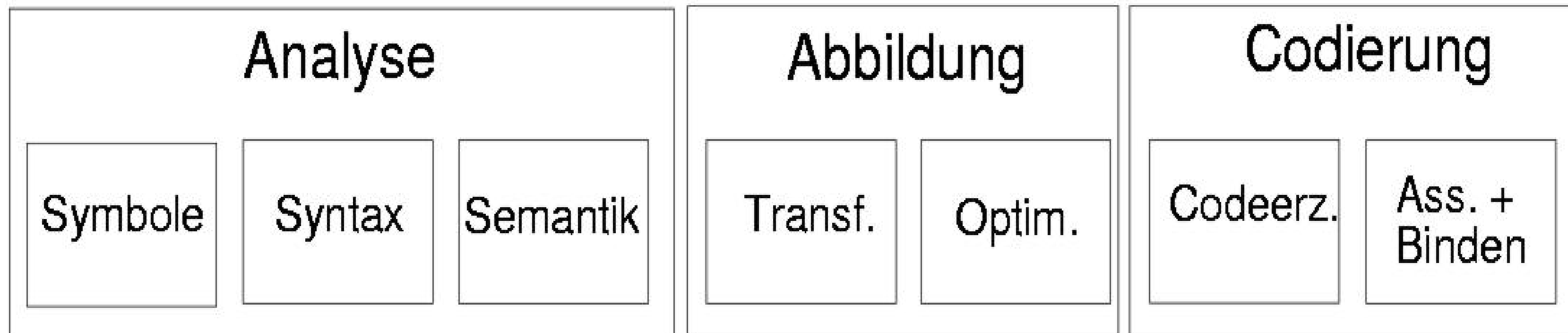
1.4.2
40 „State of the Art“ Optimierungen

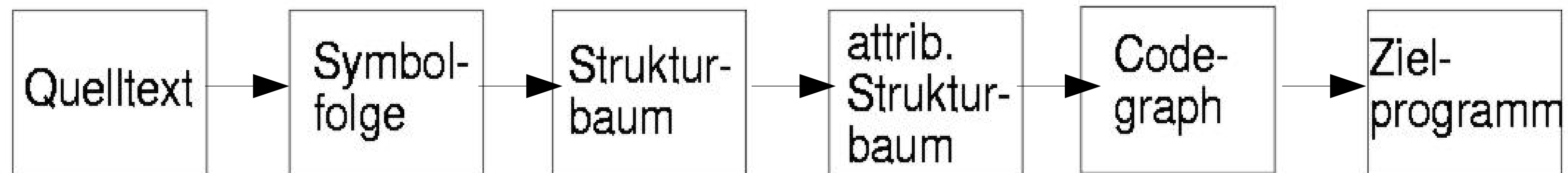
- Address Optimization
- Alias Analysis (by address)
- Alias Analysis (by type)
- Alias Analysis (const qualified)
- Array Bounds Optimization
- Bitfield Optimization
- Block Merging
- Branch Elimination
- Constant Folding
- Constant Propagation
- Cross Jumping
- CSE Elimination
- Dead Code Elimination
- Expression Simplification
- Forward Store
- Function Inlining
- Garbage Collection Optimization
- Hoisting
- If Optimization
- Induction Variable Elimination
- Instruction Combining
- Integer Divide Optimization
- Integer Modulus Optimization
- Integer Multiply Optimization
- Loop Collapsing
- Loop Fusion
- Loop Unrolling
- Narrowing
- New Expression Optimization
- Pointer Optimization
- Printf Optimization
- Quick Optimization
- Register Allocation
- SPEC-Specific Optimization
- Static Declarations
- Strength Reduction
- String Optimization
- Synchronized Function Optimization
- Tail Recursion
- Try/Catch Block Optimization
- Unswitching
- Value Range Optimization
- Virtual Funct
- Ion Optimization
- Volatile Conformance

