# *Compilerbau*

Wintersemester 2009 / 2010

Dr. Heiko Falk

Technische Universität Dortmund

Lehrstuhl Informatik 12

Entwurfsautomatisierung für Eingebettete Systeme

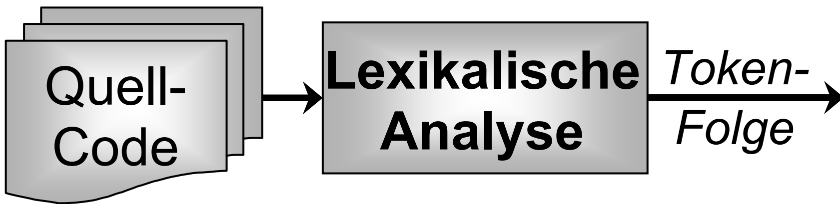
# Kapitel 2

# Interner Aufbau von Compilern

# Gliederung der Vorlesung

- Kapitel 1: Compiler – Abhängigkeiten und Anforderungen
- **Kapitel 2: Interner Aufbau von Compilern**
  - Compilerphasen
  - Strukturen Optimierender Compiler
  - Zielfunktionen von Code-Optimierungen
- Kapitel 3: Lexikalische Analyse (Scanner)
- Kapitel 4: Syntaktische Analyse (Parser)
- Kapitel 5: Semantische Analyse
- Kapitel 6: Instruktionsauswahl
- Kapitel 7: Register-Allokation
- Kapitel 8: Code-Optimierung
- Kapitel 9: Ausblick

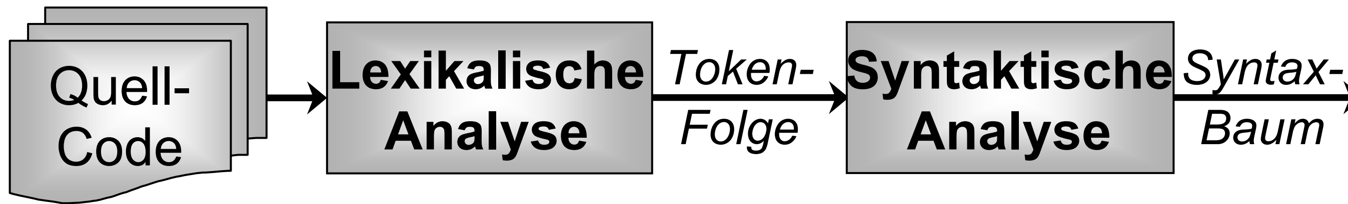
# Das Frontend (Analysephase)




**Lexikalische Analyse *(Scanner)*:**

- Zerlegung des Quellprogramms in lexikalische Einheiten *(Token)*
- Erkennung von Token (reguläre Ausdrücke, endliche Automaten)
- Token: Repräsentieren Zeichenfolgen von Bedeutung in der Quellsprache (z.B. Bezeichner, Konstanten, Schlüsselworte)

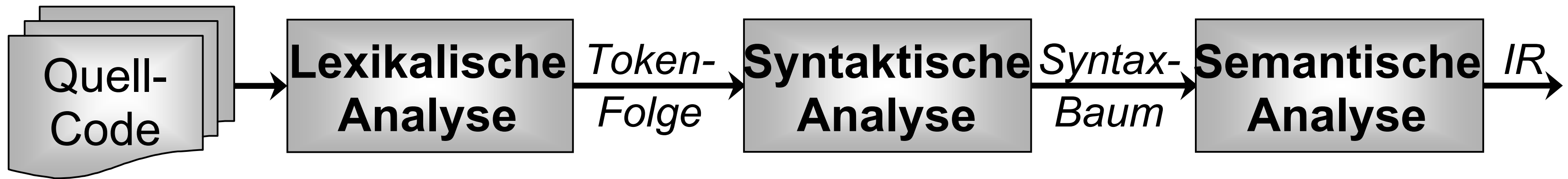
# Das Frontend (Analysephase)




**Syntaktische Analyse *(Parser)*:**

- Sei *G* Grammatik der Quellsprache
- Entscheidung, ob Tokenfolge aus *G* ableitbar ist.
- Syntaxbaum: Baumförmige Darstellung des Codes anhand während Ableitung benutzter Regeln aus *G*
- Fehlerbehandlung

