Low-Level Virtual Machine

Ein Überblick

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Compiler II: Fortgeschrittene Themen
17. Juni 2014

Julian Oppermann

Eingebettete Systeme und Anwendungen, Technische Universität Darmstadt

Embedded Systems & Applications

Agenda

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Was ist LLVM überhaupt genau?
- Entstehungsgeschichte
- Grober Überblick für die Tools
- C-Frontend
- **Einführung in die Zwischendarstellung**
- Fallstudie: Wie programmiert man eine Optimierung?
- Ein paar interessante Eigenschaften der Codeerzeugung

$\rightarrow$ Exkurs in die echte Welt

Bitte Themenwünsche für nächste Woche überlegen!

Wo wird LLVM verwendet?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Grundlage für die Apple-Entwicklungswerkzeuge
  - Wenn Sie einen Mac oder ein iOS-Gerät dabei haben, läuft darauf Code, der mit LLVM übersetzt wurde.
- Safari bekommt einen LLVM-basierten Just-in-Time-Compiler für JavaScript
- NVIDIA nutzt LLVM als OpenCL-Compiler
- Google baut für PNaCl (Portable Native Client, Chrome) auf LLVM auf
- In der Forschung (einige Beispiele)
  - Nymble (High-level Synthese, von unserem Lehrstuhl)
  - LegUp (auch HLS, von der Univ. Toronto)
  - DeAliaser (Speicherabhängigkeiten ignorieren und durch Transactional Memory abfangen, Univ. Illinois, Urbana-Champaign)
  - ...

Was ist LLVM (nicht)?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- LLVM ist **kein** Compiler!
- Die LLVM-IR ist eine Zwischendarstellung, auf die man eine Vielzahl von Quellsprachen abbilden kann.
- “The LLVM Compiler Infrastructure Project” koordiniert die Entwicklung der IR und vieler weiterer Unterprojekte.
- Typischer Einsatz als Compiler:
  `clang` liest Quelltext und *benutzt* die LLVM-Bibliotheken zum Aufbau der IR, Optimierung und Codeerzeugung.

LLVM-Projekt
Übersicht

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

LLVM Core	LLVM-IR, Analysen, Optimierungen, Codeerzeugung
clang	C/C++/Objective-C Frontend
dragonegg	Schnittstelle zu den Frontends der GCC
LLDB	Debugger
libc++	C++-Standardbibliothek
compiler-rt	Laufzeitumgebung für Architekturen, denen bestimmte Instruktionen fehlen
vmkit	LLVM-basierte virtuelle Maschinen für Java und .NET
polly	Schleifentransformationen zur Verbesserung der Cachelokalität und zur automatischen Parallelisierung
	⋮

LLVM-Projekt
Geschichte

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- LLVM stand ursprünglich für **L**ow **L**evel **V**irtual **M**achine.
  - Aktuell wird nur noch das Akronym verwendet, da das Projekt mittlerweile viel umfassender geworden ist.
- Begonnen Dezember 2000 von Chris Lattner und Vikram Adve an der University of Illinois.
- Heute ein erfolgreiches Open Source-Projekt unter BSD-kompatibler Lizenz.
- Gewinner des ACM Software System Award 2012.
  - In der Gesellschaft von Eclipse (2011), Java (2002), Apache (1999), WWW (1995), TCP/IP (1991), TeX (1986), UNIX (1983), ...
- Aktuelle Version: LLVM 3.4.1

LLVM-Projekt

Was macht LLVM besonders?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

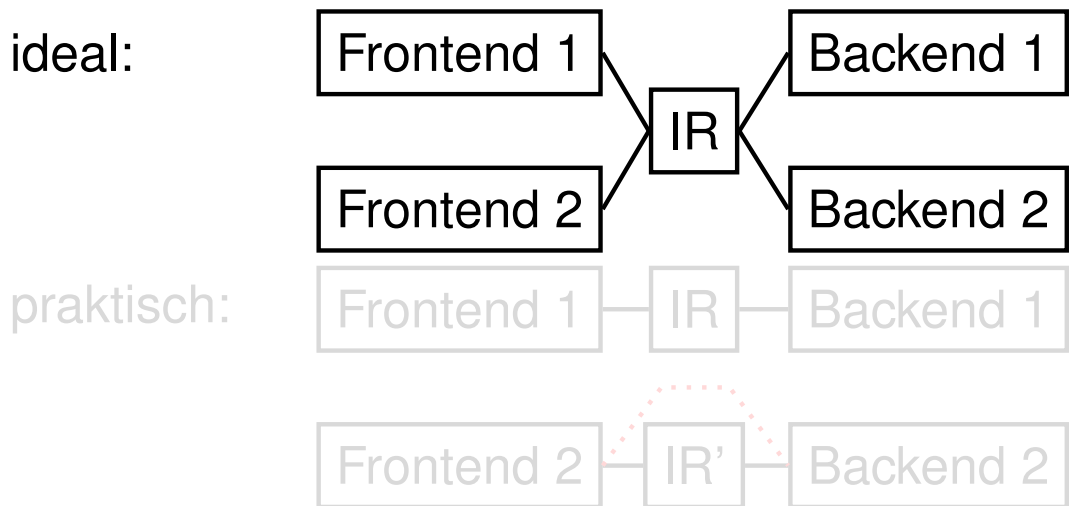
- LLVM-IR ist eigenständige Sprache, enthält alle Programminformationen.
- Ermöglicht echte Entkopplung von Frontend, Optimierungen und Codeerzeugung.
  - Im Gegensatz zu allen anderen Sprachimplementierungen zu Beginn der Entwicklung!

LLVM-Projekt

Was macht LLVM besonders?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- LLVM-IR ist eigenständige Sprache, enthält alle Programminformationen.
- Ermöglicht echte Entkopplung von Frontend, Optimierungen und Codeerzeugung.
  - Im Gegensatz zu allen anderen Sprachimplementierungen zu Beginn der Entwicklung!

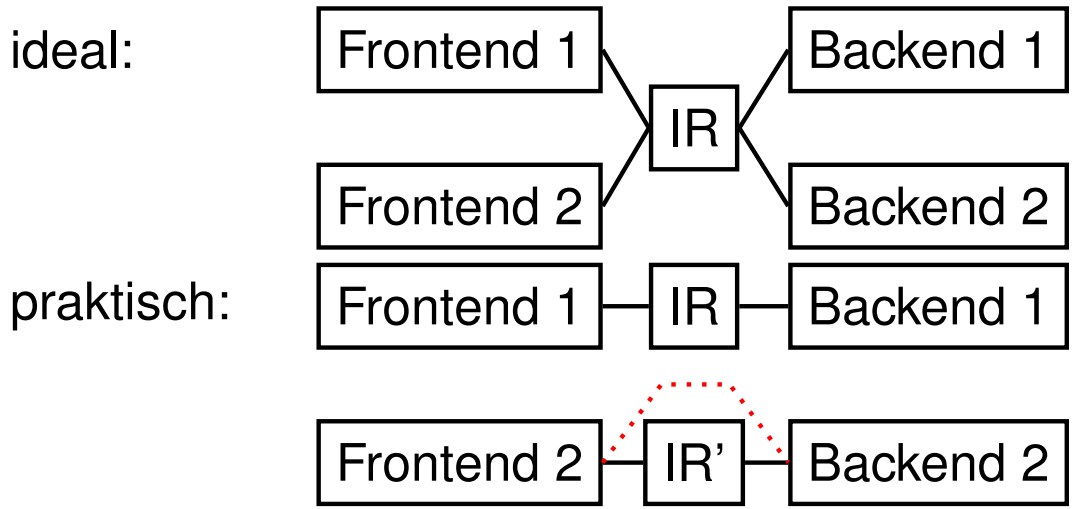


LLVM-Projekt

Was macht LLVM besonders?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- LLVM-IR ist eigenständige Sprache, enthält alle Programminformationen.
- Ermöglicht echte Entkopplung von Frontend, Optimierungen und Codeerzeugung.
  - Im Gegensatz zu allen anderen Sprachimplementierungen zu Beginn der Entwicklung!

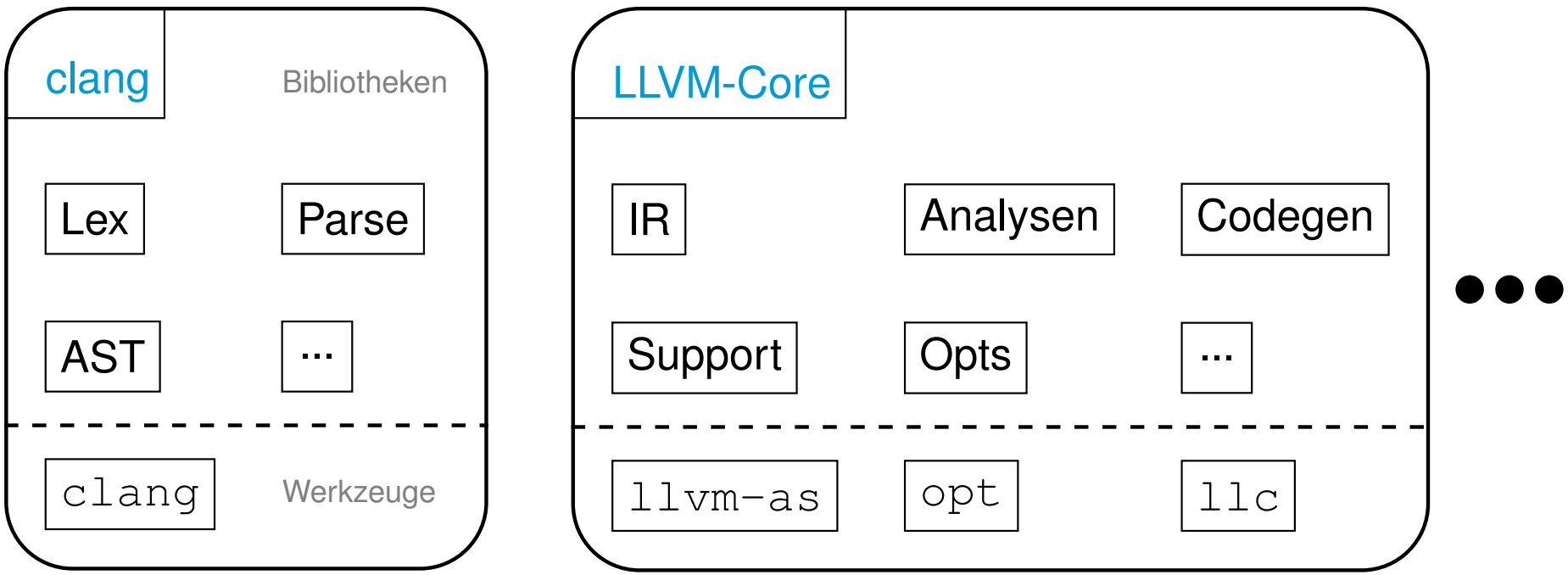


LLVM-Projekt

Was macht LLVM besonders?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Modulare Architektur, bestehend aus wiederverwendbaren Bibliotheken



Embedded Systems & Applications

LLVM-Projekt

Was macht LLVM besonders?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Es gibt drei **äquivalente** Darstellungsformen:
  - textuell (Assembler-Format, siehe Beispiel) `prog.ll`
  - binär (Bitcode-Format) `prog.bc`
  - im Speicher (C++-Objekte)
- Jede Darstellungsform enthält stets alle Details des Programms
  $\rightarrow$ klare Schnittstelle für Analysen und Transformationen.
- Für alle Analysen und Transformation wird ausschließlich diese IR verwendet.

LLVM-Projekt

Was macht LLVM besonders?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

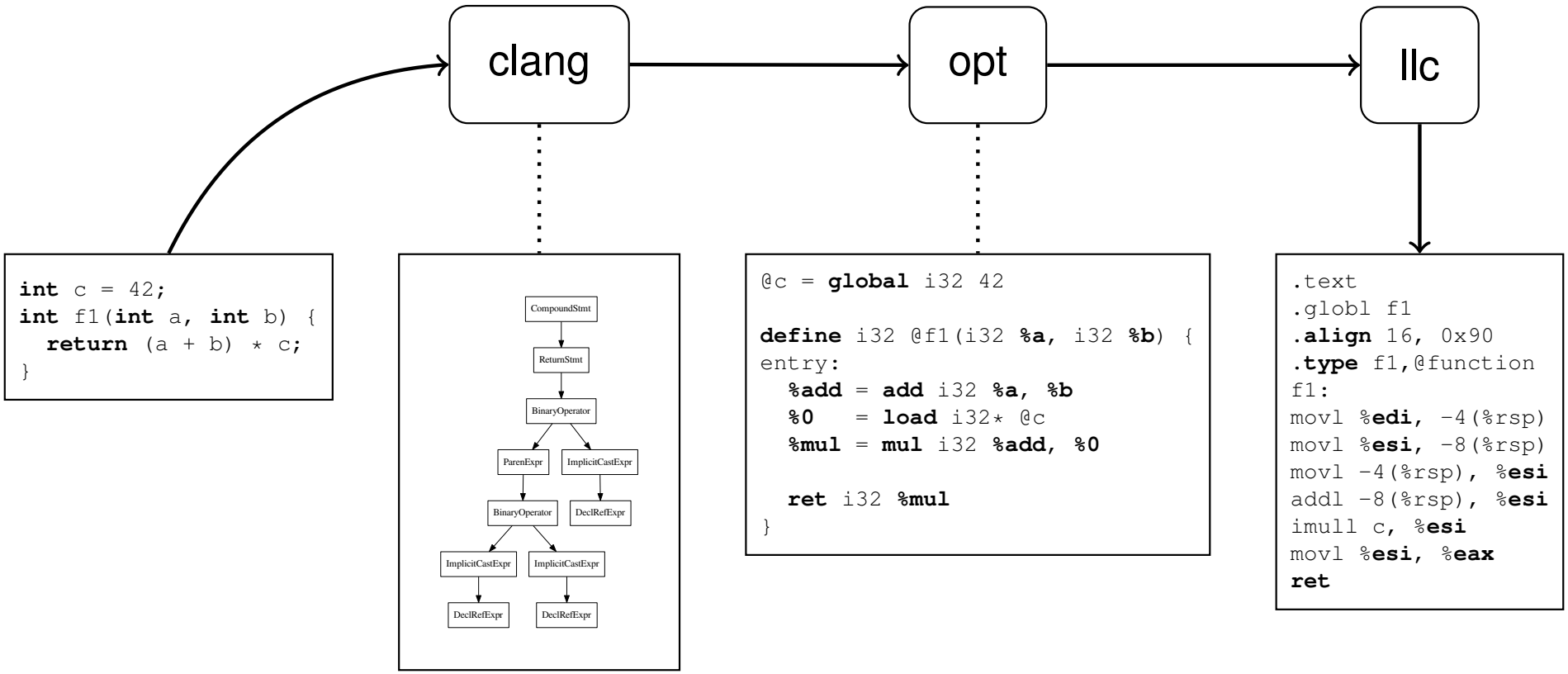
- clang
  - Schneller als gcc (compile time)
  - Bessere Fehlermeldungen

```
$ gcc-4.2 -fsyntax-only t.c
t.c:7: error: invalid operands to binary + (have 'int' and 'struct A')
$ clang -fsyntax-only t.c
t.c:7:39: error: invalid operands to binary expression ('int' and 'struct A')
  return y + func(y ? ((SomeA.X + 40) + SomeA) / 42 + SomeA.X : SomeA.X);
                      ~~~~~~~~~~~~~~~ ^ ~~~~~
```

- LLVM Core
  - Aggressive skalare Optimierungen
  - Link-time optimization
  - “easily hackable”

