



Die Umwandlung von Quelltext in Maschinensprache

Silas Groh, Mik Müller

17. Mai 2023

Carl-Fuhlrott-Gymnasium

- Wir schreiben Programme in speziellen Sprachen
- Vorteile eines hohen Abstraktionsgrades



Erweiterbarkeit



Erweiterbarkeit



Plattformunabhängigkeit



Erweiterbarkeit



Plattformunabhängigkeit



Geschwindigkeit

Zentrales Problem

```
1 fn main() {  
2     foo(2);  
3 }  
4  
5 fn foo(n: int) {  
6     let mut m = 3;  
7     exit(n + m);  
8 }
```


Vorgang ⚙️



- Programme sollten **einfach** zu schreiben sein
 - Die Ausführung sollte jedoch auch **einfach** sein
- ⇒ Zentrales Problem unserer Arbeit

- Verschiedene Vorgehensweisen
- Unterscheidung zwischen **Interpretern** und **Compilern**

```
1  fn main() {  
2      foo(2);  
3  }  
4  
5  fn foo(n: int) {  
6      let mut m = 3;  
7      exit(n + m);  
8  }
```

Ausführung 



Exit code: 5

- Python, Javascript, PHP, usw.
 - Direktes Ausführen des Syntaxbaums
- ⇒ Kein zusätzlicher Prozess notwendig


```
1 fn main() {  
2     foo(2);  
3 }  
4  
5 fn foo(n: int) {  
6     let mut m = 3;  
7     exit(n + m);  
8 }
```

Übersetzung ⚙️



```
1 ; RISC-V binary  
2 457f 464c 0102  
3 0002 00f3 0001  
4 0040 0000 0000  
5 0005 0000 0040  
6 0003 7000 0004  
7 0000 0000 0000  
8 0048 0000 0000  
9 0001 0000 0000  
10 0000 0000 0000
```

- Rust, C, Go, usw.
 - Umwandlung in ein anderes Format
 - Muss vor der Ausführung stattfinden
- ⇒ Zusätzlicher Prozess

Die Programmiersprache „rush“



- ca. vier Monate intensive Entwicklung
- 816 Git Commits
- 17548 Zeilen Programmtext in Git Commit „dbcbfa8“

Komponente	Zeilen Programtext
Lexer / Parser	2737
Analyzer	2392
Tree-walking Interpreter	578
VM Compiler / Runtime	1288
WebAssembly Compiler	1641
LLVM Compiler	1450
C Transpiler	1185
RISC-V Compiler	2234
x64 Compiler	2773

Komponente	Zeilen Programmtext
Lexer / Parser	2737
Analyzer	2392
Tree-walking Interpreter	578
VM Compiler / Runtime	1288
WebAssembly Compiler	1641
LLVM Compiler	1450
C Transpiler	1185
RISC-V Compiler	2234
x64 Compiler	2773

Bezeichnung	Beispiel
Schleife	<code>loop { }</code>
„while“-Schleife	<code>while x < 5 { }</code>
„for“-Schleife	<code>for i = 0; i < 5; i += 1 { }</code>

Bezeichnung	Beispiel
Schleife	<code>loop { }</code>
„while“-Schleife	<code>while x < 5 { }</code>
„for“-Schleife	<code>for i = 0; i < 5; i += 1 { }</code>
„if“-Verzweigung	<code>if true { } else { }</code>

Bezeichnung	Beispiel
Schleife	<code>loop { }</code>
„while“-Schleife	<code>while x < 5 { }</code>
„for“-Schleife	<code>for i = 0; i < 5; i += 1 { }</code>
„if“-Verzweigung	<code>if true { } else { }</code>
Funktionsdefinition	<code>fn foo(n: int) { }</code>

Bezeichnung	Beispiel
Schleife	<code>loop { }</code>
„while“-Schleife	<code>while x < 5 { }</code>
„for“-Schleife	<code>for i = 0; i < 5; i += 1 { }</code>
„if“-Verzweigung	<code>if true { } else { }</code>
Funktionsdefinition	<code>fn foo(n: int) { }</code>
Variablendefinition	<code>let mut answer = 42</code>

Bezeichnung	Beispiel
Schleife	<code>loop { }</code>
„while“-Schleife	<code>while x < 5 { }</code>
„for“-Schleife	<code>for i = 0; i < 5; i += 1 { }</code>
„if“-Verzweigung	<code>if true { } else { }</code>
Funktionsdefinition	<code>fn foo(n: int) { }</code>
Variablendefinition	<code>let mut answer = 42</code>
Infix-Ausdruck	<code>1 + n; 5 ** 2</code>
Präfix-Ausdruck	<code>!false; -n</code>