# Das Frontend (Analysephase)




**Semantische Analyse *(IR Generator)*:**

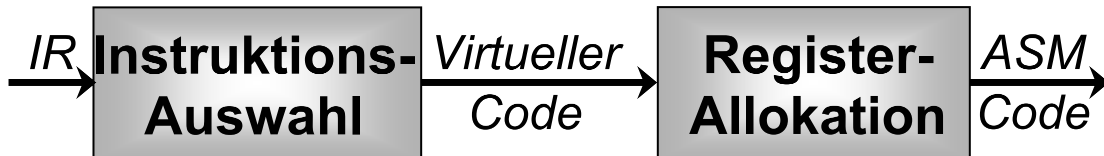
- Namensanalyse (z.B. Gültigkeitsbereiche von Symbolen)
- Prüfung, dass jeder Ausdruck korrekten Typs ist *(Typanalyse)*
- Aufbau von Symboltabellen (Abbildung von Bezeichnern zu deren Typen und Positionen)
- Erzeugung einer Internen Zwischendarstellung *(Intermediate Representation, IR)* zur weiteren Verarbeitung

# Das Backend (Synthesephase)

**Instruktionsauswahl *(Code Selector)*:**

- Auswahl von Maschinenbefehlen zur Implementierung einer IR
- *Oft – Generierung von Virtuellem Code:* Nicht lauffähiger Assemblercode; Annahme unendlich vieler Virtueller Register, anstatt begrenzt vieler Physikalischer Register
- *Alternativ – Generierung von Code mit Stack-Zugriffen:* Lauffähiger Assemblercode; sehr eingeschränkte Nutzung von Registern; Variablen werden im Speicher gehalten (Bsp.: GCC)

# Das Backend (Synthesephase)




**Registerallokation:**

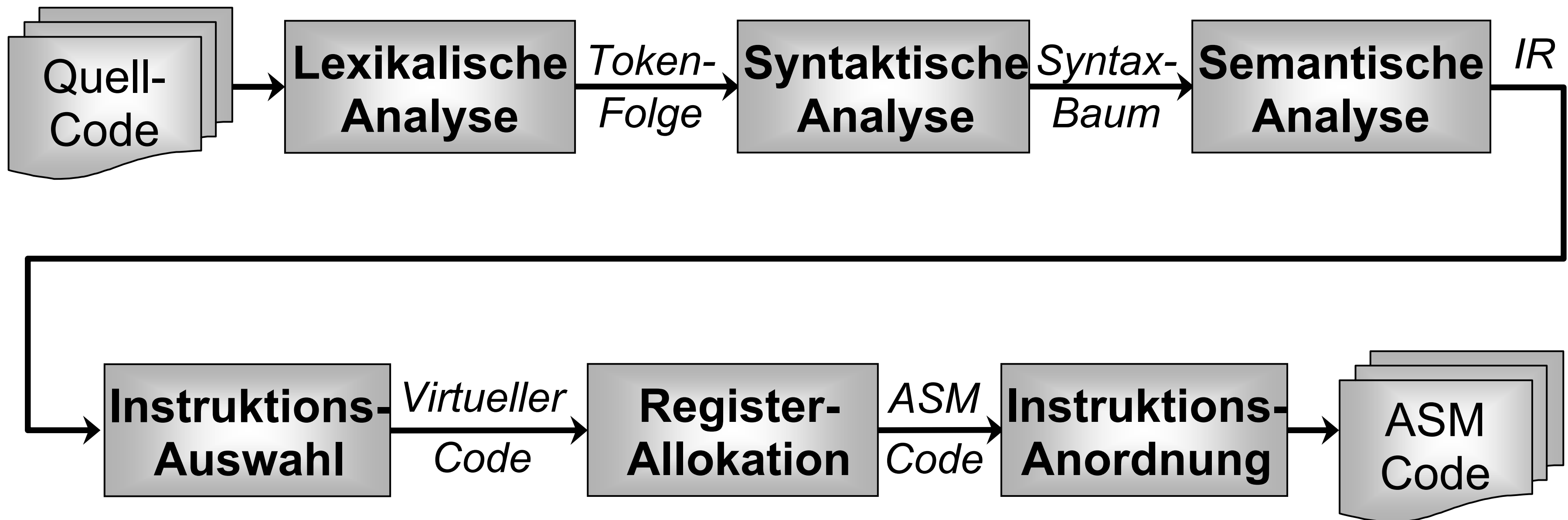
- *Entweder:* Abbildung Virtueller auf Physikalische Register
- *Oder:* Ersetzen von Stack-Zugriffen durch Speicherung von Daten in Registern
- Einfügen von Speicher-Transfers *(Aus-/Einlagern, Spilling)*, falls zu wenig physikalische Register vorhanden

