

# RISC-V CPU Emulator

---

Christian Krause

[christian.krause@stud.uni-heidelberg.de](mailto:christian.krause@stud.uni-heidelberg.de)

# Table of Contents

# Übersicht

## **Was passiert, bevor ein Programm ausgeführt wird?**

1. C-Programm (`hello_world.c`)
2. Assembly Datei (`hello_world.s`)
3. Ausführbare Datei (ELF) (`hello_world`)

# hello\_world.c

```
#include <stdio.h>
int main() {
    int a = 3;
    int b = 37;
    int c = a + b;
    c += 2;
    printf("Hello World! %d\n",c);
    return 0;
}
```

# hello\_world.c

```
#include <stdio.h>
int main() {
    int a = 3;
    int b = 37;
    int c = a + b;
    c += 2;
    printf("Hello World! %d\n",c);
    return 0;
}
```

```
$ gcc -S hello_world.c
$ /opt/riscv/bin/riscv64-unknown-elf-gcc -S hello_world.c -O0 -mabi=lp64 -march=rv64i
```

# -hello\_world.s-

```
main:  
...  
    li  a4,3  
    li  a5,37  
    addw a5,a4,a5  
    addiw a5,a5,2  
...  
    call printf  
...
```

```
#include <stdio.h>  
int main() {  
    int a = 3;  
    int b = 37;  
    int c = a + b;  
    c += 2;  
    printf("Hello World! %d\n",c);  
    return 0;  
}
```

# Assembly Grundlagen

- CPU:
  - ▶ Register ( $32 \times 64\text{bit}$ ) (+ ggf. float Register)
  - ▶ Instructions
  - ▶ Program Counter (PC) (Position im Programm)
- RAM

# Beispiele für Instructions

- `li $rd $imm`

(Load immediate): Läßt *imm* in *rd*

- `addi $rd $rs1 $imm`

(Add immediate): Addiert *imm* auf *rs1* und schreibt das Ergebnis in *rd*

- `sub $rd $rs1 $rs2`

Subtrahiert *rs2* von *rs1* und speichert das Ergebnis in *rd*

# Speicher

- `ld $rd $offset($rsi)`

(Load Doubleword): Läßt den 64-bit Wert an  $rs1 + offset$  aus dem Arbeitsspeicher in  $rd$

- `sd $rs2 $offset($rs1)`

(Store Douleword): Speichert den 64-bit Wert aus  $rs2$  an die Stelle  $offset + rs1$

# Speicher

Was wenn man nicht ganze 64bit aus dem Speicher laden möchte?

- `lb $rd $offset($rsi)`

TODO visualisierung Was passiert mit den 56 freien Bits?

1. **Zero Extending:** Bei **lbu** (Load Byte unsinged) werden alle oberen Bits auf null gesetzt
2. **Sign Extending**

# Two's Complement

(TODO zwischenergebnisse selber überlegen und aufdecken)

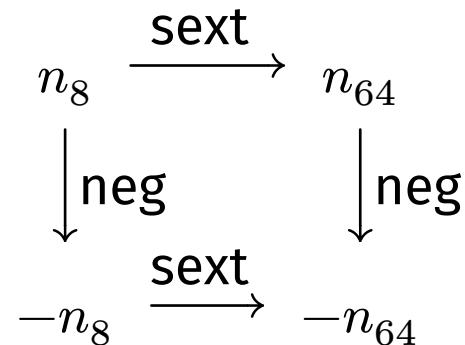
- Ziel: Binärdarstellung von ganzen (insbesondere negativen) Zahlen mit  $N$  Bits
- Natürliche Zahlen:  $(n : \mathbb{N}) \mapsto \text{bin}(n)$     $6 \mapsto 00000110$  (für  $N = 8$ )
- Negative Zahlen:  $-n \mapsto \text{bin}(n)^{-1} + 1$ 
  - ▶  $6 \mapsto (00000110)^{-1} + 1 \mapsto 11111001 + 1 \mapsto 11111010$
- Warum?(TODO aufdecken)
  - ▶ 0 ist eindeutig
  - ▶ Addition funktioniert selbst mit negativen Zahlen
  - ▶ TODO gibt bestimmt noch mehr

# Sign extending

TODO an der Tafel beispiel machen Wir haben eine Zahl  $n$  (als Binärzahl mit 8 Bits) und wollen diese in ein 64-Bit register Speichern (ohne den Wert zu ändern).