Bezeichnung	Beispiel
Schleife	<code>loop { }</code>
„while“-Schleife	<code>while x < 5 { }</code>
„for“-Schleife	<code>for i = 0; i < 5; i += 1 { }</code>
„if“-Verzweigung	<code>if true { } else { }</code>
Funktionsdefinition	<code>fn foo(n: int) { }</code>
Variablendefinition	<code>let mut answer = 42</code>
Infix-Ausdruck	<code>1 + n; 5 ** 2</code>
Präfix-Ausdruck	<code>!false; -n</code>
Typumwandlung	<code>42 as float</code>

Bezeichnung	Instanziierung einer Variable
„int“	<code>let a: int = 0;</code>
„float“	<code>let b: float = 3.14;</code>

Bezeichnung	Instanziierung einer Variable
„int“	<code>let a: int = 0;</code>
„float“	<code>let b: float = 3.14;</code>
„bool“	<code>let c: bool = true;</code>

Bezeichnung	Instanziierung einer Variable
„int“	<code>let a: int = 0;</code>
„float“	<code>let b: float = 3.14;</code>
„bool“	<code>let c: bool = true;</code>
„char“	<code>let d: char = 'a';</code>

Bezeichnung	Instanziierung einer Variable
„int“	<code>let a: int = 0;</code>
„float“	<code>let b: float = 3.14;</code>
„bool“	<code>let c: bool = true;</code>
„char“	<code>let d: char = 'a';</code>
„()“ oder „Unit“	<code>let e: () = main();</code>
„!“ oder „Never“	<code>let f = exit(42);</code>

Berechnung von Fibonaccizahlen in rush

```
1  fn main() {  
2      exit(fib(10));  
3  }  
4  
5  fn fib(n: int) -> int {  
6      if n < 2 {  
7          n  
8      } else {  
9          fib(n - 2) + fib(n - 1)  
10     }  
11 }
```

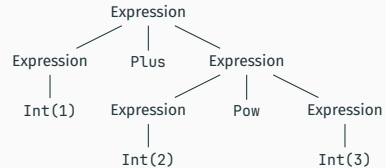
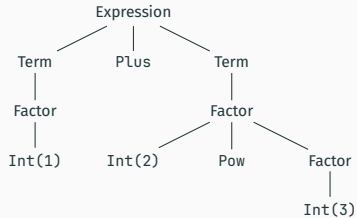

Lexikalische und syntaktische Analyse



- Gruppieren des Programmtextes in Tokens
- Analyse der Syntax des Programms
- Erzeugung eines abstrakten Syntaxbaums
- Festlegen der formalen Regeln in Form einer Grammatik

```
1 Expression = Term , { ( '+' | '-' ) , Term } ;  
2 Term       = Factor , { ( '*' | '/' ) , Factor } ;  
3 Factor     = ( integer  
4             | '(' Expression , ')' ) , [ '**' , Factor ] ;  
5 integer    = { '0' | '1' | '2' | '3' | '4' | '5' | '6' | '7' | '8' | '9' }- ;
```

Abstrakter Syntaxbaum



Zwei verschiedene Syntaxbäume für „1+2**3“

Semantische Analyse

Etappen der Übersetzung: Semantische Analyse



- Validiert die semantischen Eigenschaften
- Meistens: Definition in einer natürlichen Sprache

- Unterscheidung zwischen validen und invaliden Programmen

- Unterscheidung zwischen validen und invaliden Programmen
- hilfreiche Warnungen und Informationen

- Unterscheidung zwischen validen und invaliden Programmen
- hilfreiche Warnungen und Informationen
- Hinzufügen von Typinformationen zu dem Syntaxbaum

- Unterscheidung zwischen validen und invaliden Programmen
- hilfreiche Warnungen und Informationen
- Hinzufügen von Typinformationen zu dem Syntaxbaum
- Triviale Optimierungen der Programmstruktur

Beispiel 1: Typkonflikt

```
1 fn main() {  
2     let num = 3.1415;  
3     num + 1;  
4 }
```



Fehlerausgabe

TypeError at incompatible_types.rush:3:5

```
2 |     let num = 3.1415;  
3 |     num + 1;  
  |           ^^^^^^^  
4 | }
```

infix expressions require equal types on both sides, got `float` and `int`

Beispiel 2: Warnung aufgrund einer unbenutzten Variable

```
1 fn main() {  
2     let x = 42;  
3     let mut y = 3;  
4     exit(y);  
5 }
```