# Das Backend (Synthesephase)

**Instruktionsanordnung *(Scheduler)*:**

- Umordnen von Maschinenbefehlen zur Erhöhung der Parallelität
- Abhängigkeitsanalyse zwischen Maschinenbefehlen (Daten- & Kontroll-Abhängigkeiten)

# Aufbau eines einfachen Compilers




***Wo finden in diesem Compiler nun Code-Optimierungen statt?***

# Gliederung der Vorlesung

- Kapitel 1: Compiler – Abhängigkeiten und Anforderungen
- **Kapitel 2: Interner Aufbau von Compilern**
  - Compilerphasen
  - Strukturen Optimierender Compiler
  - Zielfunktionen von Code-Optimierungen
- Kapitel 3: Lexikalische Analyse (Scanner)
- Kapitel 4: Syntaktische Analyse (Parser)
- Kapitel 5: Semantische Analyse
- Kapitel 6: Instruktionsauswahl
- Kapitel 7: Register-Allokation
- Kapitel 8: Code-Optimierung
- Kapitel 9: Ausblick

# Begriff „Code-Optimierung“

**Definition *(Optimierung)*:**

- Compilerphase, die Code einliest, ändert und ausgibt.
- Code-Änderung erfolgt mit Ziel der *Verbesserung* des Codes.

**Bemerkungen:**

- Optimierungen erzeugen i.d.R. keinen *optimalen Code* (oft unentscheidbar), sondern (hoffentlich) *besseren Code*.
- Code-Verbesserung erfolgt bzgl. einer *Zielfunktion*.

# Infrastruktur zur Code-Optimierung

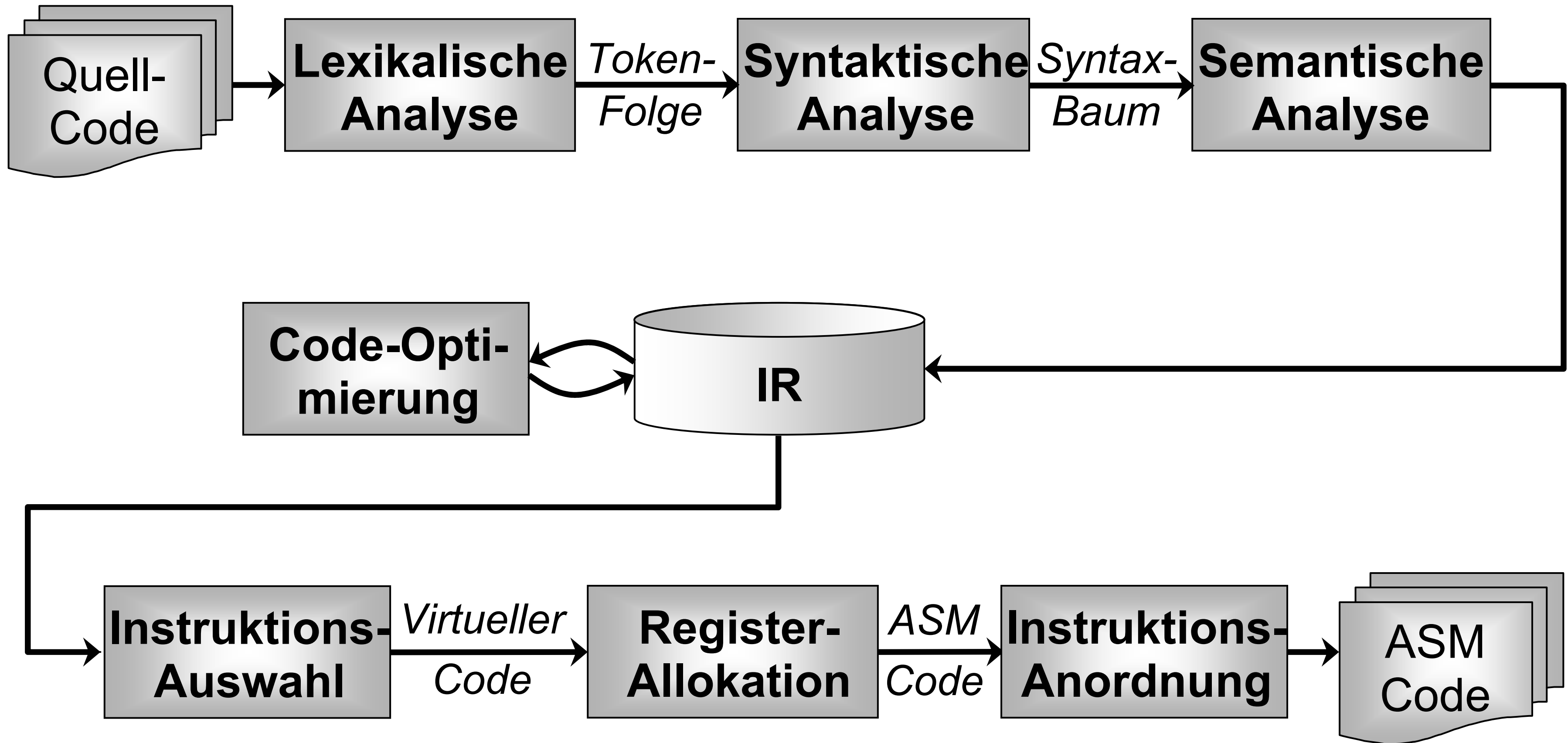
**Vorhandensein formaler Code-Analysen:**