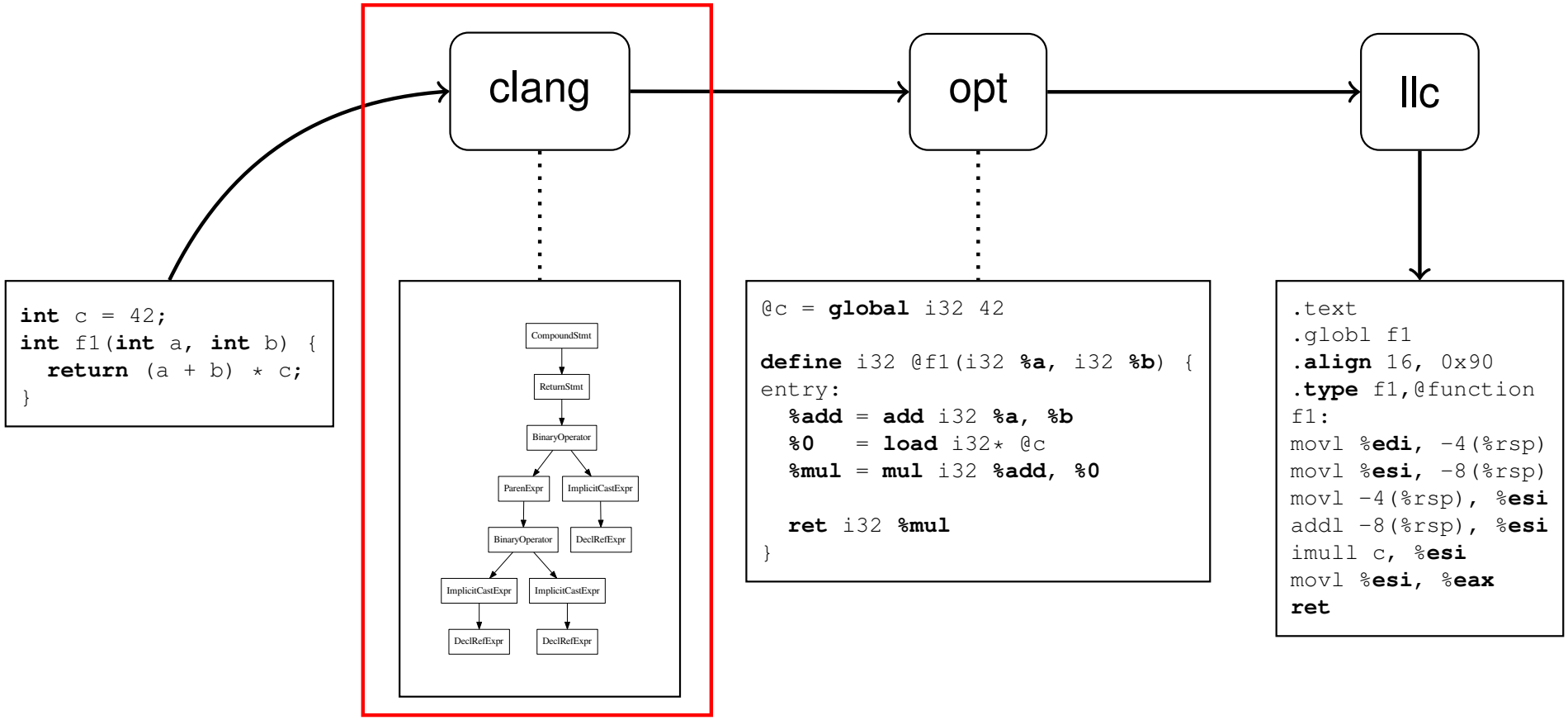
Übersicht

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Übersicht

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



clang
Parser

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Benutzt einen handgeschriebenen Parser nach dem Prinzip des rekursiven Abstiegs.
- Beispiel: if-Statement (stark vereinfacht)

```
StmtResult Parser::ParseIfStatement(SourceLocation *TrailingElseLoc) {
  SourceLocation IfLoc = ConsumeToken();  // eat the 'if'.

  if (Tok.isNot(tok::l_paren)) return StmtError();

  if (ParseParenExprOrCondition(CondExp, CondVar, IfLoc, true)) return StmtError();

  StmtResult ThenStmt(ParseStatement(&InnerStatementTrailingElseLoc));

  StmtResult ElseStmt;
  if (Tok.is(tok::kw_else))
    ElseStmt = ParseStatement();

  return Actions.ActOnIfStmt(...);
}
```

clang
AST

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Klassenhierarchien für Deklarationen (`Decl`), Anweisungen (`Stmt`) und Typen (`Type`).
  - Ausdrücke (`Expr`) sind Unterklassen von `Stmt`.
- Wurzelknoten ist `TranslationUnitDecl`.
- Keine gemeinsame Oberklasse, jeder Knotentyp spezifiziert seine eigenen Zugriffsmethoden:

```
class IfStmt : public Stmt {
  ...
  Expr *getCond() { return reinterpret_cast<Expr*>(SubExprs[CO
  Stmt *getThen() { return SubExprs[THEN]; }
  Stmt *getElse() { return SubExprs[ELSE]; }
  ...
}
```

- Traversierung mittels RecursiveASTVisitor (“Makromonster”).

clang
AST (Beispiel)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int
addabs(int a,
    int b)
{
  int x;
  if (a*b >= 0)
    x = a+b;
  else
    x = a-b;
  return x;
}
```

```
TranslationUnitDecl 0x5ff6ba0 <<invalid sloc>>
`-FunctionDecl 0x5ff75d0 <../llvm-vortrag/cfg.c:1:1, line:8:1> addabs 'int (int, int)'
  |-ParmVarDecl 0x5ff7490 <line:1:12, col:16> a 'int'
  |-ParmVarDecl 0x5ff7500 <col:19, col:23> b 'int'
  `-CompoundStmt 0x6023f10 <col:26, line:8:1>
    |-DeclStmt 0x5ff76e8 <line:2:2, col:7>
    | `-VarDecl 0x5ff7690 <col:2, col:6> x 'int'
    |-IfStmt 0x6023e80 <line:3:2, line:6:9>
    | |-<<<NULL>>>
    | |-BinaryOperator 0x5ff77c8 <line:3:6, col:13> 'int' '>='
    | | |-BinaryOperator 0x5ff7780 <col:6, col:8> 'int' '*'
    | | | | `-DeclRefExpr 0x5ff7700 <col:6> 'int' lvalue ParmVar 0x5ff7490 'a' 'int'
    | | | `-DeclRefExpr 0x5ff7728 <col:8> 'int' lvalue ParmVar 0x5ff7500 'b' 'int'
    | | `-IntegerLiteral 0x5ff77a8 <col:13> 'int' 0
    | |-BinaryOperator 0x6023d60 <line:4:3, col:9> 'int' '='
    | | |-DeclRefExpr 0x5ff77f0 <col:3> 'int' lvalue Var 0x5ff7690 'x' 'int'
    | | `-BinaryOperator 0x5ff7898 <col:7, col:9> 'int' '+'
    | |   | `-DeclRefExpr 0x5ff7818 <col:7> 'int' lvalue ParmVar 0x5ff7490 'a' 'int'
    | |   `-DeclRefExpr 0x5ff7840 <col:9> 'int' lvalue ParmVar 0x5ff7500 'b' 'int'
    | `-BinaryOperator 0x6023e58 <line:6:3, col:9> 'int' '='
    |   |-DeclRefExpr 0x6023d88 <col:3> 'int' lvalue Var 0x5ff7690 'x' 'int'
    |   `-BinaryOperator 0x6023e30 <col:7, col:9> 'int' '-'
    |     | `-DeclRefExpr 0x6023db0 <col:7> 'int' lvalue ParmVar 0x5ff7490 'a' 'int'
    |     `-DeclRefExpr 0x6023dd8 <col:9> 'int' lvalue ParmVar 0x5ff7500 'b' 'int'
    `-ReturnStmt 0x6023ef0 <line:7:2, col:9>
      `-DeclRefExpr 0x6023eb0 <col:9> 'int' lvalue Var 0x5ff7690 'x' 'int'
```

clang
Codeerzeugung (LLVM-IR)

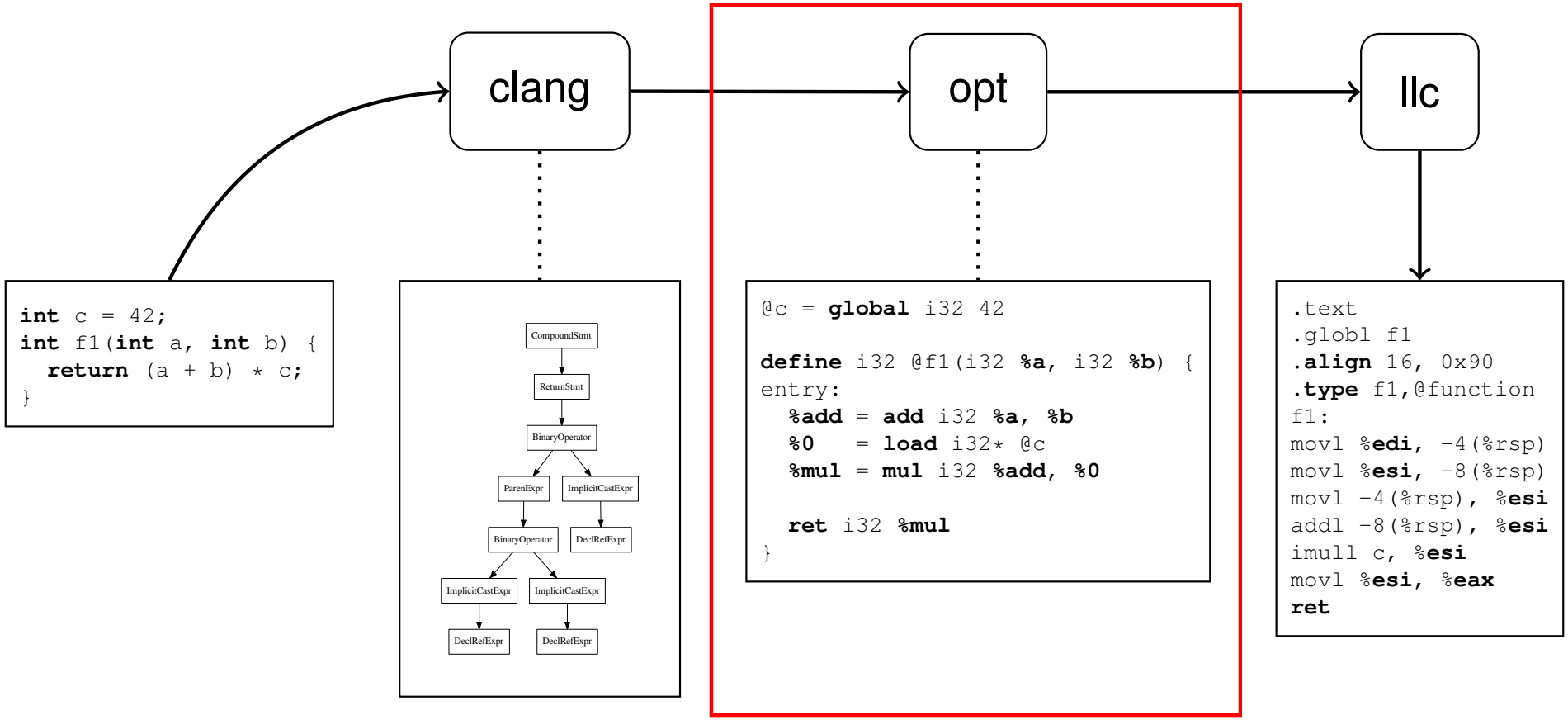
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- (Gekürzte) LLVM-IR-Generierung für ein If-Statement

```
void CodeGenFunction::EmitIfStmt(const IfStmt &S) {
  llvm::BasicBlock *ThenBlock = createBasicBlock("if.then");
  llvm::BasicBlock *ContBlock = createBasicBlock("if.end");
  llvm::BasicBlock *ElseBlock = ContBlock;
  if (S.getElse())
    ElseBlock = createBasicBlock("if.else");
  EmitBranchOnBoolExpr(S.getCond(), ThenBlock, ElseBlock);

  EmitBlock(ThenBlock);
  EmitStmt(S.getThen());
  EmitBranch(ContBlock);

  if (const Stmt *Else = S.getElse()) {
    EmitBlock(ElseBlock);
    EmitStmt(Else);
    EmitBranch(ContBlock);
  }

  EmitBlock(ContBlock, true);
}
```

Übersicht

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Embedded Systems & Applications

LLVM-IR
Ein Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int c = 42;
int f1(int a, int b) { return (a + b) * c; }
```


Embedded Systems & Applications

LLVM-IR
Ein Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int c = 42;
int f1(int a, int b) { return (a + b) * c; }
```

```
@c = global i32 42

define i32 @f1(i32 %a, i32 %b) {
entry:
  %add = add i32 %a, %b
  %0   = load i32* @c
  %mul = mul i32 %add, %0

  ret i32 %mul
}
```


Embedded Systems & Applications

LLVM-IR
Ein Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int c = 42;
int f1(int a, int b) { return (a + b) * c; }
```

```
@c = global i32 42
```

Globale Variable

```
define i32 @f1(i32 %a, i32 %b) {
entry:
  %add = add i32 %a, %b
  %0   = load i32* @c
  %mul = mul i32 %add, %0

  ret i32 %mul
}
```

Funktionsdefinition

Embedded Systems & Applications

LLVM-IR
Ein Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int c = 42;
int f1(int a, int b) { return (a + b) * c; }
```

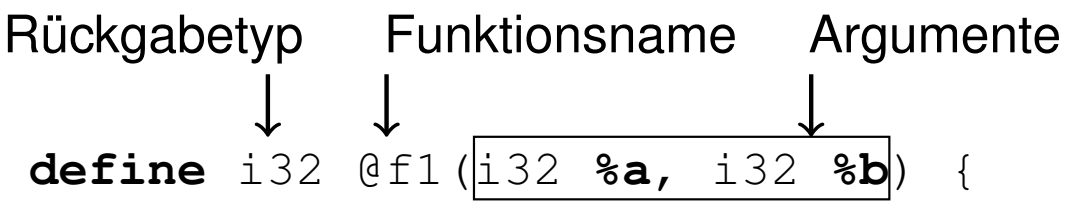
```
@c = global i32 42
```

Name — Typ — Initialer Wert

LLVM-IR
Ein Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int c = 42;
int f1(int a, int b) { return (a + b) * c; }
```



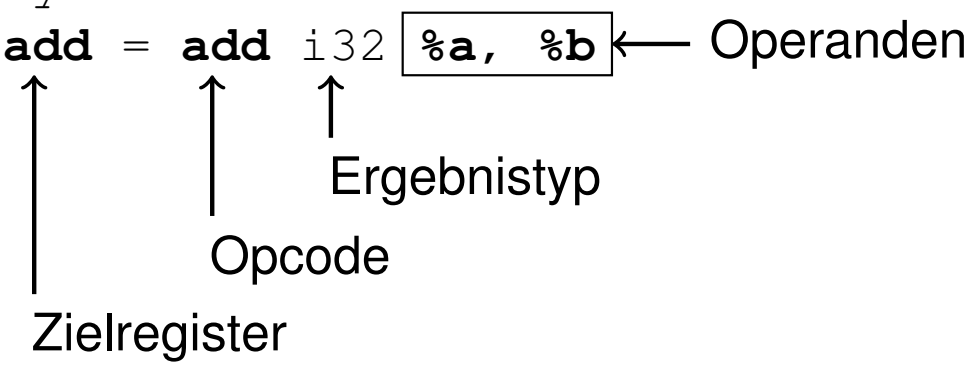
Embedded Systems & Applications

LLVM-IR
Ein Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int c = 42;
int f1(int a, int b) { return (a + b) * c; }
```