Ausgabe

Warning at unused_var.rush:2:9

```
1 | fn main() {  
2 |     let x = 42;  
   |         ^  
3 |     let mut y = 3;
```

unused variable `x`

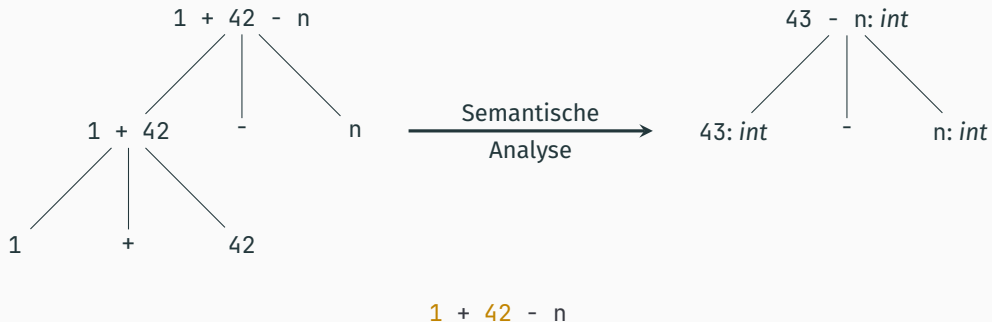
note: if this is intentional, change the name to `_x` to hide this warning

Info at unused_var.rush:3:13

```
2 |     let x = 42;  
3 |     let mut y = 3;  
   |               ^  
4 |     exit(y);
```

variable `y` does not need to be mutable

Hinzufügen von Informationen über Datentypen



Tree-walking Interpreter

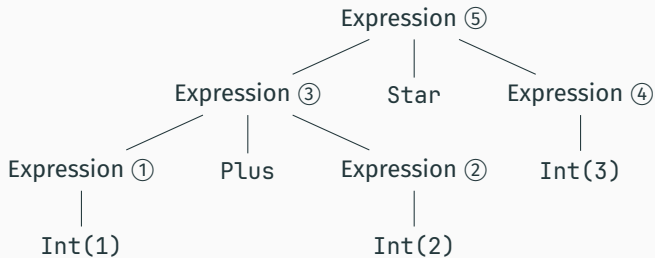
- *Traversiert* den Syntaxbaum
- *Interpretiert* das Programm direkt


```
10 type Scope<'src> = HashMap<&'src str, Rc<RefCell<Value>>>;
11
12 #[derive(Debug, Default)]
13 pub struct Interpreter<'src> {
14     scopes: Vec<Scope<'src>>,
15     functions: HashMap<&'src str, Rc<AnalyzedFunctionDefinition<'src>>>,
16 }
```

scopes Stack von Scopes; jeder Scope weist einem Variablennamen einen Laufzeitwert zu

functions Zuweisung von Funktionsnamen zu dem entsprechenden Knoten im Syntaxbaum

```
6  pub enum Value {  
7      Int(i64),  
8      Float(f64),  
9      Char(u8),  
10     Bool(bool),  
11     Unit,  
12     Ptr(Rc<RefCell<Value>>),  
13 }
```



Syntaxbaum zu „1 + 2 * 3“

```
1  fn main() {  
2      exit(fib(10));  
3  }  
4  
5  fn fib(n: int) -> int {  
6      if n < 2 {  
7          n  
8      } else {  
9          fib(n - 2) + fib(n - 1)  
10     }  
11 }
```

...
call_func("fib", vec![10])
visit_block(/* ... */)
visit_expression(/* ... */)
visit_if_expr(/* ... */)
visit_block(/* ... */)
visit_expression(/* ... */)
visit_infix_expr(/* ... */)
visit_expression(/* ... */)
visit_call_expr(/* ... */)
call_func("fib", vec![8])
...
call_func("fib", vec![6])
...
call_func("fib", vec![4])
...
call_func("fib", vec![2])
...
call_func("fib", vec![0])