- Code-Änderungen *müssen* wieder zu korrektem Code führen.
- Optimierung muss entscheiden, wann Änderungen am Code vorgenommen werden dürfen, und wann nicht.
- *Formale Code-Analysen* helfen bei dieser Entscheidung.
- Beispiele: Kontroll- & Datenflussanalyse, Abhängigkeitsanalyse, ...

**Intermediate Representations (IRs):**

- Interne Datenstrukturen des Compilers, die zu übersetzenden bzw. zu optimierenden Code repräsentieren. *(☞ Kapitel 5)*
- Gute IRs stellen zusätzlich zur Optimierung benötigte Code-Analysen bereit.

# Aufbau eines optimierenden Compilers



# Alternative Compiler-Strukturen (1)

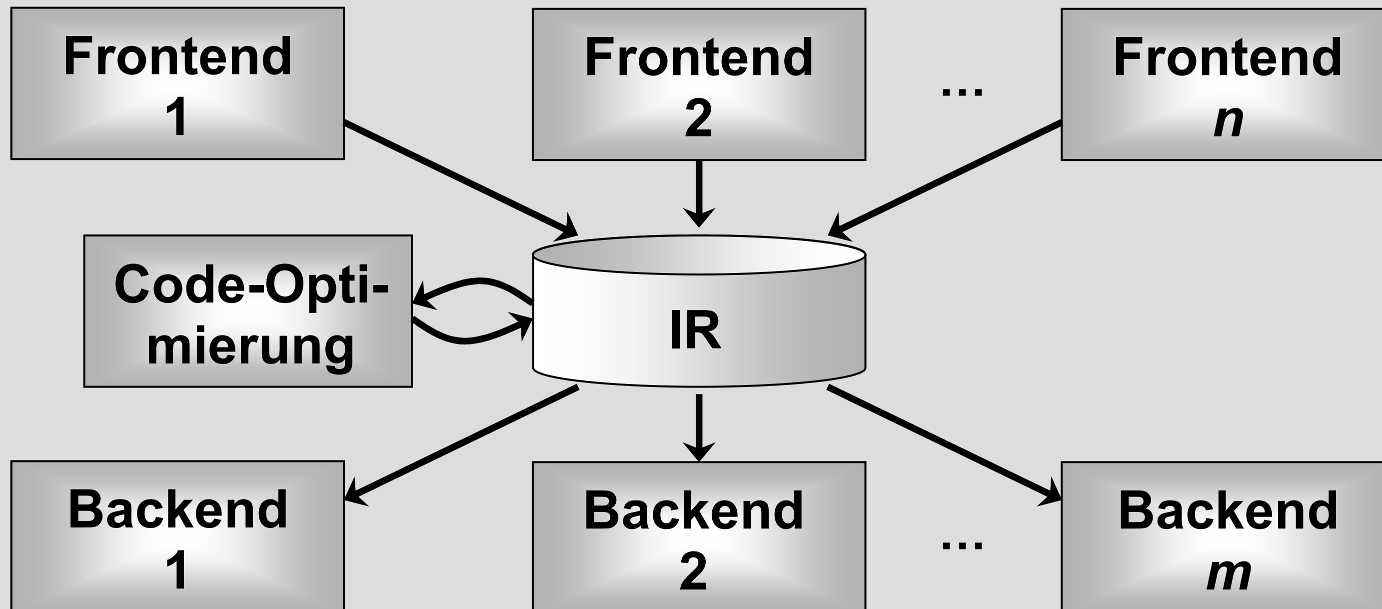
**Standardcompiler für Desktop- bzw. Server-Systeme:**