```
define i32 @f1(i32 %a, i32 %b) {
entry:
  %add = add i32 %a, %b
```



Embedded Systems & Applications

LLVM-IR
Ein Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int c = 42;
int f1(int a, int b) { return (a + b) * c; }
```

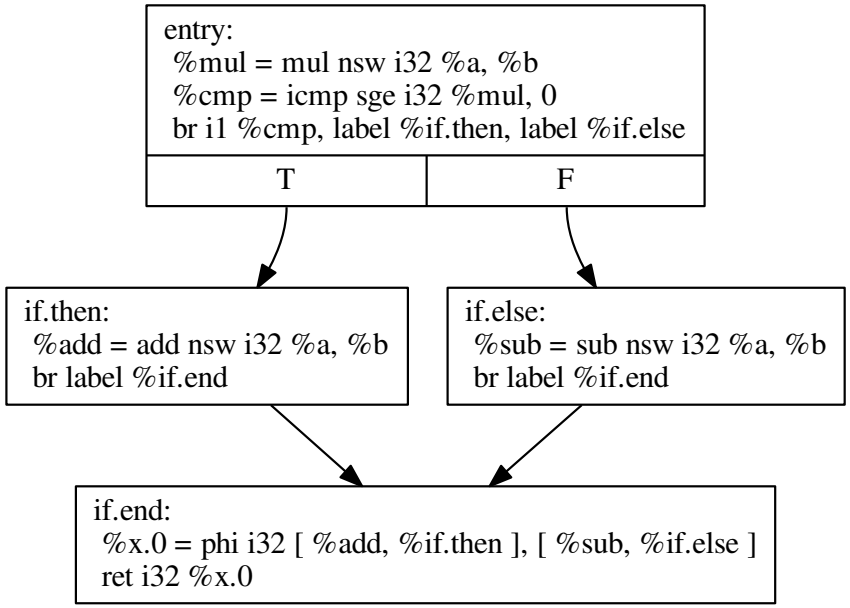
```
@c = global i32 42

define i32 @f1(i32 %a, i32 %b) {
entry:
  %add = add i32 %a, %b
  %0   = load i32* @c
  %mul = mul i32 %add, %0

  ret i32 %mul
}
```


Embedded Systems & Applications

LLVM-IR
Beispiel mit Steuerfluss

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int addabs(int a, int b) {
  int x;
  if (a*b >= 0)
    x = a+b;
  else
    x = a-b;
  return x;
}
```



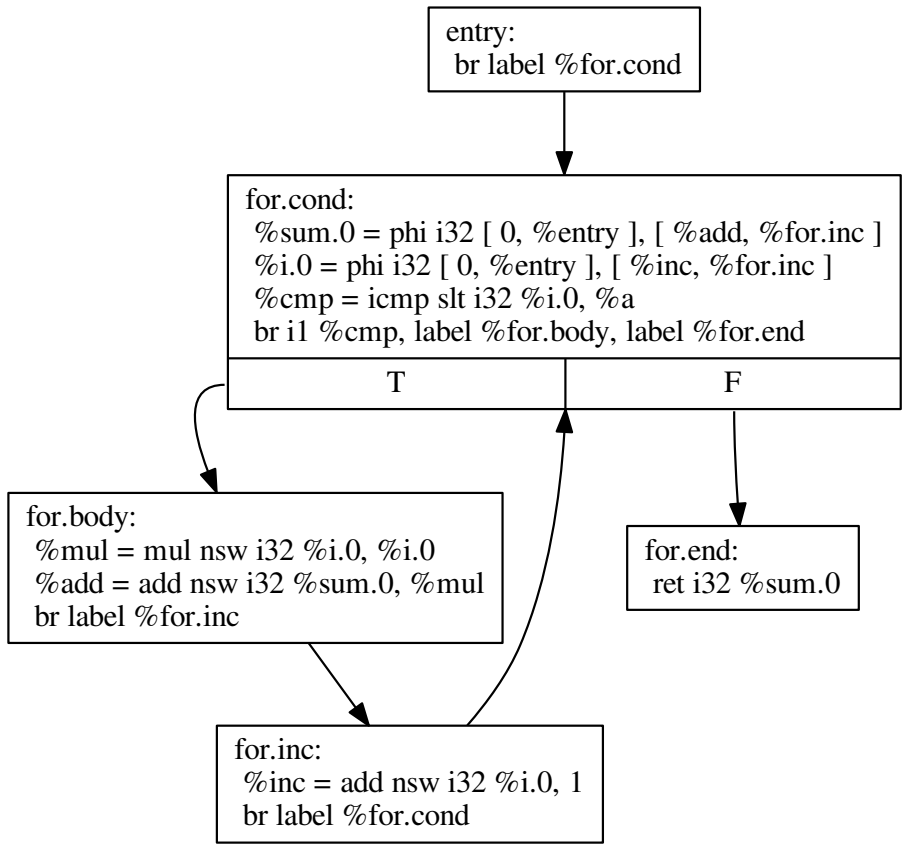
CFG for 'addabs' function

LLVM-IR

Beispiel mit Schleife

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int sumsqares(int a) {
  int sum = 0, i;
  for (i=0; i<a; i++) {
    sum += i*i;
  }
  return sum;
}
```



CFG for 'sumsqares' function

LLVM-IR

“Virtuelle Maschine”

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Erkenntnis: Sieht aus wie eine Assembler-Darstellung für einen RISC-Prozessor.
  - unendlich viele Register
  - Jedes Register kann nur einmal von einer eindeutig bestimmten Instruktion beschrieben werden ($\rightarrow$ **SSA-Form**).
  - typisiert
- “low level”: im Kontrast zu Java / .NET VMs
  - keine Klassen/Objekte
  - keine Vererbung
  - keine Polymorphie
  - kein Exception Handling
  - ...
  - **Aber:** alle diese Konstrukte lassen sich auf LLVM-IR abbilden!

LLVM-IR

Befehlssatz (Besonderheiten)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

phi Die Φ-Funktion der SSA-Form

- explizite Instruktion, Tupel von Wert und Label als Argumente
- Beispiel:

```
%x = phi i32 [ %add, %then ], [ %sub, %else ]
```

call Funktionsaufruf

- abstrahiert Aufrufkonventionen, erhält Funktionsname und -argumente als Parameter
- Beispiel: `%y = call i32 @Get_Bits(i32 1)`

switch Switch-Instruktion

- Beispiel:

```
switch i32 %val, label %def [
                 i32 0, label %onzero,
                 i32 1, label %onone,
                 i32 2, label %ontwo ]
```

LLVM-IR
Typsystem

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Jeder Wert hat einen Typ (unabhängig von der Quellsprache)!

- Integerwerte: `i1, i8, i16, i32, ...`
  alle Bitbreiten möglich, keine signed/unsigned-Unterscheidung
- Fließkommazahlen: `half, float, double, ...`
- Zeiger: `i64*`
- Arrays: `[10 x i32], [2 x [2 x float]]`
- Strukturen: `{i32, float, i32}`
- Vektoren (SIMD): `<i8, i8, i8, i8>`
- ...

LLVM-IR
GetElementPtr (GEP)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- *Typsichere* Adressrechnung für Array- oder Struktur-Elemente (wichtig für Optimierungen!)
- Erhält einen Basiszeiger und eine Folge von Indizes; liefert einen Zeiger. Macht keine Speicherzugriffe!
- Beispiel: `int arr[2]; arr[1] = ...` →

```
; Alloziert Speicher auf dem Stack
%arr = alloca [2 x i32]

; Liefert i32*
%z = getelementptr [2 x i32]* %arr, i32 0, i32 1}
```

- Warum ist der erste Index 0?

→ Auch der Base-Pointer muss indiziert werden!

LLVM-IR
GetElementPtr (GEP)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
struct munger_struct {
  int f1;
  int f2;
};

void munge(struct munger_struct *P) {
  P[0].f1 = P[1].f1 + P[2].f2;
}

...
munger_struct Array[3];
...
munge(Array);
```

Beispiel von `http://llvm.org/docs/GetElementPtr.html`

LLVM-IR

GetElementPtr (GEP)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
void munge(struct munger_struct *P) {
  P[0].f1 = P[1].f1 + P[2].f2;
}
```

```
void %munge(%struct.munger_struct* %P) {
entry:
  %tmp = getelementptr %struct.munger_struct* %P, i32 1, i32 0
  %tmp = load i32* %tmp
  %tmp6 = getelementptr %struct.munger_struct* %P, i32 2, i32 1
  %tmp7 = load i32* %tmp6
  %tmp8 = add i32 %tmp7, %tmp
  %tmp9 = getelementptr %struct.munger_struct* %P, i32 0, i32 0
  store i32 %tmp8, i32* %tmp9
  ret void
}
```

LLVM-IR

GetElementPtr (GEP)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
%x = getelementptr
        {i16, [4 x [4 x float]]}* %ptr,
        i32 2, i32 1, i32 3, i32 0
```

- Welchen Typ hat `x`?
- Welches Offset (in Bytes) hat `x` zu `ptr`?

LLVM-IR
C++ Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
#include <iostream>
using namespace std;

class A {
int x;
public:
  virtual void foo() { cout << "A::foo" << endl; }
};

class B : public A {
public:
  virtual void foo() { cout << "B::foo" << endl; }
};

int main() {
  A *ab = new B();
  ab->foo();
  return 0;
}
```

LLVM-IR

C++ Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
; ModuleID = 'Klasse.ll'
target datalayout = "e-p:64:64:64-i1:8:8-i8:8:8-i16:16:16-i32:32:32-i64:64:64-f32:32:32-f64:64:64-v64:64:64-v128:128:128-a0:0:64-s0:64:64-f80:128:128-n8:16:32:64-S128"
target triple = "x86_64-apple-macosx10.9.0"

%"class.std::ios_base::Init" = type { i8 }
%"class.std::basic_ostream" = type { i32 (...)**, %"class.std::basic_ios" }
%"class.std::basic_ios" = type { %"class.std::ios_base", %"class.std::basic_ostream"*, i8, i8, %"class.std::basic_streambuf"*, %"class.std::ctype"*, %"class.std::num_put"*, %"class.std::num_get"* }
%"class.std::ios_base" = type { i32 (...)**, i64, i64, i32, i32, i32, %"struct.std::ios_base::__Callback_list"*, %"struct.std::ios_base::_Words"*, [8 x %"struct.std::ios_base::_Words"], i32, %"struct.std::ios_base::_Words"*, %"class.std::locale" }
%"struct.std::ios_base::__Callback_list" = type { %"struct.std::ios_base::__Callback_list"*, void (i32, %"class.std::ios_base"*, i32)*, i32, i32 }
%"struct.std::ios_base::_Words" = type { i8*, i64 }
%"class.std::locale" = type { %"class.std::locale::_Impl"* }
%"class.std::locale::_Impl" = type { i32, %"class.std::locale::facet"**, i64, %"class.std::locale::facet"**, i8** }
%"class.std::locale::facet" = type { i32 (...)**, i32 }
%"class.std::basic_streambuf" = type { i32 (...)**, i8*, i8*, i8*, i8*, i8*, i8*, i8*, %"class.std::locale" }
%"class.std::ctype" = type { %"class.std::locale::facet", i32*, i8, i32*, i32*, i64*, i8, [256 x i8], [256 x i8], i8 }
%"class.std::num_put" = type { %"class.std::locale::facet" }
%"class.std::num_get" = type { %"class.std::locale::facet" }
%class.B = type { %class.A }
%class.A = type { i32 (...)**, i32 }

@_ZSt8__ioinit = internal global %"class.std::ios_base::Init" zeroinitializer, align 1
@__dso_handle = external global i8
@_ZTVSt8__exadata120__si_class_type_info = external global i8*
@_ZTS3Klasse = linkonce_odr unamed_addr constant [9 x i8] c"7Klasse\00", align 1
@_ZTVN10__cxxabiv120__si_class_type_infoE = external global i8*
@_ZTS1A = linkonce_odr constant [3 x i8] c"1A\00"
@_ZTI1A = linkonce_odr unamed_addr constant { i8*, i8* } { i8* bitcast (i8** getelementptr inbounds (i8** @_ZTVN10__cxxabiv117__class_type_infoE, i64 2) to i8*), i8* getelementptr inbounds ([3 x i8]* @_ZTS1A, i32 0, i32 0) }
@_ZTI1B = linkonce_odr unamed_addr constant { i8*, i8*, i8* } { i8* bitcast (i8** getelementptr inbounds (i8** @_ZTVN10__cxxabiv120__si_class_type_infoE, i64 2) to i8*), i8* getelementptr inbounds ([3 x i8]* @_ZTS1B, i32 0, i32 0), i8* bitcast ( i8*, i8* }* @_ZTI1A to i8*) }
@_ZSt4cout = external global %"class.std::basic_ostream"
@.str = private unnamed_addr constant [7 x i8] c"7B: 0\0A\00", align 1
@_ZTV1A = linkonce_odr unamed_addr constant [3 x i8*] [i8* null, i8* bitcast ( i8*, i8* }* @_ZTI1A to i8*), i8* bitcast (void (%class.A*)* @_ZN1A3fooEv to i8*)]
@.str1 = private unnamed_addr constant [7 x i8] c"A: foo\0A", align 1
@llvm.global_ctors = appending global [1 x { i32, void ()* }] [{ i32, void ()* } { i32 65535, void ()* @_GLOBAL__I_a }]

define internal void @__cxx_global_var_init() section "__TEXT,__StaticInit,regular,pure_instructions" {
entry:
  call void @_ZNSt8ios_base4InitC1Ev(%"class.std::ios_base::Init"* @_ZSt8__ioinit)
  %0 = call i32 @__cxa_atexit(void (i8*)* bitcast (void (%"class.std::ios_base::Init"*)* @_ZNSt8ios_base4InitD1Ev to void (i8*)*), i8* getelementptr inbounds (%"class.std::ios_base::Init"* @_ZSt8__ioinit, i32 0, i32 0), i8* @__dso_handle) #1
  ret void
}

declare void @_ZNSt8ios_base4InitC1Ev(%"class.std::ios_base::Init"*) #0

declare void @_ZNSt8ios_base4InitD1Ev(%"class.std::ios_base::Init"*) #0

; Function Attrs: nounwind
declare i32 @__cxa_atexit(void (i8*)*, i8*, i8*) #1

; Function Attrs: ssp uwtable
define i32 @main() #2 {
entry:
  %call = call noalias i8* @_Znwm(i64 16)
  %0 = bitcast i8* %call to %class.B*
  %1 = bitcast %class.B* %0 to i8*
  call void @llvm.memset.p0i8.i64(i8* %1, i8 0, i64 16, i32 8, i1 false)
  call void @_ZN1BC1Ev(%class.B* %0) #1
  %2 = bitcast %class.B* %0 to %class.A*
  %3 = bitcast %class.A* %2 to void (%class.A*)***
  %vtable = load void (%class.A*)**** %3
  %vfn = getelementptr inbounds void (%class.A*)** %vtable, i64 0
  %4 = load void (%class.A*)** %vfn
  call void %4(%class.A* %2)
  ret i32 0
}

declare noalias i8* @_Znwm(i64) #0

; Function Attrs: nounwind
declare void @llvm.memset.p0i8.i64(i8* nocapture, i8, i64, i32, i1) #1