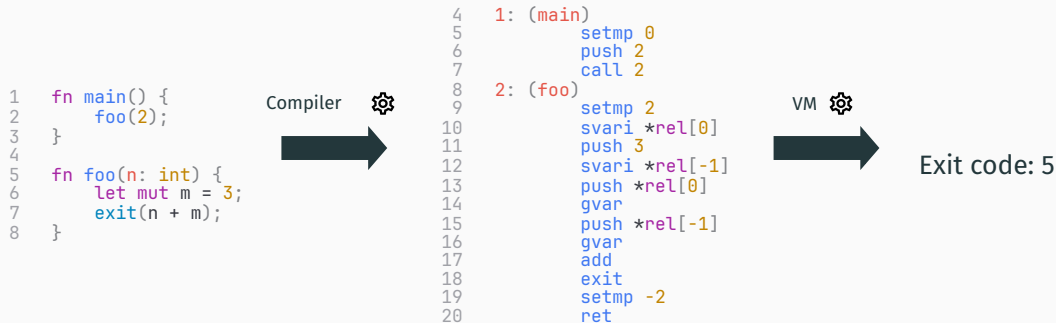


Virtuelle Maschine



- Häufig: Eine *Virtuelle Maschine* (VM) simuliert echte Computer
 - Display
 - Lautsprecher
 - Festplatte
 - ...

- Häufig: Eine *Virtuelle Maschine* (VM) simuliert echte Computer
 - Display
 - Lautsprecher
 - Festplatte
 - ...
- Hier: Software, die wie die CPU eines Rechners funktioniert



- Java, usw.
 - Umwandlung in ein anderes Format
- ⇒ Anschliessende Ausführung des Programmes

- Führt ein zuvor übersetztes Programm aus

- Führt ein zuvor übersetztes Programm aus
- Besitzt eine selbst entwickelte Architektur
 - Stackbasiertes Design
 - Hoher Abstaktionsgrad

stack Für temporäre Werte

stack Für temporäre Werte

mem Für Variablen

mem_ptr Für Speicherverwaltung

stack Für temporäre Werte

mem Für Variablen

mem_ptr Für Speicherverwaltung

call_stack Aufrufstapel (*Befehlsähler* und *Funktionszähler*)

- Unterteilung in Funktionen
 - Ohne Namen
 - numerische Identifizierung
 - Enthält mehrere Anweisungen

- Unterteilung in Funktionen
 - Ohne Namen
 - numerische Identifizierung
 - Enthält mehrere Anweisungen
- Struktur der Anweisungen: „call 2“
 - Befehlscode (call)
 - Optionaler Operand (2)

- Unterteilung in Funktionen
 - Ohne Namen
 - numerische Identifizierung
 - Enthält mehrere Anweisungen
- Struktur der Anweisungen: „`call 2`“
 - Befehlscode (`call`)
 - Optionaler Operand (2)
- ca. 30 verschiedene Befehlscodes

Demonstration: Ein-/Ausgabe

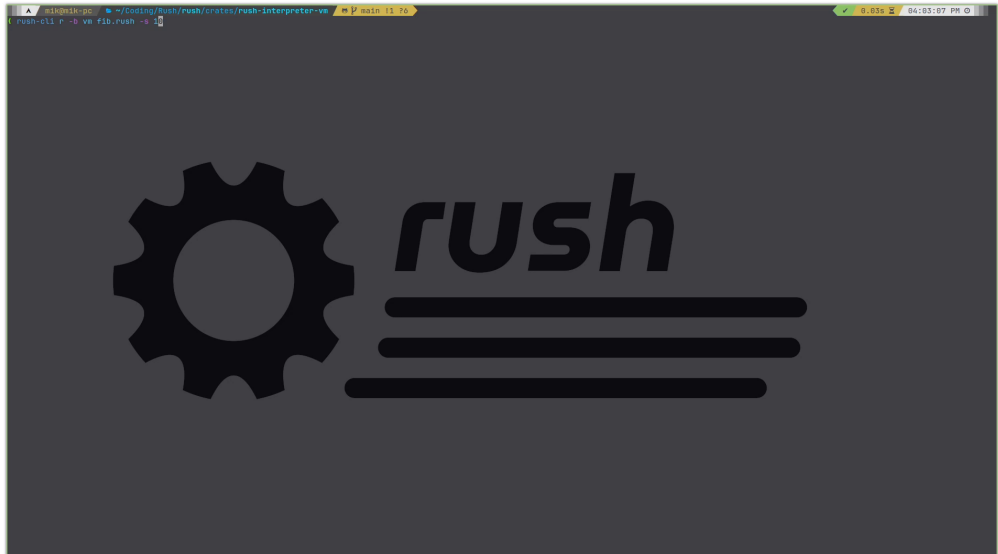
```
1  fn main() {  
2      exit(fib(10));  
3  }  
4  
5  fn fib(n: int) -> int {  
6      if n < 2 {  
7          n  
8      } else {  
9          fib(n - 2) + fib(n - 1)  
10     }  
11 }
```