- Können oft mehrere Quellsprachen übersetzen (z.B. C, C++, Java, Pascal, …).
- ☞ Benötigen daher mehrere Frontends, pro Quellsprache eines.
- Können oft Maschinencode für mehrere Zielprozessoren erzeugen (z.B. für i386, x86_64, sparc v8, sparc v9, ppc, …).
- ☞ Benötigen daher mehrere Backends, pro Zielarchitektur eines.

- Informationsaustausch zwischen *n* Frontends und *m* Backends erfolgt über zentrale Schnittstelle, nämlich die IR des Compilers. Diese abstrahiert hinreichend von den diversen Quellsprachen und Prozessoren weg.

# Alternative Compiler-Strukturen (2)

## Standardcompiler für Desktop- bzw. Server-Systeme:




**Beispiele:**

- GNU Compiler Collection GCC
- Sun Studio Compiler

# Alternative Compiler-Strukturen (3)

**Compiler für Eingebettete Systeme:**

- Spezialcompiler, die hohe Flexibilität der Standardcompiler bzgl. verschiedener Quellsprachen und Zielprozessoren nicht brauchen.
- ANSI-C als Quellsprache im Bereich Eingebetteter Systeme etablierter „de facto-Standard".

☞ Ein ANSI-C Frontend genügt.

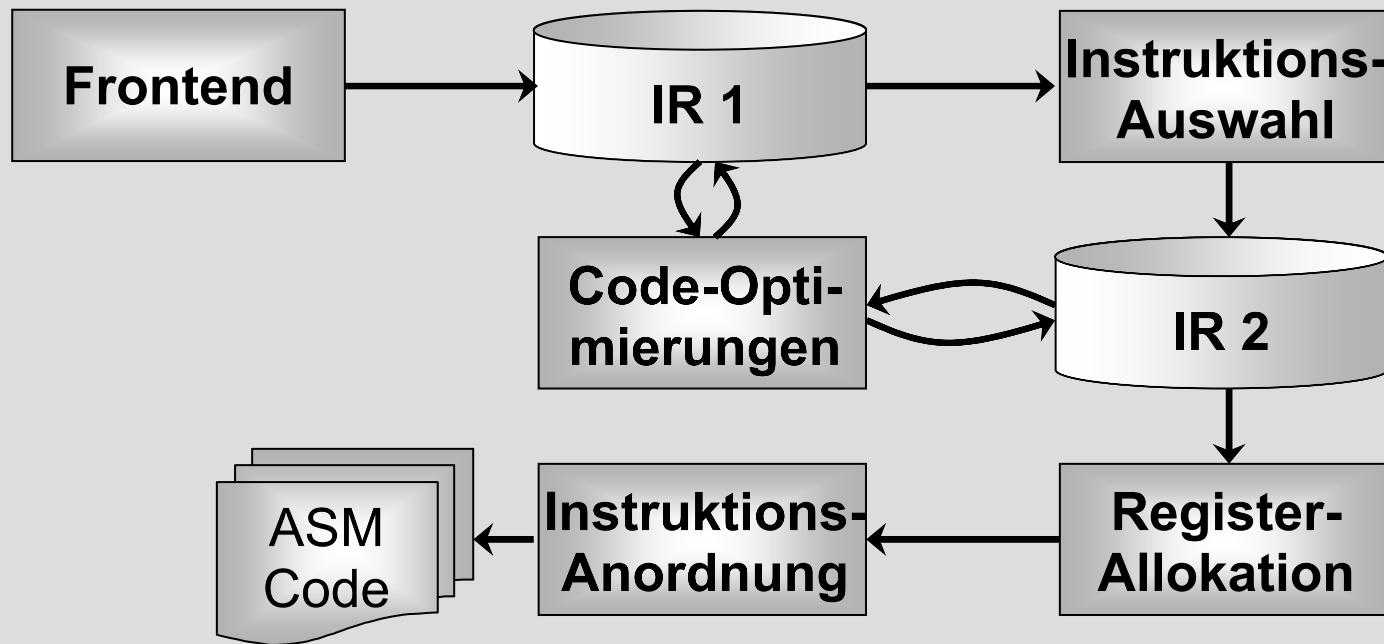
☞ Es genügt i.d.R. auch ein Backend, da Code nur für fest vorgegebene Zielarchitektur zu erzeugen ist.