- **Zero Extending:** Wenn die Zahl negativ ist, ändert sich der Wert
- **Sign Extending:** Der neue Platz wird mit dem *MSB* (Most significant Bit) aufgefüllt
  - ▶ Bei Positiven Zahlen bleibt der Wert gleich (gleich wie Zero-Extending)
  - ▶ Bei Negativen Zahlen:

# Sign extending



Es ist egal, ob man zuerst negiert oder Sign extended. (TODO Beispiel)

# Speicher

Was wenn man nicht ganze 64bit aus dem Speicher laden möchte?

- `lb $rd $offset($rsi)`

TODO visualisierung Was passiert mit den 56 freien Bits?

1. **Zero Extending:** Bei **lbu** (Load Byte unsinged) werden alle oberen Bits auf null gesetzt
2. **Sign Extending:** Bei **lb** (Load Byte) wird der Wert auf 64-Bit Sign Extended und in *rd* geschrieben.

TODO aufdecken: Es gibt ähnliche Instructions für halfwords (16 Bit) und words (32 Bit).

TODO bei anderen Instructions (li addi etc) wird auch sign extended.

# Lui und auipc

**lui** kann nur einen 12-Bit Wert laden, was wenn man größere Zahlen möchte?

- `lui $rd $imm`

(Load upper immediate): Setzt die unteren 12 Bits von *rd* auf null und die nächsten 20 Bits auf *imm*.

# Control Flow Instructions

- `jal $rd $offset`

(Jump and Link): Schreibe den Wert des Program Counters in *rd* und erhöhe den Program Counter um *offset*

- `beq $rs1 $rs2 $offset`

(Branch if equal): Wenn *rs1* gleich *rs2* ist, dann wird der Program Counter um *offset* erhöht.

# Hello World.asm

Jetzt verstehen wir was passiert! (abgesehen von call...)

```
main:  
...  
    li  a4,3  
    li  a5,37  
    addw a5,a4,a5  
    addiw a5,a5,2  
...  
    call printf  
...
```

```
#include <stdio.h>  
  
int main() {  
    int a = 3;  
    int b = 37;  
    int c = a + b;  
    c += 2;  
    printf("Hello World! %d\n",c);  
    return 0;  
}
```

# ELF Dateien

Assembler konvertiert menschlich lesbaren Assembly Code in eine Ausführbare ELF Datei:

```
└ λ file hello_world
hello_world: ELF 64-bit LSB executable, UCB RISC-V, soft-float ABI, version 1 (SYSV), statically
linked, with debug_info, not stripped
```

- **file** command gibt Informationen zu einer Datei aus

# Elf Dateien

TODO leute raten lassen

```
hello_world: ELF 64-bit LSB executable, UCB RISC-V, soft-float ABI, version 1 (SYSV), statically linked, with debug_info, not stripped
```

- *hello\_world* ist eine ausführbare (**executable**) **ELF** Datei
- **64-bit** Register
- **LSB**: Least Significant Bit (little endian)
- **RISC-V**
- **soft-float ABI**: keine Hardware für float operationen
- **statically linked**: Hängt nicht von anderen Bibliotheken ab

# andere ELF Dateien

```
python3.14: ELF 64-bit LSB pie executable, x86-64, version 1 (SYSV), dynamically linked,
interpreter /lib64/ld-linux-x86-64.so.2, BuildID[sha1]=ddf03afb83452757f6df249b7608c7df7b476e25,
for GNU/Linux 4.4.0, stripped
```

- **pie** (Position independent executable): Programm kann an beliebiger Speicheradresse geladen werden
- **x86-64**: Instruction set
- **dynamically linked**: Der **interpreter** lädt Bibliotheken bevor die Datei ausgeführt wird

# ELF Dateien

TODO auf Wikipedia artikel verlinken [https://en.wikipedia.org/wiki/Executable\\_and\\_Linkable\\_Format](https://en.wikipedia.org/wiki/Executable_and_Linkable_Format)

- **Header:** Allgemeine Informationen zu der Datei, Entry point, Programm header Tabelle
- **Programm Headers:** Geben einen Teil der Elf Datei an, der an einen bestimmten Ort in den Arbeitsspeicher geladen werden soll