Ausgabe



```
1  0: (prelude)  
2      setmp 0  
3      call 1  
4  1: (main)  
5      setmp 0  
6      push 10  
7      call 2  
8      exit  
9  2: (fib)  
10     setmp 1  
11     svari *rel[0]  
12     push *rel[0]  
13     gvar  
14     push 2  
15     lt  
16     jmpfalse 10  
17     push *rel[0]  
18     gvar  
19     jmp 21  
20     push *rel[0]  
21     # ...  
22     gvar  
23     push 1  
24     sub  
25     call 2  
26     add  
27     setmp -1  
28     ret
```

Demonstration: Laufzeitverhalten



- Ca. 2,7 mal schneller als der Tree-walking Interpreter

- Ca. 2,7 mal schneller als der Tree-walking Interpreter
- Einfache Implementierung des Compilers
 - Stack-basierte Architektur
 - Gleichzeitige Entwicklung von VM und Compiler (Feedbackschleife)
 - Hoher Abstraktionsgrad

Kompilierung zu WebAssembly

Was ist WebAssembly?

- Sicheres, portables, kompaktes und effizientes Format
- Hauptsächlich für leistungsstarke Webanwendungen

- Sicheres, portables, kompaktes und effizientes Format
- Hauptsächlich für leistungsstarke Webanwendungen
- Alleinstehende Spezifikation

- Sicheres, portables, kompaktes und effizientes Format
- Hauptsächlich für leistungsstarke Webanwendungen
- Alleinstehende Spezifikation
- Implementation durch Browser oder separate Runtimes

Beispiel Ein-/Ausgabe

```
1  fn main() {
2      exit(fib(10));
3  }
4
5  fn fib(n: int) -> int {
6      if n < 2 {
7          n
8      } else {
9          fib(n - 2) + fib(n - 1)
10     }
11 }
```



Ausgabe

```
00000000: 0061 736d 0100 0000 010d 0360 017f 0060 .asm.....`...`
00000010: 0000 6001 7e01 7e02 2401 1677 6173 695f ..`.~.~.$..wasi_
00000020: 736e 6170 7368 6f74 5f70 7265 7669 6577 snapshot_preview
00000030: 3109 7072 6f63 5f65 7869 7400 0003 0302 1.proc_exit.....
00000040: 0102 0503 0100 0007 1302 065f 7374 6172 ....._star
00000050: 7400 0106 6d65 6d6f 7279 0200 0801 010a t...memory.....
00000060: 2902 0a00 420a 1002 a710 0000 0b1c 0020 )...B.....
00000070: 0042 0253 047e 2000 0520 0042 027d 1002 .B.S.~ .. .B.}..
00000080: 2000 4201 7d10 027c 0b0b 002a 046e 616d .B.}..|...*.nam
00000090: 6501 1903 000b 5f5f 7761 7369 5f65 7869 e.....__wasi_exi
000000a0: 7401 046d 6169 6e02 0366 6962 0208 0201 t..main..fib....
000000b0: 0002 0100 016e .....n
```

```
1  (module
2    ;; ...
3    (import "wasi_snapshot_preview1" "proc_exit" (func $__wasi_exit (type 0)))
4    (func $main (type 1)
5      i64.const 10
6      call $fib
7      i32.wrap_i64
8      call $__wasi_exit
9      unreachable)
10   (func $fib (type 2) (param $n i64) (result i64)
11     local.get $n
12     i64.const 2
13     i64.lt_s
14     if (result i64) ;; label = @1
15       local.get $n
16       else
17         local.get $n
18         i64.const 2
19         i64.sub
20         call $fib
21         local.get $n
22         i64.const 1
23         i64.sub
24         call $fib
25         i64.add
26       end)
27   (memory (;0;) 0)
28   (export "_start" (func $main))
29   (export "memory" (memory 0))
30   (start $main))
```

rush	WebAssembly
<pre>fn fib(n: int) -> int { // ... }</pre>	<pre>(func \$fib (param \$n i64) (result i64) ;; ...)</pre>
<pre>if /* ... */ { n } else { // ... }</pre>	<pre>;; ... if (result i64) local.get \$n else ;; ... end</pre>
<pre>loop { // ... }</pre>	<pre>loop ;; ... br 0 end</pre>