- Compiler für Eingebettete Systeme sind nicht auf maximale Flexibilität ausgerichtet, sondern auf hoch-optimierten Code.

☞ Massive Code-Optimierung mit Hilfe mehrer IRs.

# Alternative Compiler-Strukturen (4)

## Compiler für Eingebettete Systeme:




## Beispiel:

- WCET-Aware C Compiler WCC
  `http://ls12-www.cs.tu-dortmund.de/research/activities/wcc`

# Gliederung der Vorlesung

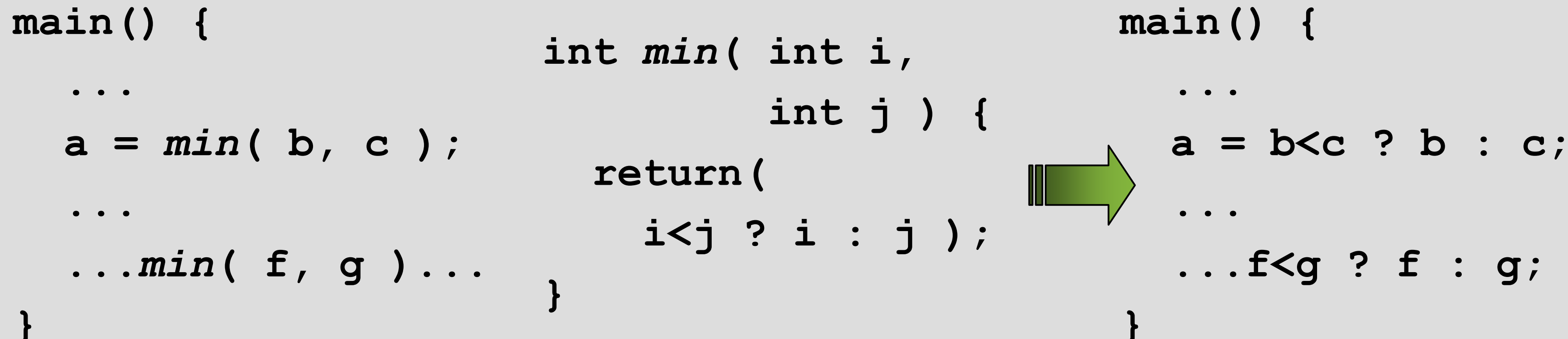
- Kapitel 1: Compiler – Abhängigkeiten und Anforderungen
- **Kapitel 2: Interner Aufbau von Compilern**
  - Compilerphasen
  - Strukturen Optimierender Compiler
  - Zielfunktionen von Code-Optimierungen
- Kapitel 3: Lexikalische Analyse (Scanner)
- Kapitel 4: Syntaktische Analyse (Parser)
- Kapitel 5: Semantische Analyse
- Kapitel 6: Instruktionsauswahl
- Kapitel 7: Register-Allokation
- Kapitel 8: Code-Optimierung
- Kapitel 9: Ausblick