; Function Attrs: inlinehint nounwind ssp uwtable
define linkonce_odr void @_ZN1BC1Ev(%class.B* %this) unnamed_addr #3 align 2 {
entry:
  call void @_ZN1BC2Ev(%class.B* %this) #1
  ret void
}

; Function Attrs: inlinehint nounwind ssp uwtable
define linkonce_odr void @_ZN1BC2Ev(%class.B* %this) unnamed_addr #3 align 2 {
entry:
  %0 = bitcast %class.B* %this to %class.A*
  call void @_ZN1AC2Ev(%class.A* %0) #1
  %1 = bitcast %class.B* %this to i8***
  store i8** getelementptr inbounds ([3 x i8*]* @_ZTV1B, i64 0, i64 2), i8*** %1
  ret void
}

; Function Attrs: inlinehint nounwind ssp uwtable
define linkonce_odr void @_ZN1AC2Ev(%class.A* %this) unnamed_addr #3 align 2 {
entry:
  %0 = bitcast %class.A* %this to i8***
  store i8** getelementptr inbounds ([3 x i8*]* @_ZTV1A, i64 0, i64 2), i8*** %0
  ret void
}

; Function Attrs: ssp uwtable
define linkonce_odr void @_ZN1B3fooEv(%class.B* %this) unnamed_addr #2 align 2 {
entry:
  %call = call %"class.std::basic_ostream"* @_ZSt4cout(i8* getelementptr inbounds ([7 x i8]* @.str, i32 0, i32 0))
  %call2 = call %"class.std::basic_ostream"* @_ZNSolsEPFRSoS_E(%"class.std::basic_ostream"* %call, %"class.std::basic_ostream"* (%"class.std::basic_ostream"*)* @_ZSt4endlIcSt11char_traitsIcEERSt13basic_ostreamIT_T0_ES5_)
  ret void
}

declare %"class.std::basic_ostream"* @_ZSt4cout(i8* getelementptr inbounds ([7 x i8]* @.str, i32 0, i32 0)) #0

declare %"class.std::basic_ostream"* @_ZNSolsEPFRSoS_E(%"class.std::basic_ostream"*, %"class.std::basic_ostream"* (%"class.std::basic_ostream"*)*) #0

declare %"class.std::basic_ostream"* @_ZSt4endlIcSt11char_traitsIcEERSt13basic_ostreamIT_T0_ES6_(%"class.std::basic_ostream"*) #0

; Function Attrs: ssp uwtable
define linkonce_odr void @_ZN1A3fooEv(%class.A* %this) unnamed_addr #2 align 2 {
entry:
  %call = call %"class.std::basic_ostream"* @_ZSt4cout(i8* getelementptr inbounds ([7 x i8]* @.str1, i32 0, i32 0))
  %call2 = call %"class.std::basic_ostream"* @_ZNSolsEPFRSoS_E(%"class.std::basic_ostream"* %call, %"class.std::basic_ostream"* (%"class.std::basic_ostream"*)* @_ZSt4endlIcSt11char_traitsIcEERSt13basic_ostreamIT_T0_ES5_)
  ret void
}

define internal void @_GLOBAL__I_a() section "__TEXT,__StaticInit,regular,pure_instructions" {
entry:
  call void @__cxx_global_var_init()
  ret void
}

attributes #0 = { "less-precise-fpmad"="false" "no-frame-pointer-elim"="true" "no-frame-pointer-elim-non-leaf"="true" "no-infs-fp-math"="false" "no-nans-fp-math"="false" "unsafe-fp-math"="false" "use-soft-float"="false" }
attributes #1 = { nounwind }
attributes #2 = { ssp uwtable "less-precise-fpmad"="false" "no-frame-pointer-elim"="true" "no-frame-pointer-elim-non-leaf"="true" "no-infs-fp-math"="false" "no-nans-fp-math"="false" "unsafe-fp-math"="false" "use-soft-float"="false" }
attributes #3 = { inlinehint nounwind ssp uwtable "less-precise-fpmad"="false" "no-frame-pointer-elim"="true" "no-frame-pointer-elim-non-leaf"="true" "no-infs-fp-math"="false" "no-nans-fp-math"="false" "unsafe-fp-math"="false" "use-soft-float"="false" }
```


Embedded Systems & Applications

LLVM-IR
C++ Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
%class.B = type { %class.A }
%class.A = type { i32 (...)**, i32 }
```

```
@_ZTV1B = linkonce_odr unnamed_addr constant [3 x i8*] [i8* null,
i8* bitcast ({ i8*, i8*, i8* }* @_ZTI1B to i8*),
i8* bitcast (void (%class.B*)* @_ZN1B3fooEv to i8*)]
```

```
@_ZTV1A = linkonce_odr unnamed_addr constant [3 x i8*] [i8* null,
i8* bitcast ({ i8*, i8* }* @_ZTI1A to i8*),
i8* bitcast (void (%class.A*)* @_ZN1A3fooEv to i8*)]
```

LLVM-IR
C++ Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
define i32 @main() #2 {
entry:
  %call = call noalias i8* @_Znwm(i64 16)
  %0 = bitcast i8* %call to %class.B*
  %1 = bitcast %class.B* %0 to i8*
  call void @llvm.memset.p0i8.i64(i8* %1, i8 0, i64 16, i32 8, i1 false)
  call void @_ZN1BC1Ev(%class.B* %0) #1
  %2 = bitcast %class.B* %0 to %class.A*
  %3 = bitcast %class.A* %2 to void (%class.A*)***
  %vtable = load void (%class.A*)*** %3
  %vfn = getelementptr inbounds void (%class.A*)** %vtable, i64 0
  %4 = load void (%class.A*)** %vfn
  call void %4(%class.A* %2)
  ret i32 0
}
```

LLVM-IR
Befehlssatz

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Steuerfluss: ret | br | switch | indirectbr | invoke | resume | unreachable
- Arithmetisch: add | fadd | sub | fsub | mul | fmul | udiv | sdiv | fdiv | urem | srem | frem | shl | lshr | ashr | and | or | xor
- Elementzugriff: extractelement | insertelement | shufflevector | extractvalue | insertvalue
- Speicher und Adressierung: alloca | load | store | fence | cmpxchg | atomicrmw | getelementptr
- Konversionen: trunc | zext | sext | fptrunc | fpext | fptoui | fptosi | uitofp | sitofp | ptrtoint | inttoptr | bitcast
- Andere: icmp | fcmp | phi | select | call | va_arg | landingpad

LLVM-IR

Aufgabe und Live-Demo

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

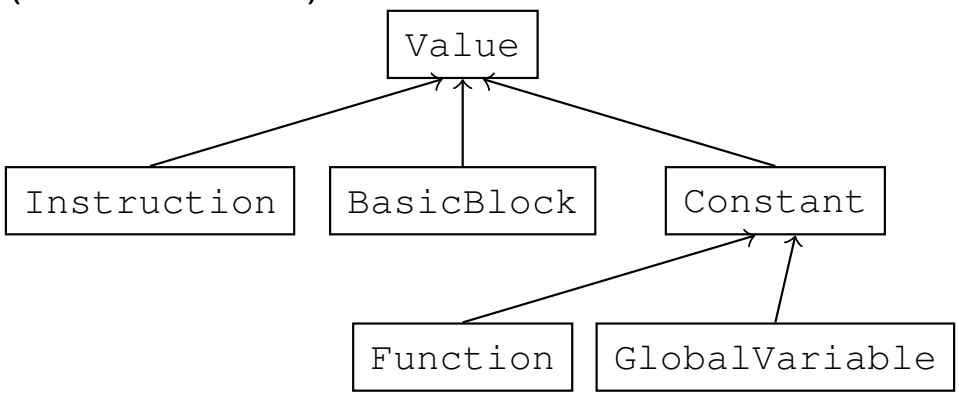
Implementieren Sie die Fibonacci-Funktion in LLVM!

```
<result> = add <ty> <op1>, <op2>
<result> = sub <ty> <op1>, <op2>
<result> = call <ty> <fnptrval>(<function args>)
<result> = icmp <cond> <ty> <op1>, <op2> ;
                (cond = eq, ne,
                        ugt, uge, ult, ule,
                        sgt, sge, slt, sle)
```

LLVM-IR
API

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Oberklasse für fast alle IR-Elemente: `Value` modelliert (SSA-)Werte.
  - Jeder Wert hat einen `Type`.
- (Vereinfachte) Klassenhierarchie:



- `Instruction`s speichern ihre Operanden als Zeiger zu anderen `Value`-Objekten.
- Beispiel: Konstruktor von `BranchInst`:

```
BranchInst(BasicBlock *IfTrue, BasicBlock *IfFalse,
Value *Cond)
```

LLVM-IR
API

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Toplevel-Konstrukt ist das `Module`: enthält Liste von `Function`s, globalen Variablen, ...
  - `getFunctionList(), getGlobalList(), ...`
- `Function` enthält Liste von `BasicBlock`s, organisiert als Steuerflussgraph.
  - `getEntryBlock(), getBasicBlockList(), ...`
  - Vorgänger-/Nachfolgerblöcke über spezielle Iteratoren `pred_iterator`, `succ_iterator`
- `BasicBlock` enthält Liste von `Instruction`s.
  - `getTerminator(), getInstList(), ...`

API-Dokumentation: “llvm::<Klassenname>” googlen.

Optimierungen
Übersicht

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- LLVM-IR enthält genug Informationen, um auch “high-level” Analysen und Transformationen durchzuführen.
- Gekapselt als Pässe.
- Auszug aus der Liste der mitgelieferten Pässe:
  - Analysen: (Post-)Dominatorbaum, natürliche Schleifen, Aliasanalyse(n), . . .
  - Transformationen: Dead Code Elimination, Reassociation, Loop Invariant Code Motion, Global Value Numbering, . . .
- Abhängigkeiten zwischen Pässen werden automatisch aufgelöst.
- Man kann sogar Transformationen einzeln auf ein Programm anwenden:

```
$ opt -S -reassociate -o prog_opt.ll prog.ll
$ opt -S -licm -o prog_opt2.ll prog_opt.ll
```

Optimierungen
Konstantenpropagation

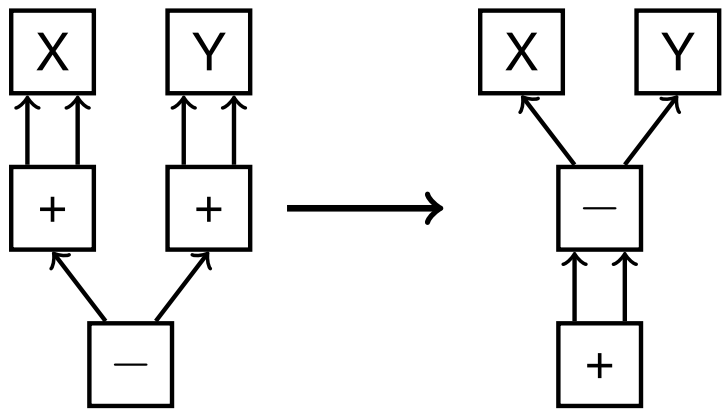
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
while (!WorkList.empty()) {
  Instruction *I = *WorkList.begin(); WorkList.erase(WorkList.begin());

  if (Constant *C = ConstantFoldInstruction(I, TD, TLI)) {
    // Add all of the users of this instruction to the worklist, they might
    // be constant propagatable now...
    for (Value::use_iterator UI = I->use_begin(), UE = I->use_end(); UI != UE; ++UI)
      WorkList.insert(cast<Instruction>(*UI));

    // Replace all of the uses of a variable with uses of the constant.
    I->replaceAllUsesWith(C);

    // Remove the dead instruction.
    WorkList.erase(I);
    I->eraseFromParent();
  }
}
```

- Inhalt von `ConstantFoldInstruction`: “Erzeuge neue Konstante, wenn alle Operanden von `I` konstant sind”

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Implementierung einer Peephole-Optimierung



$(X + X) - (Y + Y)$ $\qquad$ $(X - Y) + (X - Y)$

(aus: Bersch, Thomas: Generierung lokaler Optimierungen. Diplomarbeit, 2012)

Optimierungen
Pass-Implementierung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
class SpecialSub : public FunctionPass {
  static char ID;
  SpecialSub() : FunctionPass(ID) {}

  bool runOnFunction(Function &F) {
    for (inst_iterator II = inst_begin(F), IE = inst_end(F);
         II != IE; ++II)
      performSpecialSubOptimization(&*II);
    return true;
  }
};

static RegisterPass<SpecialSub> X("specialsub",
  "Special␣subtraction␣transformation␣pattern");
```

Optimierungen
Pass-Implementierung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
class SpecialSub : public FunctionPass {
  static char ID;
  SpecialSub() : FunctionPass(ID) {}

  bool runOnFunction(Function &F) {
    for (inst_iterator II = inst_begin(F), IE = inst_end(F);
         II != IE; ++II)
      performSpecialSubOptimization(&*II);
    return true;
  }
};

static RegisterPass<SpecialSub> X("specialsub",
  "Special␣subtraction␣transformation␣pattern");
```

Optimierungen
Pass-Implementierung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
class SpecialSub : public FunctionPass {
  static char ID;
  SpecialSub() : FunctionPass(ID) {}

  bool runOnFunction(Function &F) {
    for (inst_iterator II = inst_begin(F), IE = inst_end(F);
         II != IE; ++II)
      performSpecialSubOptimization(&*II);
    return true;
  }
};

static RegisterPass<SpecialSub> X("specialsub",
  "Special␣subtraction␣transformation␣pattern");
```

erben

implementieren

Embedded Systems & Applications

Optimierungen
Pass-Implementierung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
class SpecialSub : public FunctionPass {
  static char ID;
  SpecialSub() : FunctionPass(ID) {}

  bool runOnFunction(Function &F) {
    for (inst_iterator II = inst_begin(F), IE = inst_end(F);
         II != IE; ++II)
      performSpecialSubOptimization(&*II);
    return true;
  }
};

static RegisterPass<SpecialSub> X("specialsub",
  "Special subtraction transformation pattern");
```

← erben

← implementieren

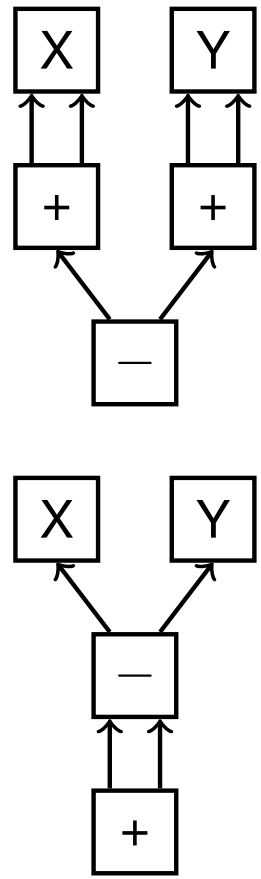
← registrieren

Embedded Systems & Applications

Optimierungen
Transformation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
void performSpecialSubOptimization(Instruction *I) {
  if (match(I, m_Sub(
    m_Add(m_Value(X1), m_Value(X2)),
    m_Add(m_Value(Y1), m_Value(Y2))
    )) && X1 == X2 && Y1 == Y2) {

      newSub = CreateSub(X1, Y1, "newsub");
      newAdd = CreateAdd(newSub, newSub, "newadd");

      newSub->insertBefore(I);
      newAdd->insertBefore(I);