Kompilierung zu LLVM

- Startete als **Forschungsprojekt**

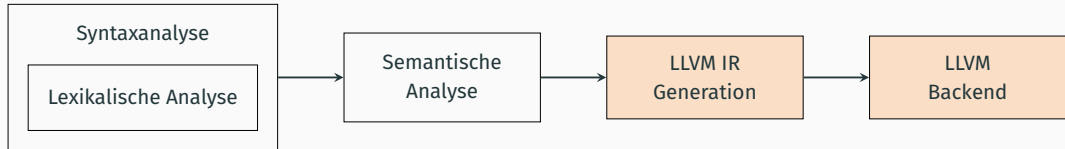
- Startete als **Forschungsprojekt**
- Erzeugung von Code aus einer **Zwischendarstellung** (IR)

- Startete als **Forschungsprojekt**
- Erzeugung von Code aus einer **Zwischendarstellung** (IR)
- Aggressive **Optimierung**

- Startete als **Forschungsprojekt**
- Erzeugung von Code aus einer **Zwischendarstellung** (IR)
- Aggressive **Optimierung**
- Die IR kann mittels APIs erzeugt werden

- Startete als **Forschungsprojekt**
- Erzeugung von Code aus einer **Zwischendarstellung** (IR)
- Aggressive **Optimierung**
- Die IR kann mittels APIs erzeugt werden
- Auch Rust und Swift nutzen LLVM

- Startete als **Forschungsprojekt**
 - Erzeugung von Code aus einer **Zwischendarstellung** (IR)
 - Aggressive **Optimierung**
 - Die IR kann mittels APIs erzeugt werden
 - Auch Rust und Swift nutzen LLVM
- ⇒ Das Backend eines Compilers



- Rust library names **Inkwell**
- Der Compiler erzeugt LLVM IR

Beispiel Ein-/Ausgabe

```
1  fn main() {
2      exit(fib(10));
3  }
4
5  fn fib(n: int) -> int {
6      if n < 2 {
7          n
8      } else {
9          fib(n - 2) + fib(n - 1)
10     }
11 }
```

Ausgabe



```
1  ; ModuleID = 'main'
2  source_filename = "main"
3  target triple = "x86_64-pc-linux-gnu"
4
5  define internal i64 @fib(i64 %0) {
6  entry:
7      %i_lt = icmp slt i64 %0, 2
8      br i1 %i_lt, label %merge, label %else
9
10 merge:                                     ; preds
11     ↪ = %entry, %else
12     %if_res = phi i64 [ %i_sum3, %else ], [ %0, %entry ]
13     ret i64 %if_res
14
15 else:                                     ; preds
16     ↪ = %entry
17     %i_sum = add i64 %0, -2
18     %ret_fib = call i64 @fib(i64 %i_sum)
19     %i_sum1 = add i64 %0, -1
20     %ret_fib2 = call i64 @fib(i64 %i_sum1)
21     %i_sum3 = add i64 %ret_fib2, %ret_fib
22     br label %merge
23 }
24
25 define i32 @main() {
26 entry:
27     %ret_fib = call i64 @fib(i64 10)
28     call void @exit(i64 %ret_fib)
29     unreachable
30 }
31
32 declare void @exit(i64)
```

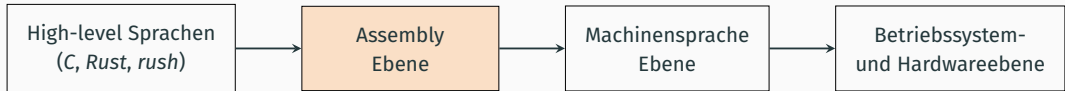
Vorteile	Nachteile
Hoher Abstraktionsgrad	Aufwendige Installation der LLVM Libraries
Unabhängigkeit von der Zielmaschine	Signifikante Größe des Compilers
Aggressive Optimierungsmaßnahmen	Unvollständige Dokumentation von Inkwell
Ausgabeprogramm ca. 1,7 mal schneller (vgl. x64 Compiler)	Abhängigkeit von einer C++ Codebase

Kompilierung zu low-level Architekturen

- Zielmaschine ist spezifisch
- Betriebssystem ist spezifisch

- Zielmaschine ist spezifisch
- Betriebssystem ist spezifisch
- Hier: die Compiler generieren Assembly