# Zielfunktion: (Typische) Laufzeit

- **Durchschnittliche Laufzeit, *Average-Case Execution Time (ACET)***
  Ein ACET-optimiertes Programm soll bei einer „typischen" Ausführung (d.h. mit „typischen" Eingabedaten) schneller ablaufen.
- ***Die* Zielfunktion optimierender Compiler schlechthin.**
  **Strategie:** „Greedy", d.h. wo die Ausführung von Code zur Laufzeit eingespart werden kann, wird dies i.d.R. auch getan.
- **ACET-optimierende Compiler haben meist kein präzises Modell der ACET.**
  Exakte Auswirkung von Optimierungen auf die effektive Laufzeit ist dem Compiler unbekannt.

☞ **ACET-Optimierungen sind meist vorteilhaft, manchmal aber auch bloß neutral oder sogar nachteilig.**

# Beispiel: Function Inlining




**Potenzielle Laufzeit-Reduktion wegen:**

- Wegfallenden Codes für Parameter- / Rückgabewert-Übergabe
- Wegfallenden Codes zum Sprung in die aufgerufene Funktion
- Evtl. wegfallender Speicherplatz-Allokation zu Beginn der aufgerufenen Funktion
- Evtl. Ermöglichung anderer Optimierungen, die sonst an Funktionsgrenzen scheitern

# Zielfunktion: Codegröße

- **Erzeugung von minimal wenig Code, in Bytes gemessen**
- **Einfache Modellbildung:**
  Compiler weiß, welche Instruktionen er generiert, und wie viele Bytes jede einzelne Instruktion benötigt.

**Oft Zielkonflikt mit Laufzeit-Minimierung:** *Bsp. Inlining*

- Kopieren des Funktionsrumpfes an Stelle des Funktionsaufrufs
- Bei großen Funktionen und/oder vielen Vorkommen von Aufrufen im Code: starke Erhöhung der Codegröße!
- Codegrößen-minimierende optimierende Compiler:

☞ *Komplett deaktiviertes Function Inlining*

# Zielfunktion: Energieverbrauch (1)

- **Generierung von Code mit minimalem Energieverbrauch**
- **Modellbildung umfasst i.d.R. Prozessor *und* Speicher**

**Einfaches Energiemodell für Prozessoren:**

- *Basiskosten* eines Befehls: Energieverbrauch des Prozessors bei Ausführung nur dieses einen Befehls
- Ermittlung der Basiskosten *(z.B. für* **ADD***-Befehl)*:

```
.L0:
  ...
  ADD d0, d1, d2;
  ADD d0, d1, d2;
  ADD d0, d1, d2;
  ...
  JMP .L0;
```

- Schleife, die zu untersuchenden Befehl ***sehr oft*** enthält.
- Ausführung auf realer Hardware
- Energiemessung: Amperemeter
- Ergebnis herunterrechnen auf einmal **ADD**
- Wiederholen für kompletten Befehlssatz

# Zielfunktion: Energieverbrauch (2)

**Einfaches Energiemodell für Prozessoren:**

- *Inter-Instruktionskosten* zwischen zwei nachfolgenden Befehlen: Modellieren Aktivierung und Deaktivierung Funktionaler Einheiten *(FUs)*
- Beispiel: **ADD** wird in ALU ausgeführt, **MUL** in Multiplizierer

```
.L0:
  ADD d0, d1, d2;
  MUL d3, d4, d5;
  ADD d0, d1, d2;
  MUL d3, d4, d5;
  ...
  JMP .L0;
```

- Schleife, die zu untersuchendes Befehls-paar ***sehr oft*** enthält.
- Ausführung & Messung wie bei Basiskosten
- Ergebnis herunterrechnen auf ein Befehls-paar **ADD** und **MUL**
- Wiederholen für alle Kombinationen von FUs

# Zielfunktion: Energieverbrauch (3)

**Berechnung der Prozessor-Energie durch Compiler:**

- Summiere Basiskosten aller generierten Instruktionen
- Summiere Inter-Instruktionskosten benachbarter Befehlspaare