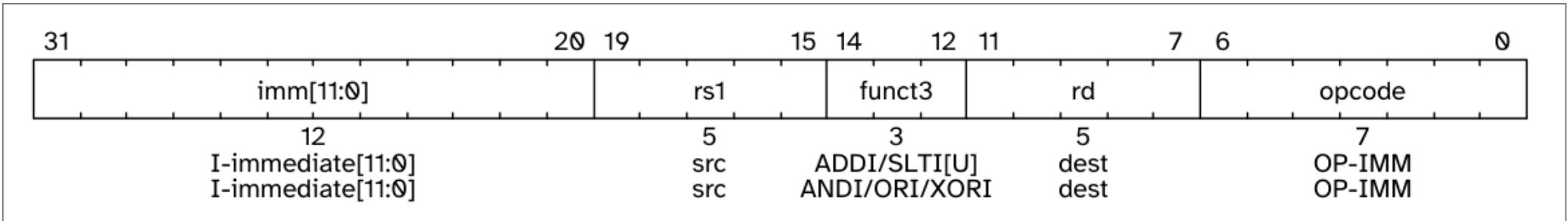
# Instructions

## Wie werden Instructions codiert?

- 4 Bytes (32-Bits)

31	27	26	25	24	20	19	15	14		12	11		7	6	0								
funct7			rs2		rs1		funct3		rd		opcode		R-type										
imm[11:0]					rs1		funct3		rd		opcode		I-type										
imm[11:5]			rs2		rs1		funct3		imm[4:0]		opcode		S-type										
imm[12 10:5]			rs2		rs1		funct3		imm[4:1 11]		opcode		B-type										
imm[31:12]										rd		opcode		U-type									
imm[20 10:1 11 19:12]										rd		opcode		J-type									

# Beispiel



Assembly = addi x3, x2, 42

Binary = 0000 0010 1010 0001 0000 0001 1001 0011

# Beispiel

31	funct7							25 24	rs2		20 19	rs1		15 14	funct3		12 11	rd		7	6	opcode		0
0	0	0	0	0	0	0	0	src2	5	src1	5	src1	3	ADD/SLT[U]	dest	5	dest	dest	dest	7	OP	OP	OP	OP
0	0	0	0	0	0	0	0	src2	src2	src1	src1	src1	3	AND/OR/XOR	dest	dest	dest	dest	dest	7	OP	OP	OP	OP
0	0	0	0	0	0	0	0	src2	src2	src1	src1	src1	3	SLL/SRL	dest	dest	dest	dest	dest	7	OP	OP	OP	OP
0	1	0	0	0	0	0	0	src2	src2	src1	src1	src1	3	SUB/SRA	dest	dest	dest	dest	dest	7	OP	OP	OP	OP

Assembly = sra x12, x11, x31

Binary = 0100 0001 1111 0101 1101 0110 0011 0011

# Bitwise Operationen

**AND:**

$$\begin{array}{r} 101101 \\ \& 000111 \\ \hline = 000101 \end{array}$$

**OR:**

$$\begin{array}{r} 101101 \\ | 000111 \\ \hline = 101111 \end{array}$$

**Left Shift (8-Bit Werte):**

$$00110101 \ll 3 = 10101000$$

**Logical Right Shift (8-Bit Werte):**

$$10110101 \gg 3 = 00010110$$

**Arithmetic Right Shift (8-Bit Werte):**

$$10110101 \ggg 3 = 11110110$$

$$00110101 \ggg 3 = 00000110$$

Es gibt mehrere Methoden sich eine Binärdatei anzuschauen

1. `file a.out`

2. `readelf a.out`

(TODO welche flags)

3. `objdump a.out`

(TODO welche flags)

Zum Debugging:

- qemu-linux-riscv64 installieren
- qemu gdb installieren
- schritt für schritt durch
- TODO das muss man nicht selber machen, sondern auf VM (Franz??)
- TODO kurzer reminder zu hexadezimalzahlen und binärzahlen
- TODO erklären wie ecalls funktionieren
- TODO rv64i multilib compilen
- TODO Riscv Musl toolchain erklären (braucht -a extension für threading Sachen)