      I->replaceAllUsesWith(newAdd);
  }
}
```



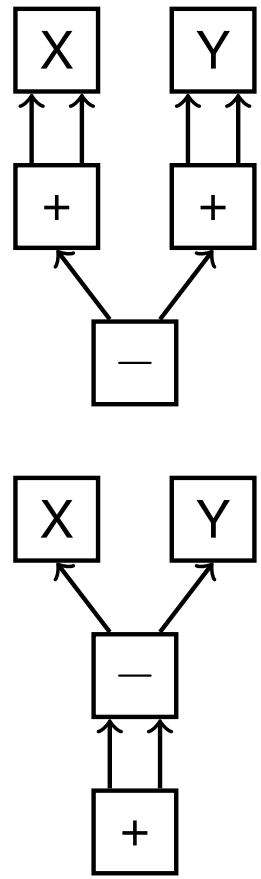
Embedded Systems & Applications

Optimierungen
Transformation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
void performSpecialSubOptimization(Instruction *I) {
  if (match(I, m_Sub(
    m_Add(m_Value(X1), m_Value(X2)),
    m_Add(m_Value(Y1), m_Value(Y2))
    )) && X1 == X2 && Y1 == Y2) {

      newSub = CreateSub(X1, Y1, "newsub");
      newAdd = CreateAdd(newSub, newSub, "newadd");

      newSub->insertBefore(I);
      newAdd->insertBefore(I);

      I->replaceAllUsesWith(newAdd);
  }
}
```

⟵ Muster finden



Embedded Systems & Applications

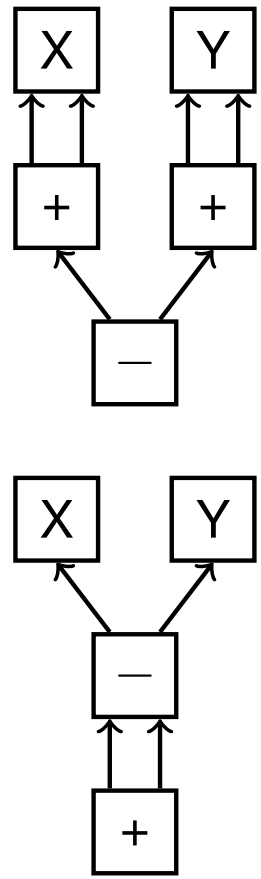
Optimierungen
Transformation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
void performSpecialSubOptimization(Instruction *I) {
  if (match(I, m_Sub(
    m_Add(m_Value(X1), m_Value(X2)),
    m_Add(m_Value(Y1), m_Value(Y2))
    )) && X1 == X2 && Y1 == Y2) {

      newSub = CreateSub(X1, Y1, "newsub");
      newAdd = CreateAdd(newSub, newSub, "newadd");

      newSub->insertBefore(I);
      newAdd->insertBefore(I);

      I->replaceAllUsesWith(newAdd);
  }
}
```

⟵ Muster finden

↑erzeugen



Embedded Systems & Applications

Optimierungen
Transformation

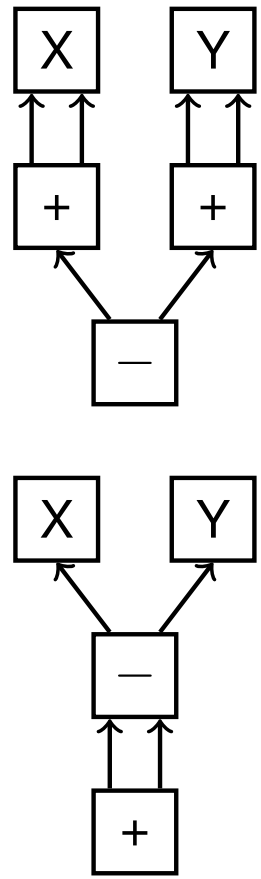
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
void performSpecialSubOptimization(Instruction *I) {
  if (match(I, m_Sub(
    m_Add(m_Value(X1), m_Value(X2)),
    m_Add(m_Value(Y1), m_Value(Y2))
    )) && X1 == X2 && Y1 == Y2) {

      newSub = CreateSub(X1, Y1, "newsub");
      newAdd = CreateAdd(newSub, newSub, "newadd");

      newSub->insertBefore(I);
      newAdd->insertBefore(I);

       I->replaceAllUsesWith(newAdd);
  }
}
```

← Muster finden

↑erzeugen

← einfügen



Embedded Systems & Applications

Optimierungen
Transformation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

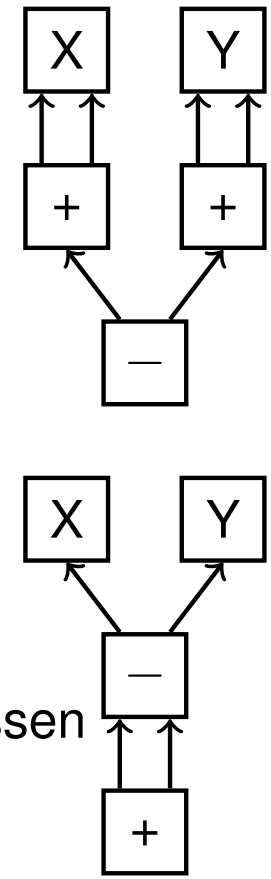
```
void performSpecialSubOptimization(Instruction *I) {
  if (match(I, m_Sub(
    m_Add(m_Value(X1), m_Value(X2)),
    m_Add(m_Value(Y1), m_Value(Y2))
    )) && X1 == X2 && Y1 == Y2) {

      newSub = CreateSub(X1, Y1, "newsub");
      newAdd = CreateAdd(newSub, newSub, "newadd");

      newSub->insertBefore(I);
      newAdd->insertBefore(I);

      I->replaceAllUsesWith(newAdd);
  }
}
```

← Muster finden

↑erzeugen

← einfügen

← Verwender anpassen



Embedded Systems & Applications

Optimierungen
Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int func(int a, int b) { return (a+a)-(b+b); }
```


Embedded Systems & Applications

Optimierungen
Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int func(int a, int b) { return (a+a)-(b+b); }
```

```
%add  = add i32 %a, %a
%add1 = add i32 %b, %b
%sub  = sub i32 %add, %add1
ret i32 %sub
```


Embedded Systems & Applications

Optimierungen
Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int func(int a, int b) { return (a+a)-(b+b); }
```

```
%add  = add i32 %a, %a
%add1 = add i32 %b, %b
%sub  = sub i32 %add, %add1
ret i32 %sub
```

⇓ `opt -load SpecialSub.so -specialsub -dce prog.ll` ⇓

Embedded Systems & Applications

Optimierungen
Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
int func(int a, int b) { return (a+a)-(b+b); }
```

```
%add  = add i32 %a, %a
%add1 = add i32 %b, %b
%sub  = sub i32 %add, %add1
ret i32 %sub
```

⇓ `opt -load SpecialSub.so -specialsub -dce prog.ll` ⇓

```
%newsub = sub i32 %a, %b
%newadd = add i32 %newsub, %newsub
ret i32 %newadd
```


Embedded Systems & Applications

Optimierungen
Analysen nutzen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Optimierungen können Analyseinformationen anfordern:

```
virtual void getAnalysisUsage(AnalysisUsage &AU) const {
  AU.addRequired<AliasAnalysis>();
}
```

Verwendung:

```
...
AliasAnalysis &AA = getAnalysis<AliasAnalysis>();
if (AA.alias(V1, V2)) {
...
```

Aliasanalyse
Übersicht

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Einheitliche Schnittstelle für ...
  - Alias-Anfragen: $(\text{Addr}, \text{Size}) \times (\text{Addr}, \text{Size}) \rightarrow \{\text{No}, \text{May}, \text{Must}, \text{Partial}\}\text{Alias}$
  - ModRef-Anfragen: $(\text{Instr}, \text{Addr}, \text{Size}) \rightarrow \{\text{No}, \text{Mod}, \text{Ref}, \text{ModRef}\}$
  - `doesNotAccessMemory, onlyReadsMemory` für Funktionen
- Konvention: Analysen werden verkettet, deswegen auch sehr spezielle Verfahren möglich.
- Bequemere Verwendung der Information:
  - Memory Dependence-Analyse: findet Abhängigkeiten zwischen zustandsverändernden Instruktionen.
  - AliasSets: Einteilung von Zeigern in disjunkte Mengen.

Aliasanalyse

Verfügbare Analysen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

basic	Analyse basierend auf Kenntnis von Fakten, z.B. *“globale Variablen und allozierter Speicher auf Stack und Heap aliasen nicht und sind nie* `NULL`*”*.
steens	Steensgard Points-to-Analyse.
ds	Data Structure Analysis (von den LLVM-Autoren).
scev	Einbeziehung der Scalar-Evolution-Information, d.h. Entwicklung von Werten in Schleifen.
globalsmodref	Spezielle Analyse für globale Variablen, deren Adressen nicht ausgewertet werden.

Interprozedurale Optimierungen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

In LLVM gibt es u.a.:

- Inlining
- Interprozedurale Konstantenpropagation (einfach und Sparse Conditional Constant Propagation)

Als Beispiel: IPConstantPropagation

- Wenn ein Funktionsargument bei allen Aufrufen im Programm konstant ist, ersetze es in der Funktion.
- Wenn der Rückgabewert konstant ist, verwende ihn bei allen Aufrufen direkt.

IPCP

Beispiel: konstante Funktionsargumente

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Wie findet man alle Aufrufe einer Funktion?

```
for (Value::use_iterator UI = F.use_begin(), E = F.use_end(); UI != E; ++UI) {
  User *U = *UI;
```

- Wie iteriert man über die Argumente?

```
CallSite CS(cast<Instruction>(U));
// Check out all of the potentially constant arguments.
CallSite::arg_iterator AI = CS.arg_begin();
Function::arg_iterator Arg = F.arg_begin();
for (unsigned i = 0, e = ArgumentConstants.size(); i! e; ++i,++AI,++Arg) {

  // If this argument is known non-constant, ignore it.
  if (ArgumentConstants[i].second) continue;
```

IPCP

Beispiel: konstante Funktionsargumente

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Ist das Argument eine Konstante?

```
Constant *C = dyn_cast<Constant>(*AI);
if (C && ArgumentConstants[i].first == 0) {
  ArgumentConstants[i].first = C;   // First constant seen.
```

- Sind zwei Konstanten gleich?

```
} else if (C && ArgumentConstants[i].first == C) {
 // Still the constant value we think it is.
} else {
  // Argument became non-constant.  If all arguments are non-constant now,
  // give up on this function.
  if (++NumNonconstant == ArgumentConstants.size()) return false;
  ArgumentConstants[i].second = true;
}
  }
}
```

IPCP

Beispiel: konstante Funktionsargumente

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

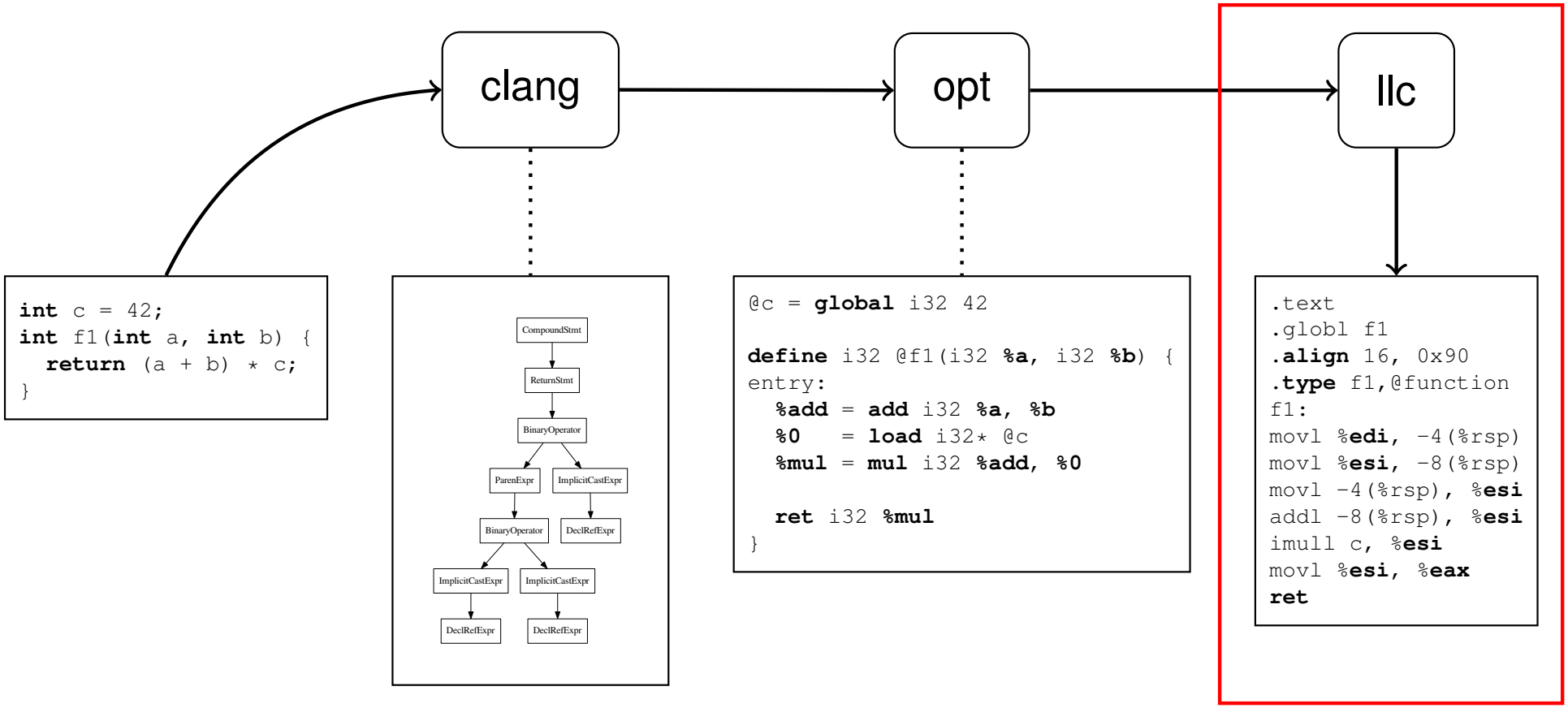
- Wie ersetzt man das Argument durch die gefundene Konstante?

```
Function::arg_iterator AI = F.arg_begin();
for (unsigned i = 0, e = ArgumentConstants.size(); i != e; ++i, ++AI) {
  // Do we have a constant argument?
  if (ArgumentConstants[i].second || AI->use_empty() ||
      (AI->hasByValAttr() && !F.onlyReadsMemory()))
    continue;

  Value *V = ArgumentConstants[i].first;
  if (V == 0) V = UndefValue::get(AI->getType());
  AI->replaceAllUsesWith(V);
}
```


Embedded Systems & Applications

Übersicht

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Embedded Systems & Applications