*[**V. Tiwari et al.**, Power Analysis of Embedded Software: A First Step Towards Software Power Minimization, IEEE Transactions on VLSI, Dezember 1994]*

**Berechnung der Speicher-Energie durch Compiler:**

- Entweder anhand von Datenblättern oder durch Messungen
- Grundlage: Energieverbrauch pro Lade- und Speichervorgang
- Einfach für Statische RAMs *(SRAM)*, schwer für Caches und Dynamische RAMs *(DRAM)*

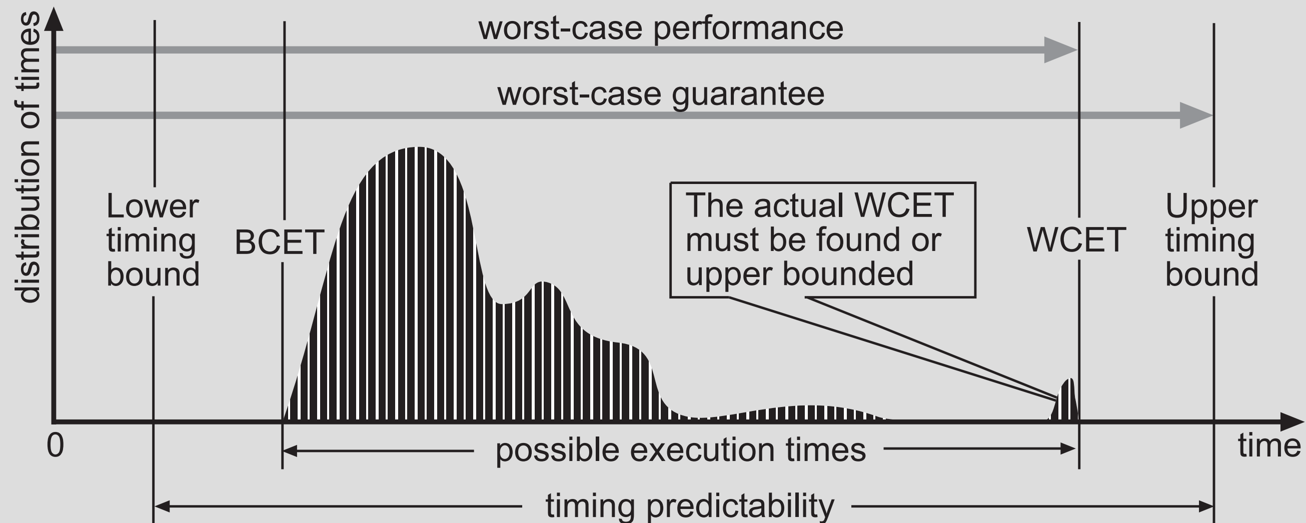
*[**S. Steinke et al.**, An Accurate and Fine Grain Instruction-Level Energy Model Supporting Software Optimizations, PATMOS Workshop, September 2001]*

# Zielfunktion: Worst-Case Laufzeit (1)

- **Worst-Case Execution Time *(WCET)*:**
  Die maximale Laufzeit eines Programms über alle denkbaren Eingabedaten hinweg.
- **Problem:**
  Ermittlung der WCET eines Programms nicht berechenbar!
  (Würde Lösen des Halte-Problems beinhalten)

# Zielfunktion: Worst-Case Laufzeit (2)

- **Lösung:** Schätzung oberer Grenzen für die echte (unbekannte) WCET




- **Anforderungen an WCET-Abschätzungen:**
  - Sicherheit *(safeness)*: $WCET \leq WCET_{EST}$!
  - Präzision *(tightness)*: $WCET_{EST} - WCET \rightarrow$ minimal

# Literatur


- Steven S. Muchnick, *Advanced Compiler Design & Implementation*, Morgan Kaufmann, 1997.
  ISBN 1-55860-320-4
- Andrew W. Appel, *Modern compiler implementation in C*, Cambridge University Press, 1998.
  ISBN 0-521-58390-X

# Zusammenfassung

- **Bedeutung einzelner Phasen eines Compilers**
- **Anordnung von Optimierungen innerhalb des Compilers**
- **Zielfunktionen:**
  **ACET, Codegröße, Energieverbrauch, WCET**