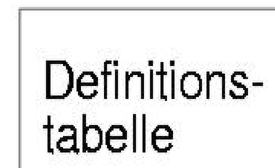
1.4.3 Codierung

- Codeerzeugung
  - wählt Befehle aus (Codeselektion)
  - bestimmt die Ausführungsreihenfolge
  - bestimmt konkrete Repräsentation
    - im Speicher
    - in Registern
- Nachoptimierung (lokale „Gucklochoptimierung“)
- dann Assemblieren und Binden

1.4.4 Modulare Struktur von Übersetzern







1.4.4 Datenstrukturen

- Symbolfolge
- (Attributierter) Strukturbaum
- Codegraph
- Zielprogramm
- Symboltabelle
- Definitionstabelle

1.4.4 Symbolfolge

- Symbol: bedeutungstragende Einheit im Programm
  - Paar aus syntaktischem Schlüssel (Token) und Merkmal (Value)
- Symbolfolge: Darstellung des Quellprogramms als Folge von Symbolen
- Schnittstelle: Symbolentschlüsseler und Zerteiler
- Vorsicht: Symbolfolge begrifflich notwendig, aber Implementierung noch offen!
  (gilt auch für die weiteren Datenstrukturen)

1.4.4 Attributierter Strukturbaum

- Strukturbaum:
  - Schachtelung der bedeutungstragenden Einheiten
  - kann kompositional Semantik zugeordnet werden
- Abstrakte Syntax:
  - Syntax stark vereinfacht und durch Struktur wiedergegeben
  - z.B. Schlüsselworte wie while und Klammerungen fallen weg
- Attribute:
  - Ergebnisse von semantischer Analyse
  - z.B. Typen, Namen, (konstante) Werte, Definitionsstellen, usw.
- Schnittstelle zwischen Syntaxanalyse, semantische Analyse, Abbildungsphase

1.4.4 Codegraph

- Darstellung des Programms mit Datenobjekten und Operationen der Zielmaschine
- Befehle für Operationen noch nicht ausgewählt (Art des Registerzugriffs, Adressierungsmodi, usw. noch offen)
- Keine Register- und Speichereinschränkungen
- Schnittstelle:
  - Transformationsphase und Codegenerierung
  - Eingabe und Ergebnis vieler Optimierungen

1.4.4 Zielprogramm

- Ausgabe der Codeselektion: symbolisch codiert
- Assemblierer: verschlüsselt binär, löst symbolische Adressen auf, soweit intern bekannt
- Binder: löst externe Symbole auf
- Ergebnis: Objektprogramm ohne symbolische Adressen (aber eventuell relativ adressiert)

1.4.4 Java Assemblierer
(symbolisch und sedezimal codiert)

```
; Purpose:   Prints out "Hello World!"

.class public examples/HelloWorld
.super java/lang/Object

.method public <init>()V
   aload_0                                          ; 0x2a
   invokespecial java/lang/Object/<init>()                  ; 0xb7 0x00 0x16
   return                                           ; 0xb1
.end method

.method public static main([Ljava/lang/String;)V
   .limit stack 2                                           ; pseudo operator
   ; push System.out onto the stack
   getstatic java/lang/System/out Ljava/io/PrintStream;   ; 0xb2 0x00 0x02
   ; push a string onto the stack
   ldc "Hello World!"                               ; 0x12 0x15
   ; call the PrintStream.println() method.
   invokevirtual java/io/PrintStream/println(Ljava/lang/String;)V
                                                    ; 0x0d 0x00 0x0c
   return                                           ; 0xb1
.end method
```

1.4.4 Symboltabelle

- Zuordnung Bezeichner, Literalkonstanten (evtl. andere Symbole) zur übersetzerinternen Codierung
- Aufbau in Symbolentschlüsselung, dann unverändert im Übersetzungslauf

1.4.4 Definitionstabelle

- Datenbank des Übersetzers
- Tabelle aller Definitionen (Vereinbarungen):
  - Zuordnung von Symbolen zu Bedeutungen
  - Wann bezeichnen die gleichen Symbole dieselben Objekte, Prozeduren
  - speichert analysierten semantischen Kontext von Symbolen