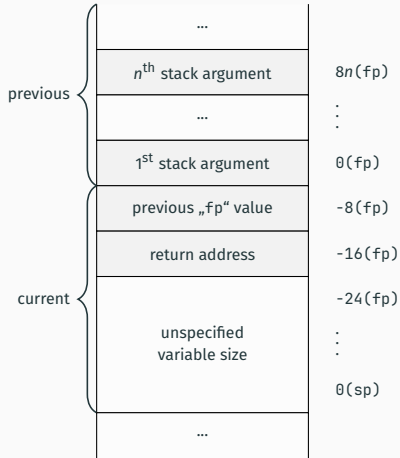
Abstraktionsgrad von Assembly



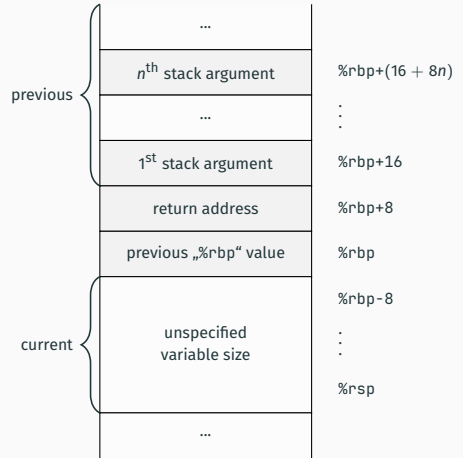
Register

Register	Purpose
zero	hardwired zero
ra	return address
sp	stack pointer
t0-t6	temporary storage
fp	frame pointer
a0, a1	function arguments, return values
a2-a7	function arguments
s1-s11	saved register
fa0, fa1	float arguments, return values
fa2-fa7	float arguments
fs0-fs11	float saved registers
ft0-ft11	float temporaries

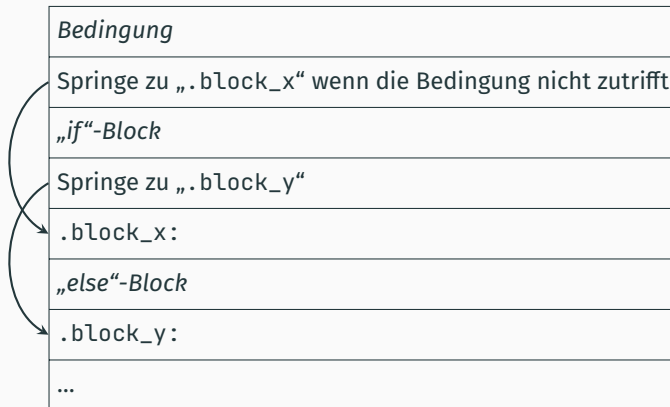
Stacklayouts



RISC-V



x64



Kompilierung zu RISC-V

- **Reduced Instruction Set Computer** (RISC)

- **Reduced Instruction Set Computer (RISC)**
- **Forschungsprojekt** der UC Berkeley

- **Reduced Instruction Set Computer (RISC)**
- **Forschungsprojekt** der UC Berkeley
- Lösen der Probleme vieler anderer Architekturen

- **Reduced Instruction Set Computer (RISC)**
- **Forschungsprojekt** der UC Berkeley
- Lösen der Probleme vieler anderer Architekturen
- **Simplizität** und Erweiterbarkeit

- **Reduced Instruction Set Computer (RISC)**
- **Forschungsprojekt** der UC Berkeley
- Lösen der Probleme vieler anderer Architekturen
- **Simplizität** und Erweiterbarkeit
- Unterstützung durch: Google, Microsoft, Samsung und IBM

Beispiel

```
1  fn main() {
2      exit(fib(10));
3  }
4
5  fn fib(n: int) -> int {
6      if n < 2 {
7          n
8      } else {
9          fib(n - 2) + fib(n - 1)
10     }
11 }
```

Ausgabe



```
1  .global _start
2
3  .section .text
4
5  _start:
6      call main..main
7      li a0, 0
8      call exit
9
10 main..main:
11     # begin prologue
12     addi sp, sp, -16
13     sd fp, 8(sp)
14     # ...
15
28
29 main..fib:
30     # begin prologue
31     addi sp, sp, -32
32     sd fp, 24(sp)
33     sd ra, 16(sp)
34     addi fp, sp, 32
35     # end prologue
36     # save params on stack
37     sd a0, -24(fp) # param n = a0
38     # begin body
39     ld a0, -24(fp) # n
40     li a1, 2
```

Vorteile	Nachteile
Sehr neu und modern	Geringe Verbreitung
Komplett open-source und gemeinschaftlich verwaltet	Weniger Online-Ressourcen
Sehr übersichtliche und simple Architektur	Einige Operationen sind aufwendiger
Sehr gute und übersichtliche Dokumentation	Abhängigkeit von einem Emulator (QEMU)

Kompilierung zu x86_64

- Häufig auch x84-64 oder x64 geschrieben

- Häufig auch x84-64 oder x64 geschrieben
- **C**omplex **I**nstruction **S**et **C**omputer (CISC)
 - Um vielfaches mehr Instruktionen als RISC Architekturen