Codeerzeugung

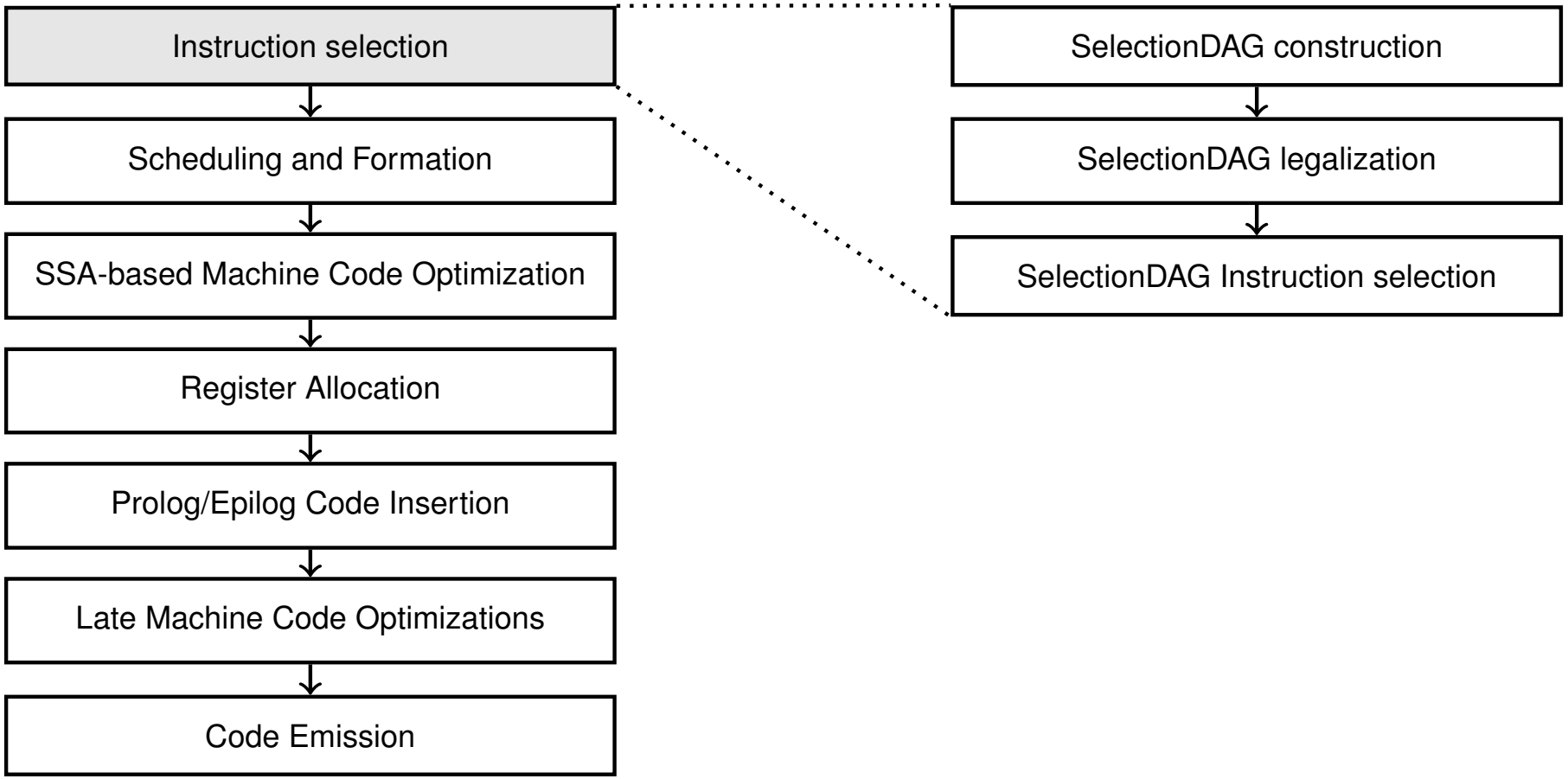
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Verfügbare Targets im Backend: x86, ARM, PowerPC, SPARC, MIPS, ...
- Im Großen und Ganzen sind für diese Architekturen die selben Aufgaben zu bewältigen.
- In LLVM:

- Targets außerhalb dieses Schemas sind natürlich auch möglich (z.B. C++-Backend, Verilog)

Codeerzeugung
Instruction Selection

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Embedded Systems & Applications

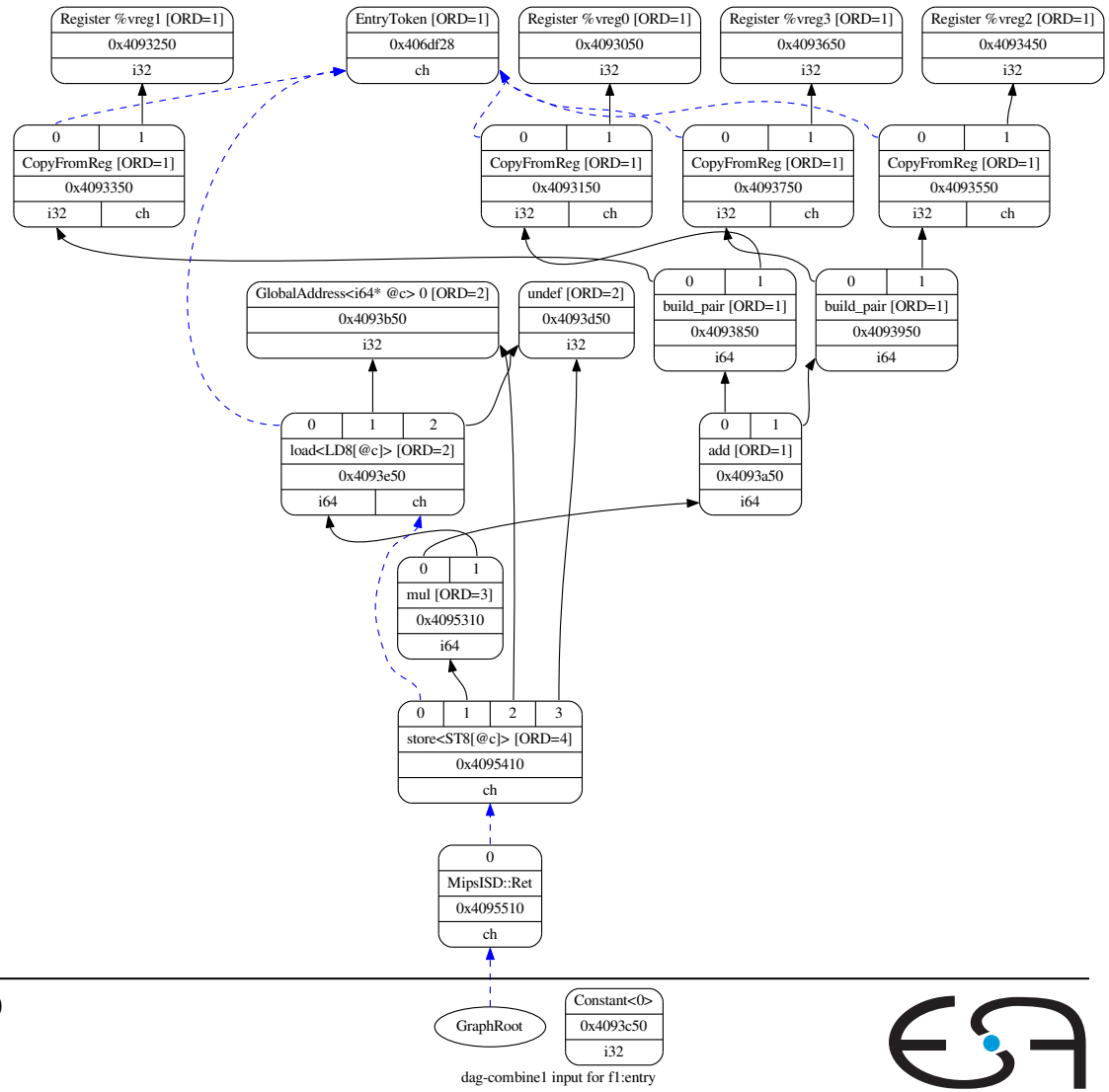
Instruction Selection

SelectionDAG Beispiel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
long long c = 42;
void f1(long long a,
        long long b) {
  c = (a + b) * c;
}
```