- Häufig auch x84-64 oder x64 geschrieben
- **C**omplex **I**nstruction **S**et **C**omputer (CISC)
 - Um vielfaches mehr Instruktionen als RISC Architekturen
- Sehr weit verbreitet

Beispiel Ein-/Ausgabe

```
1  fn main() {  
2      exit(fib(10));  
3  }  
4  
5  fn fib(n: int) -> int {  
6      if n < 2 {  
7          n  
8      } else {  
9          fib(n - 2) + fib(n - 1)  
10     }  
11 }
```

Ausgabe



```
6  _start:  
7      call    main..main  
8      mov     %rdi, 0  
9      call    exit  
10  
11  main..main:  
12      mov     %rdi, 10  
13      call    main..fib  
14      mov     %rdi, %rax  
15      call    exit  
16  main..main.return:  
17      ret  
18  
19  main..fib:  
20      push    %rbp  
21      mov     %rbp, %rsp  
22      sub     %rsp, 16  
23      mov     qword ptr [%rbp-8], %rdi  
24      cmp     qword ptr [%rbp-8], 2  
25      jge     .block_0  
26      mov     %rax, qword ptr [%rbp-8]  
27      jmp     .block_1  
28  .block_0:  
29  # ...  
39  .block_1:  
40  main..fib.return:  
41      leave  
42      ret
```

Merkmal	RISC-V	x64
Instruktionen	<code>addi a0, a0, 3</code>	<code>add %rax, 3</code>

Merkmal	RISC-V	x64
Instruktionen	<code>addi a0, a0, 3</code>	<code>add %rax, 3</code>
Register	<code>a0, a1, fa0, sp, ...</code>	<code>%rax, %rdi, %xmm0, %rsp, ...</code>

Merkmal	RISC-V	x64
Instruktionen	<code>addi a0, a0, 3</code>	<code>add %rax, 3</code>
Register	<code>a0, a1, fa0, sp, ...</code>	<code>%rax, %rdi, %xmm0, %rsp, ...</code>
Pointer	<code>-1(fp)</code>	<code>byte ptr [%rbp-1]</code>

Merkmal	RISC-V	x64
Instruktionen	<code>addi a0, a0, 3</code>	<code>add %rax, 3</code>
Register	<code>a0, a1, fa0, sp, ...</code>	<code>%rax, %rdi, %xmm0, %rsp, ...</code>
Pointer	<code>-1(fp)</code>	<code>byte ptr [%rbp-1]</code>
Größe eines Worts	4 Byte	2 Byte

Vorteile	Nachteile
Höherer Abstraktionsgrad als RISC-V	Kompliziertere Übersetzung von z.B. Division
Weite Verbreitung	Sehr alt und unübersichtlich
Viele Online-Ressourcen	Weniger übersichtliche Dokumentation

- Deutlich anspruchsvoller

- Deutlich anspruchsvoller
- Signifikanter Lernaufwand

- Deutlich anspruchsvoller
- Signifikanter Lernaufwand
- Detailliertes Verständnis notwendig

- Deutlich anspruchsvoller
- Signifikanter Lernaufwand
- Detailliertes Verständnis notwendig
- Sehr fehleranfällig

- Deutlich anspruchsvoller
- Signifikanter Lernaufwand
- Detailliertes Verständnis notwendig
- Sehr fehleranfällig
- Benötigt keine direkten Abhängigkeiten

Finale Anmerkungen & Fazit

- Vertiefung

- Vertiefung
 - Lexer und Parser

- Vertiefung
 - Lexer und Parser
 - Tree-walking Interpreter

- Vertiefung
 - Lexer und Parser
 - Tree-walking Interpreter
- Pratt Parsing

- Vertiefung
 - Lexer und Parser
 - Tree-walking Interpreter
- Pratt Parsing
- LLVM und WebAssembly

- Vertiefung
 - Lexer und Parser
 - Tree-walking Interpreter
- Pratt Parsing
- LLVM und WebAssembly
- Assembly und low-level Programmierung

rush Website <https://rush-lang.de>

rush Website <https://rush-lang.de>

Paper <https://paper.rush-lang.de>

rush Website <https://rush-lang.de>

Paper <https://paper.rush-lang.de>

Playground <https://play.rush-lang.de>

rush Website <https://rush-lang.de>

Paper <https://paper.rush-lang.de>

Playground <https://play.rush-lang.de>

GitHub <https://github.com/rush-rs>

Literatur

[Goo23] Google Fonts. *Google Fonts Icons*. 2023. URL: <https://fonts.google.com/icons>.