```
@c = global i64 42, align 8

define void @f1(i64 %a, i64 %b) #0
entry:
  %add = add nsw i64 %a, %b
  %0   = load i64* @c, align 8
  %mul = mul nsw i64 %add, %0
  store i64 %mul, i64* @c, align 8
  ret void
}
```



Instruction Selection
SelectionDAG Construction

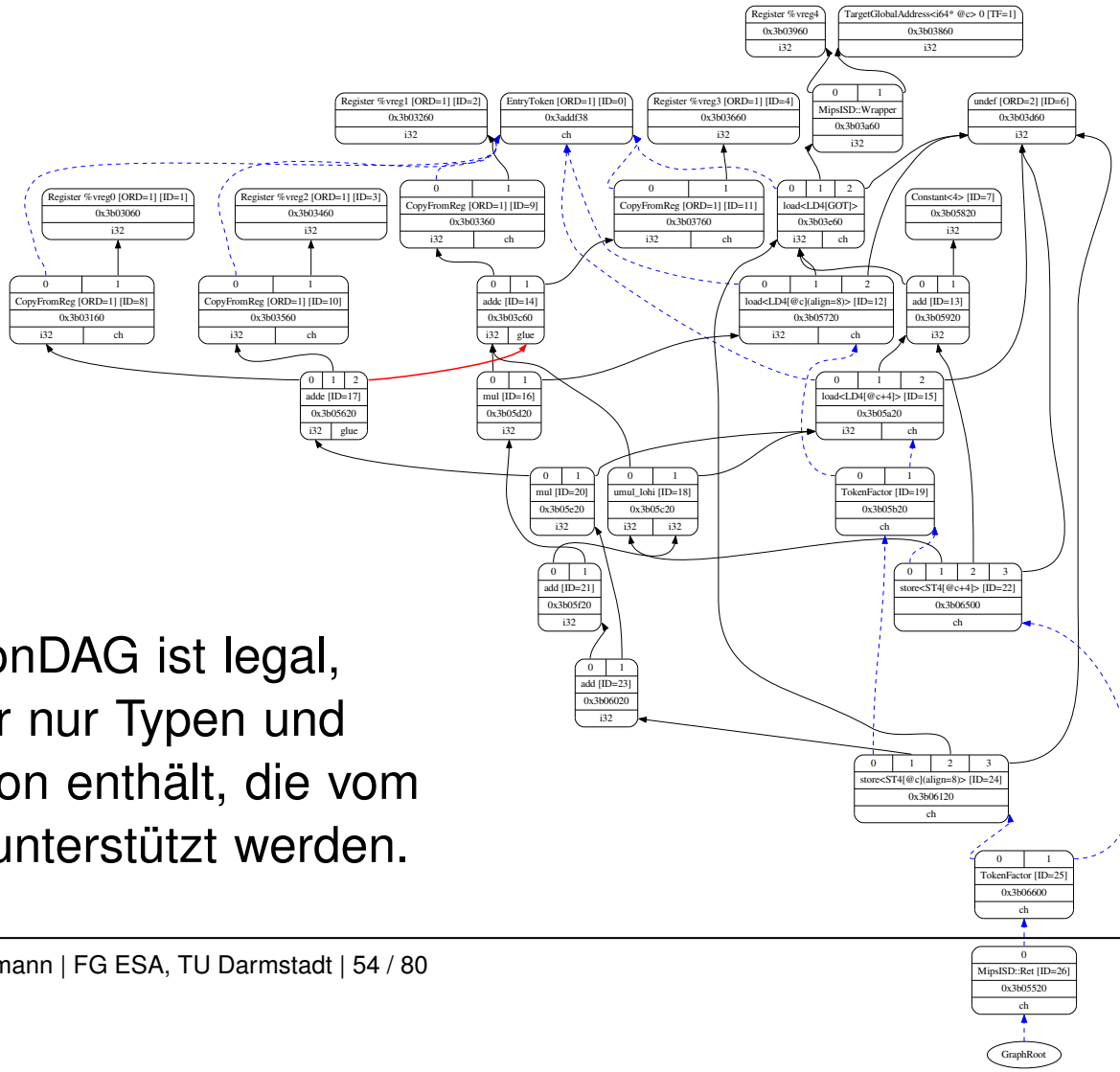
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- SelectionDAG ist ein gerichteter, azyklischer Graph pro BasicBlock.
  - Knoten: Operationen (hauptsächlich Opcode und Operanden).
  - Kanten: Daten (Integer, Float, ...) und “Chain”-Kanten (Ordnung zwischen Operationen)
  - Konzept des “legalen/illegalen Graphen”: Graph darf am Anfang Knoten enthalten, die das Target nicht direkt auf Instruktionen abbilden kann.
- Aufbau: **`SelectionDAGBuilder`**
  - Prinzip: Visitor über LLVM-Instruktionen, erzeugt **`SDNode`**s.
  - Übersetzung einfacher Instruktionen festverdrahtet, das Lowering für andere Instruktionen ist Target-spezifisch (später mehr dazu).

Instruction Selection

SelectionDAG Legalization

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



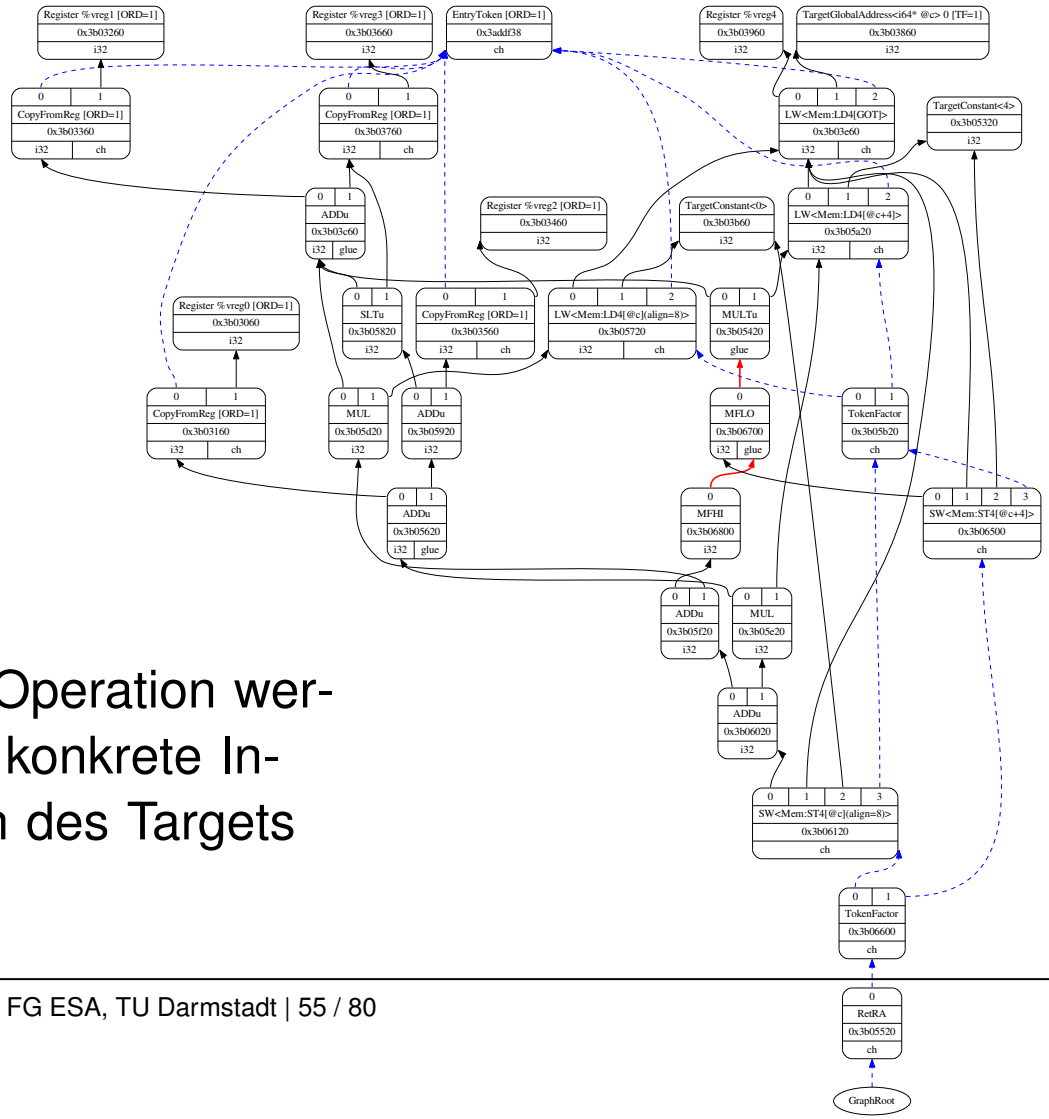
SelectionDAG ist legal, wenn er nur Typen und Operation enthält, die vom Target unterstützt werden.

Embedded Systems & Applications

Instruction Selection

SelectionDAG Instruction Selection

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



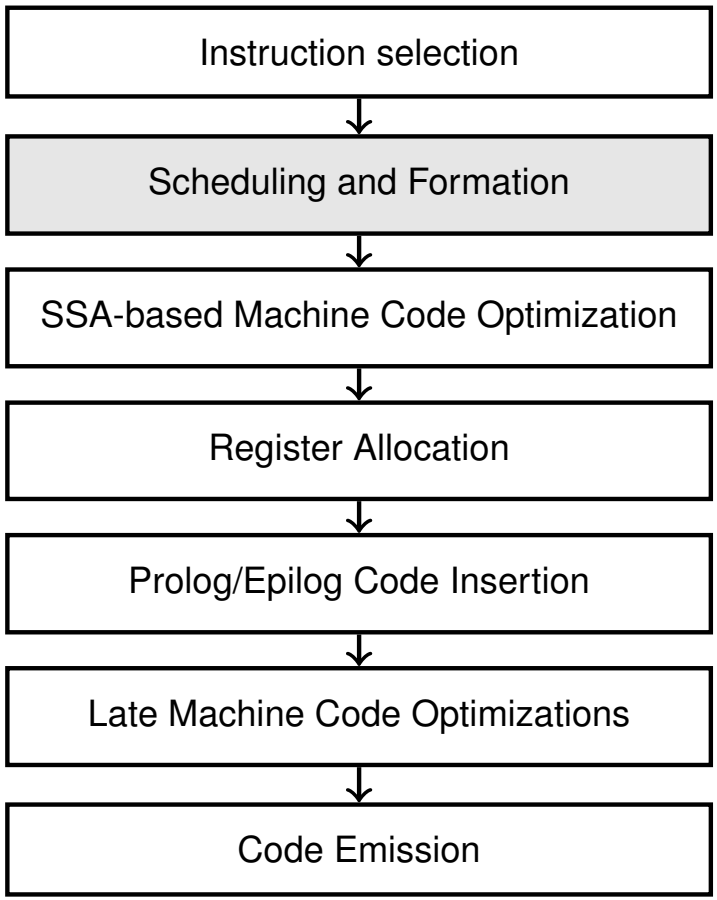
Abstrakte Operation werden durch konkrete Instruktionen des Targets ersetzt.

scheduler input for f1:entry

Embedded Systems & Applications

Codeerzeugung
Scheduling and Formation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

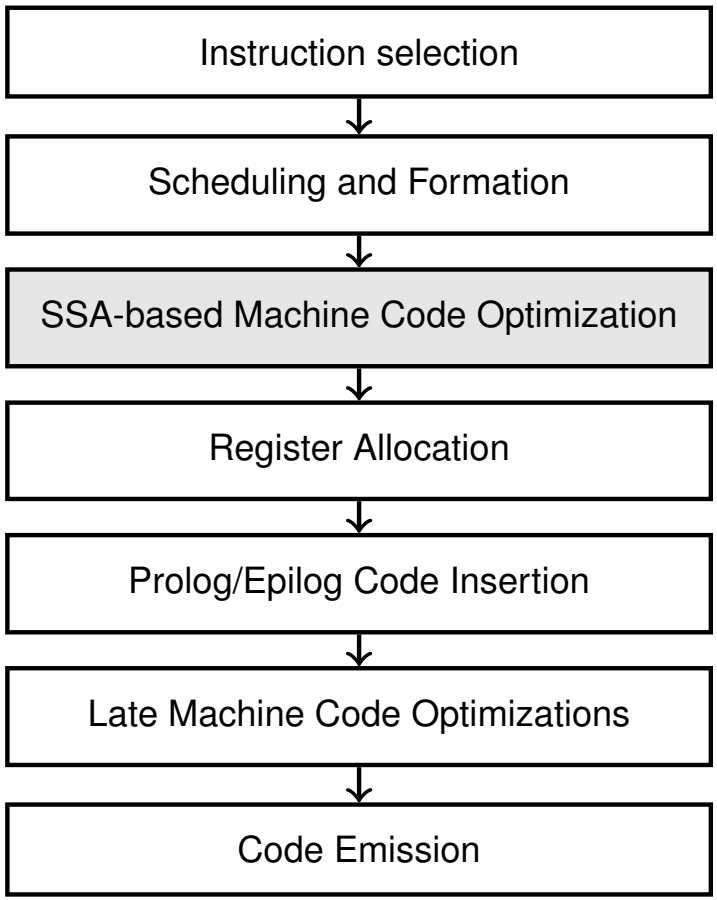


- Totalordnung der Instruktionen wird berechnet (unter Berücksichtigung der Abhängigkeitskanten).
- Die Knoten werden durch **`MachineInstr`** ersetzt.
  - Klasse ist abstrakt: nur Opcode, Operanden. (Semantik Target-spezifisch!)
  - **`MachineInstr`** bilden **`MachineBasicBlock`**s, aus denen eine **`MachineFunction`** besteht.
- Darstellung erstmal weiterhin in SSA-Form!

Codeerzeugung

SSA-based Machine Code Optimization

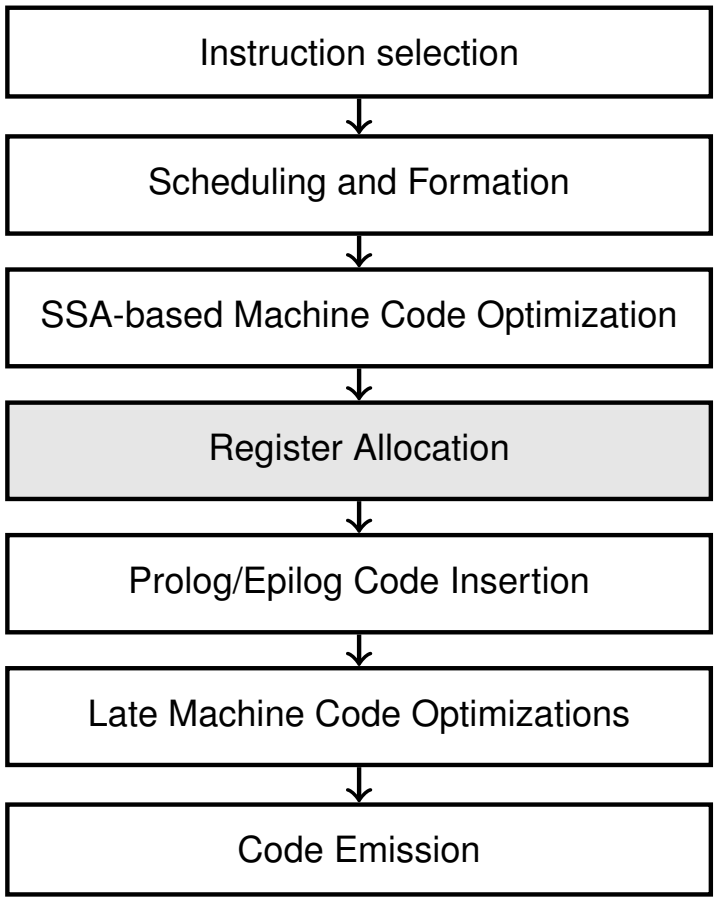
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



- OptimizePHIs
  - Eliminiert tote Phi-Zyklen.
- Dead Machine Instruction Elimination
- Machine LICM
  - Verschieben von schleifeninvariantem Code aus Schleifen heraus.
- Machine CSE
- Machine Sinking
  - verschiebt Instruktion soweit wie möglich in Nachfolgerblöcke.
- Peephole-Optimierungen

Codeerzeugung
Register Allocation

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

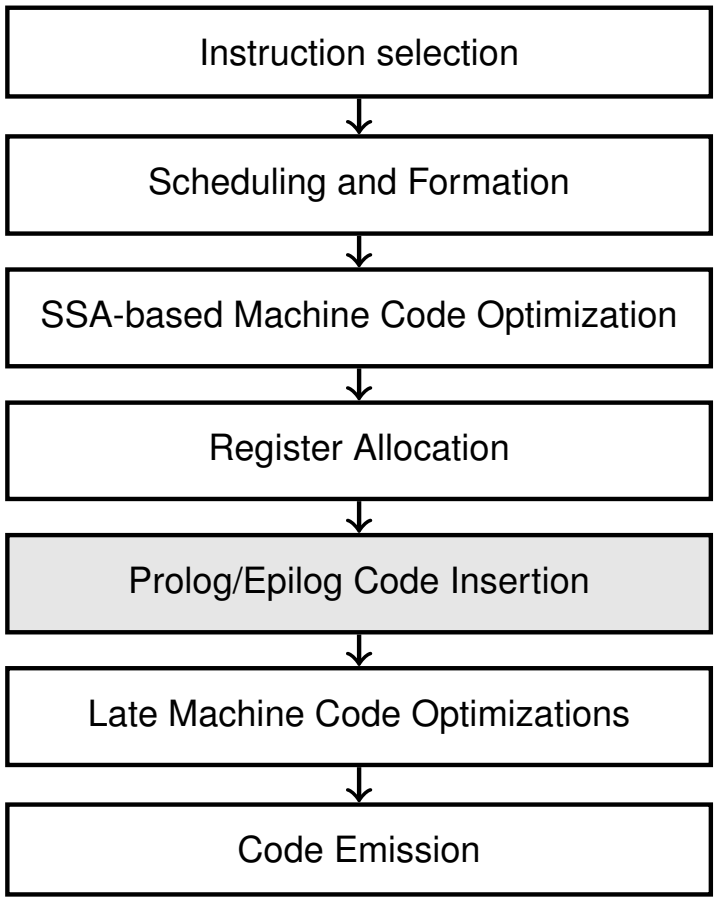


- Virtuelle Register werden auf physikalische Register abgebildet.
- Mehrere Heuristiken auswählbar.
- SSA deconstruction:
  Phi-Instruktionen müssen ersetzt werden.
  Hier: Einfügen von Kopieranweisungen.

Codeerzeugung

Prolog/Epilog Code Insertion

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

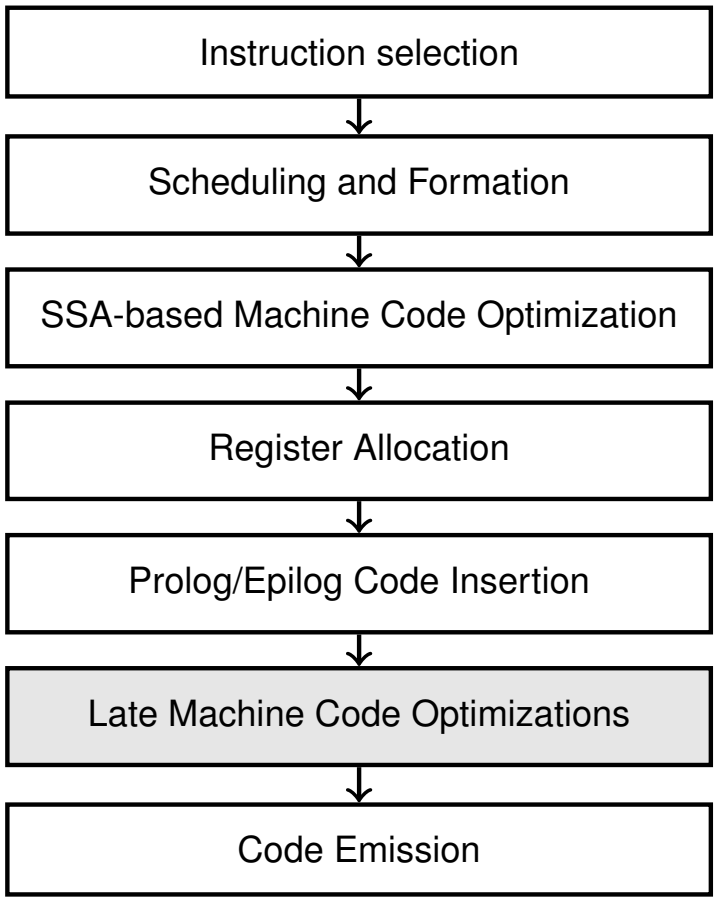


- Nach der Registerallokation ist die Größe aller Stacks bekannt
  $\rightarrow$ Prolog beim Funktionseintritt und Epilog beim Verlassen können eingefügt werden.
- Außerdem: Informationen für das Stack-Unwindung (Exception Handling) werden erzeugt.

Codeerzeugung

Late Machine Code Optimizations

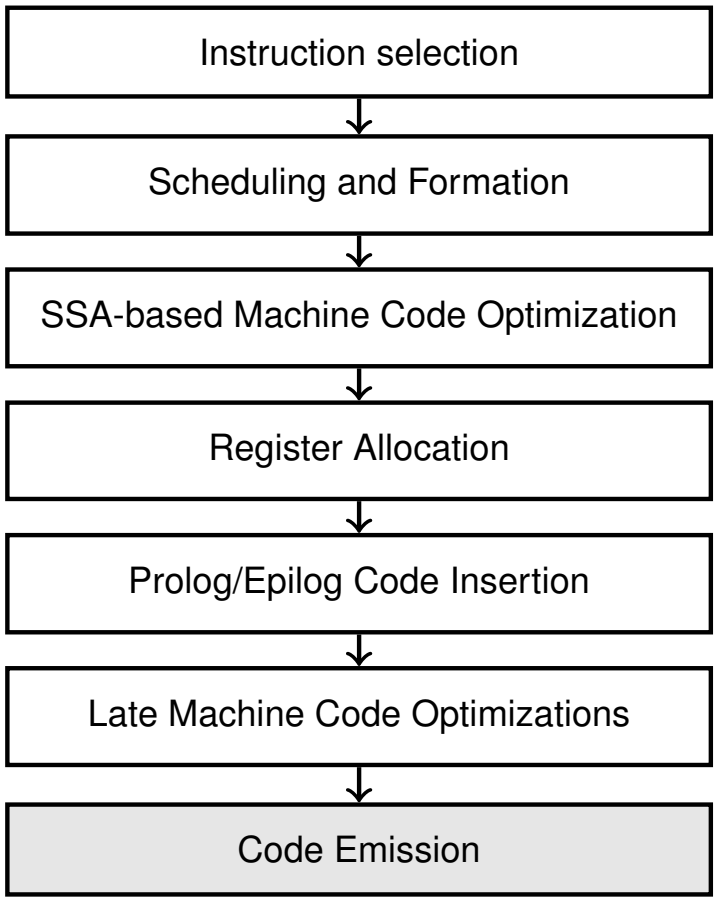
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



- Zusammenfassen von BasicBlocks, die mit unbedingten Sprüngen enden.
- Copy Propagation

Codeerzeugung
Code Emission

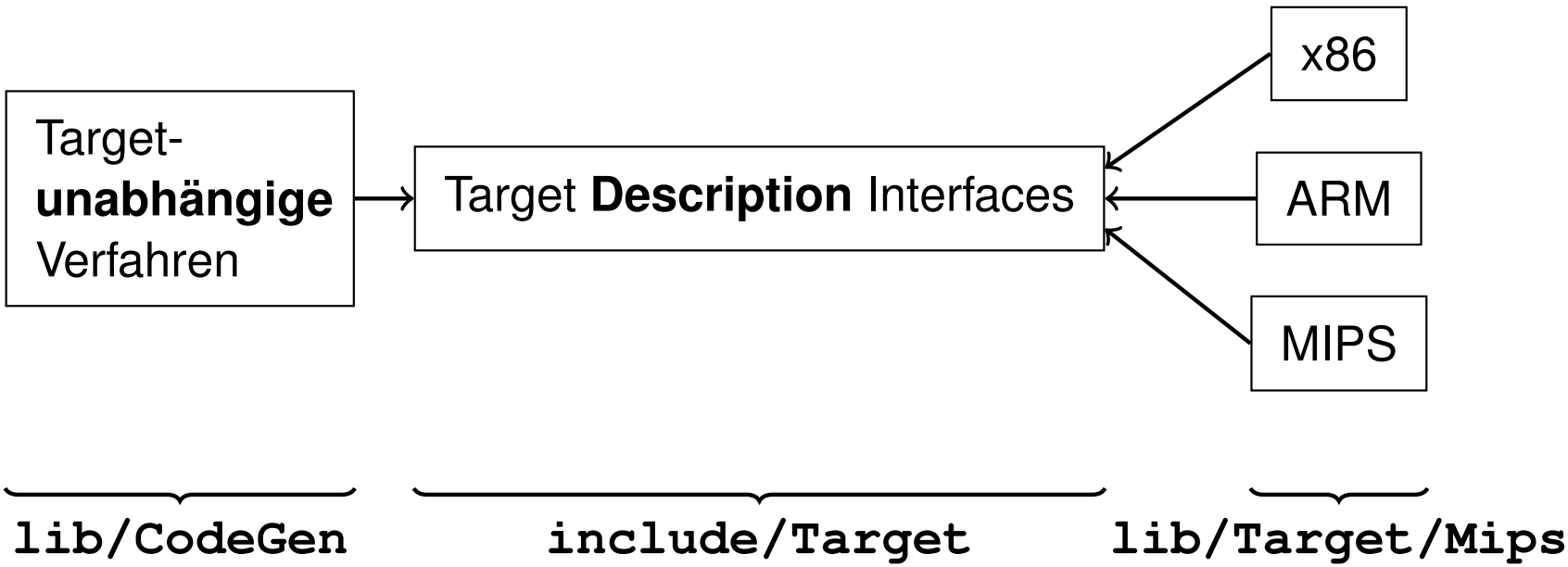
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



- Transformation der Darstellung auf das Abstraktionsniveau des System-Assemblers
  - Labels, Direktiven, Instruktionen
- Grundgerüst für die Umwandlung: **`AsmPrinter`**.
- Wichtiges Hilfsmittel: **`MCStreamer`** hat Methoden wie
  `EmitLabel(..)`,
  `EmitValue(..)`,
  `SwitchSection(..)`

Target-Definition
Übersicht

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Target-Definition
Übersicht

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Ab nun: Target-Definition, am Beispiel der Mips-Architektur

- Zentraler Einstiegspunkt ist das Interface **`TargetMachine`**.
  Von dort aus Zugriff auf die folgenden Interfaces (u.a.):
  - **`DataLayout`**
  - **`TargetRegisterInfo`**
  - **`TargetInstrInfo`**
  - **`TargetLowering`**
- Um die (target-unabhängige) Infrastruktur im Codegenerator zu nutzen, muss ein Target diese Interfaces implementieren.

Target-Definition

Endianness, Datentypen und Alignment

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Interface: **`DataLayout`**
- Wird nicht abgeleitet, sondern instantiiert.
- Beispiel (Mips, 32 bit, little endian):

```
...
DL("e-p:32:32:32-i8:8:32-i16:16:32-i64:64:64-n32-S64");
...
```

- Bedeutet:
  - e: little endian
  - p:32:32:32: Zeiger sind 32 bit breit. Das in der ABI definierte Alignment ist 32 bits, das bevorzugte Alignment ebenfalls.
  - i8:8:32: 8 bit-Werte müssen 8 bit-aligned sein (ABI), bevorzugt ist aber die Ausrichtung auf 32 bit.
  - n32: Nativ werden nur 32 bit-Werte unterstützt.
  - S64: Der Stack ist 64 bit-aligned.

Target-Definition

Exkurs: TableGen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Werkzeug und Sprache, um Menge von abstrakt Datensätzen (records) zu beschreiben.
  - Bedeutung erhalten sie erst durch verschiedene (TableGen-) Backends.
  - Oberstes Ziel: Möglichst viele Gemeinsamkeiten der Datensätze ausfaktorisieren.
- Ein konkreter Datensatz wird mit def eingeleitet.
- Klassen class dienen als Schablonen für defs.

```
class Foo<int i, string s > {
  bit b = 1;
  string msg = s#" "#i;
}

def aFoo : Foo<1, "Hello World">;
def bFoo : Foo<42, "Don't panic">;
let b = 0 in
  def notFoo : Foo<99, "Override">;
---------- liefert ---------------
def aFoo { // Foo
  bit b = 1;
  string msg = "Hello World 1";
}
def bFoo { // Foo
  bit b = 1;
  string msg = "Don't panic 42";
}
def notFoo { // Foo
  bit b = 0;
  string msg = "Override 99";
}
```

Target-Definition
Registersatz

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Interface ist **`TargetRegisterInfo`**.
  - Welche Register und Registerklassen gibt es?
    Registerklasse: Menge von funktional gleichwertigen Registern.
  - Welche Beschränkungen gelten jeweils?
- Das RegisterInfo-Backend findet u.a. alle Records der vordefinierten (TableGen-)Klasse **`Register`** in **`MipsRegisterInfo.td`**.
- Daraus generiert es (hauptsächlich) enums und Datenarrays in die Klasse **`MipsGenRegisterInfo : TargetRegisterInfo`**.
- Was sich dort nicht ausdrücken lässt, wird in einer Unterklasse in C++ formuliert: **`MipsRegisterInfo : MipsGenRegisterInfo`**

Target-Definition
Registersatz (Beispiel)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

MipsRegisterInfo.td

```
class MipsReg<bits<16> Enc, string n> : Register<n> {
  let HWEncoding = Enc;
  let Namespace = "Mips";
}

class MipsGPRReg<bits<16> Enc, string n> : MipsReg<Enc, n>;

...
// General Purpose Registers
def ZERO : MipsGPRReg< 0, "zero">, DwarfRegNum<[0]>;
def AT   : MipsGPRReg< 1, "1">,    DwarfRegNum<[1]>;
def V0   : MipsGPRReg< 2, "2">,    DwarfRegNum<[2]>;
def V1   : MipsGPRReg< 3, "3">,    DwarfRegNum<[3]>;
def A0   : MipsGPRReg< 4, "4">,    DwarfRegNum<[4]>;
def A1   : MipsGPRReg< 5, "5">,    DwarfRegNum<[5]>;
def A2   : MipsGPRReg< 6, "6">,    DwarfRegNum<[6]>;
...
```

Target-Definition
Registersatz (Beispiel)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

MipsRegisterInfo.td

```
class CPURegsClass<list<ValueType> regTypes> :
  RegisterClass<"Mips", regTypes, 32, (add
  // Reserved
  ZERO, AT,
  // Return Values and Arguments
  V0, V1, A0, A1, A2, A3,
  // Not preserved across procedure calls
  T0, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7,
  // Callee save
  S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7,
  // Not preserved across procedure calls
  T8, T9,
  // Reserved
  K0, K1, GP, SP, FP, RA)>;

def CPURegs : CPURegsClass<[i32]>;
def DSPRegs : CPURegsClass<[v4i8, v2i16]>;
...
```

Target-Definition
Registersatz (Beispiel)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

MipsRegisterInfo.cpp

```
MipsRegisterInfo::getCalleeSavedRegs(const MachineFunction *MF);
MipsRegisterInfo::getCallPreservedMask(CallingConv::ID);
// liefern generiertes Array zurueck

BitVector MipsRegisterInfo::
getReservedRegs(const MachineFunction &MF) const {
  static const uint16_t ReservedCPURegs[] = {
    Mips::ZERO, Mips::K0, Mips::K1, Mips::SP
  };
  ...
  return ReservedCPURegs + ... // pseudo-code
}
```


Embedded Systems & Applications

Target-Definition
Befehlssatz

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Interface: **`TargetInstrInfo`**
- Befehlsformate und verfügbare Instruktionen liegen als TableGen-Beschreibung vor.
- Daraus wird generiert (für Mips):
  - **`MipsGenInstrInfo : TargetInstrInfo`**: eine Klasse voller Enums und statischer Arrays.
    Diese wird noch durch C++-Code in **`MipsInstrInfo`** erweitert.
  - Target-spezifische Teile des Pattern Matchings für die Befehlsauswahl: **`MipsGenDAGISel.inc`** wird generiert und in **`MipsDAGToDAGISel`** inkludiert. In **`MipsDAGToDAGISel::Select(SDNode *Node)`** werden zuerst die Sonderfälle behandelt. Ansonsten wird der generische Matcher mit einer generierten Tabelle aufgerufen.

Target-Definition

Befehlssatz (Beispiel)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

MipsInstrInfo.td/MipsInstrFormats.td

```
// Arithmetic and logical instructions with 3 register operands.
class ArithLogicR<string opstr, RegisterOperand RO, bit isComm = 0,
                  InstrItinClass Itin = NoItinerary,
                  SDPatternOperator OpNode = null_frag>:
  InstSE<(outs RO:$rd), (ins RO:$rs, RO:$rt),
         !strconcat(opstr, "\t$rd, $rs, $rt"),
         [(set RO:$rd, (OpNode RO:$rs, RO:$rt))], Itin, FrmR> {
  let isCommutable = isComm;
  ...
}

class ADD_FM<bits<6> op, bits<6> funct> { // aus MipsInstrFormats
  bits<5> rd; bits<5> rs; bits<5> rt;
  bits<32> Inst;
  let Inst{31-26} = op; let Inst{25-21} = rs; let Inst{20-16} = rt;
  let Inst{15-11} = rd; let Inst{10-6}  = 0;  let Inst{5-0}   = funct;
}

def ADDu : ArithLogicR<"addu", CPURegsOpnd, 1, IIAlu, add>, ADD_FM<0, 0x21>;
def SUBu : ArithLogicR<"subu", CPURegsOpnd, 0, IIAlu, sub>, ADD_FM<0, 0x23>;
```

Target-Definition

Befehlssatz (Beispiel)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

MipsInstrInfo.td

```
// Conditional Branch
class CBranch<string opstr, PatFrag cond_op, RegisterClass RC> :
  InstSE<(outs), (ins RC:$rs, RC:$rt, brtarget:$offset),
         !strconcat(opstr, "\t$rs, $rt, $offset"),
         [(brcond (i32 (cond_op RC:$rs, RC:$rt)), bb:$offset)], IIBranch,
        FrmI> {
  let isBranch = 1;
  let isTerminator = 1;
  let hasDelaySlot = 1;
  let Defs = [AT];
}

def BEQ     : CBranch<"beq", seteq, CPURegs>, BEQ_FM<4>;
def BNE     : CBranch<"bne", setne, CPURegs>, BEQ_FM<5>;
```

Target-Definition
Lowering

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Steuerung der SelectionDAG-Konstruktion aus LLVM-IR.
  - Insbesondere: Was unterstützt das Target nativ?
- Interface: **`TargetLowering`**
  - **`isIntDivCheap(), isJumpExpensive(), ...`**
  - Intern: “action table”:
    Unterklassen können dort eintragen, wie nicht unterstützte Operation behandelt werden sollen.

promote Kleine Typen in größere Typen konvertieren
Bsp.: **`i16`** $\rightarrow$ **`i32`**.

expand Größere Typen in kleine Typen aufsplitten oder Bibliotheksaufruf nutzen
Bsp.: **`i64`** $\rightarrow$ **`i32,i32`**.

custom Target-spezifsche Implementierung von
`virtual` `SDValue LowerOperation(SDValue Op, ...)`
wird aufgerufen.

Target-Definition

Lowering (Beispiel)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

MipsTargetLowering in MipsISelLowering.cpp

```
MipsTargetLowering::
MipsTargetLowering(MipsTargetMachine &TM) {
  // Mips does not have i1 type, so use i32 for
  // setcc operations results (slt, sgt, ...).
  setBooleanContents(ZeroOrOneBooleanContent);

  // Set up the register classes
  addRegisterClass(MVT::i32, &Mips::CPURegsRegClass);
  ...

  // Load extented operations for i1 types must be promoted
  setLoadExtAction(ISD::EXTLOAD,  MVT::i1,  Promote);
  setLoadExtAction(ISD::ZEXTLOAD, MVT::i1,  Promote);
  setLoadExtAction(ISD::SEXTLOAD, MVT::i1,  Promote);
  ...

  // Mips Custom Operations
  setOperationAction(ISD::GlobalAddress, MVT::i32,   Custom);
  setOperationAction(ISD::BlockAddress,  MVT::i32,   Custom);

  ...
  // Operations not directly supported by Mips.
  setOperationAction(ISD::ROTL, MVT::i32,   Expand);
  setOperationAction(ISD::ROTL, MVT::i64,   Expand);
  ...
```


Embedded Systems & Applications

Target-Definition

Was noch zu tun ist..

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Aufrufkonventionen definieren.
- Unterklasse von **`AsmPrinter`** implementieren, um Ausgabe kompatibel mit dem System-Assembler zu machen.
- Subtargets definieren.
- Ggf. eigenen Pässe implementieren, die das Programm für besondere Target-Eigenschaften transformieren.
- ...

Zusammenfassung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- LLVM ist eine Sammlung von Bibliotheken und Werkzeugen zur Compilerentwicklung.
- LLVM-IR $\approx$ Assembler für virtuelle Maschine mit typischen RISC-Befehlssatz plus ein paar Extras.
- Beim Design der Infrastruktur wurde größter Wert auf Modularität und Wiederverwendbarkeit der Komponenten gelegt.

Quellen / weiterführende Informationen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- http://llvm.org
- http://llvm.org/docs/LangRef.html
- http://llvm.org/docs/ProgrammersManual.html
- http://llvm.org/docs/WritingAnLLVMPass.html
- http://llvm.org/docs/AliasAnalysis.html
- http://llvm.org/docs/WritingAnLLVMBackend.html
- http://llvm.org/docs/CodeGenerator.html
- http://www.aosabook.org/en/llvm.html
- Chris Lattner und Vikram Adve: "LLVM: A Compilation Framework for Lifelong Program Analysis & Transformation".
- Christoph Erhardt: "Design and Implementation of a TriCore Backend for the LLVM Compiler Framework".

Backup-Folien

Cheatsheet

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- C-Programm nach LLVM übersetzen:
  ```
  $ clang -S -emit-llvm -o prog.ll prog.c
  ```
- IR in “richtige” SSA-Form bringen:
  ```
  $ opt -S -mem2reg -o prog-ssa.ll prog.ll
  ```
- Zwischen Assembler- und Bitcode-Format konvertieren:
  ```
  $ llvm-as prog.ll # erzeugt prog.bc
  $ llvm-dis prog.bc # erzeugt prog.ll
  ```
- Codeerzeugung (= System-Assemblercode generieren)
  ```
  $ llc prog.ll # erzeugt prog.s
  ```

clang vs. gcc

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Codequalität: kein klarer Sieger, leichter Vorteil für gcc 4.8 ggü. clang 3.2
- gcc unterstützt mehr Sprachen und Architekturen
- clang ist modularer, schneller und braucht weniger Speicher
- Linux Kernel: muss noch gepatcht werden, ARM besser unterstützt als x86.

http://www.phoronix.com/scan.php?page=article&item=llvm_clang32_final
http://clang.llvm.org/comparison.html

http://llvm.linuxfoundation.org/index.php/Main_Page