School of Computation, Information and Technology
Technische Universität München

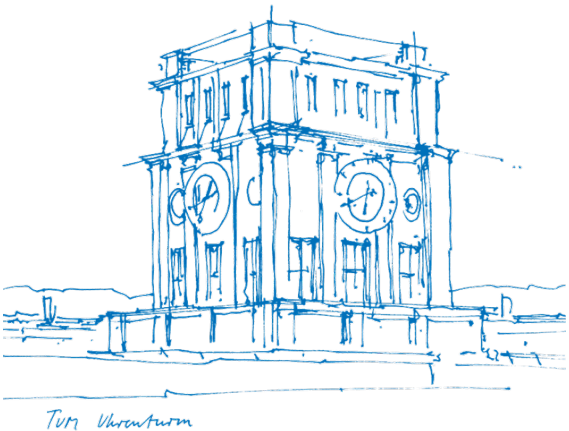
Übung 04: Rekursion und Calling Convention

Einführung in die Rechnerarchitektur

Niklas Ladurner

School of Computation, Information and Technology
Technische Universität München

7. November 2025

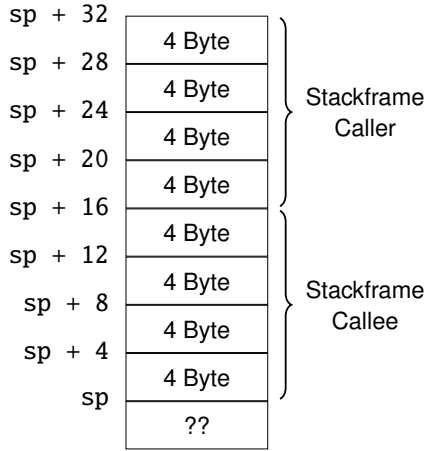


Keine Garantie für die Richtigkeit der Tutorfolien.

Bei Unklarheiten/Unstimmigkeiten haben VL/ZÜ-Folien recht!

Stack

- Speicherbereich für lokale Variablen
- wächst von hohen Adressen zu niedrigen Adressen
- Anpassen des Stackpointers durch Beschreiben des `sp`-Registers
- alles an Adressen < `sp` ungeschützt
- besonders wichtig für Rekursion (Stackframes)



Caller und Callee (1)

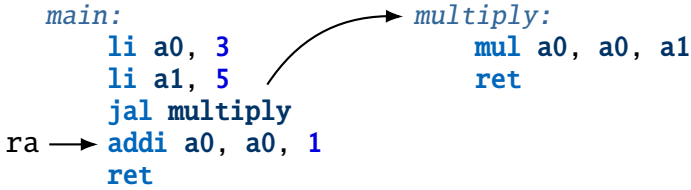
```
main:
    li a0, 3
    li a1, 5
    jal multiply
    addi a0, a0, 1
    ret
```

Caller
(aufrufende Funktion)

```
multiply:
    mul a0, a0, a1
    ret
```

Callee
(aufgerufene Funktion)

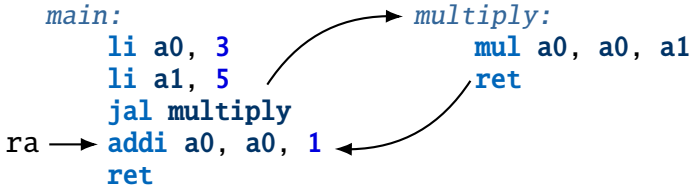
Caller und Callee (1)



Caller
(aufrufende Funktion)

Callee
(aufgerufene Funktion)

Caller und Callee (1)



Caller
(aufrufende Funktion)

Callee
(aufgerufene Funktion)

Caller und Callee (2)

```
caller:
# aufrufende Funktion (Caller)

# wir speichern die Rücksprungadresse auf
# den Stack -> ra ist Caller-saved!
addi sp, sp, -16
sw ra, 0(sp)

# ... irgendwas, was t0 verwendet

# da t0 caller-saved ist, müssen wir uns
# t0 absichern, falls wir den Inhalt später
# noch brauchen
sw t0, 4(sp)
# ...
jal ra, callee  # Sprung zur Unterfunktion
# ...
lw t0, 4(sp)
# ... wieder irgendwas mit t0
lw ra, 0(sp)
addi sp, sp, 16
jalr zero, 0(ra)

callee:
# aufgerufene Funktion (Callee)

# hier dürfen wir t0-t6 bspw. verändern
# falls wir s0-s6 verändern wollen,
# müssen sie gesichert werden:
addi sp, sp, -16
sw s2, 0(sp)
sw s3, 4(sp)

# s2, s3 können jetzt verwendet werden!

lw s2, 0(sp)
lw s3, 4(sp)
addi sp, sp, 16
jalr zero, 0(ra)
```

fürs Selbststudium :)

Calling Convention

- „Aufrufkonvention“ $\rightarrow$ lediglich eine Vereinbarung
- definiert Parameterüberabe, Rückgabe, Registersicherung, Stack etc.
  1. Datentypen $\leq$ 4 Byte in a-Register, sign-extension falls vorzeichenbehafteter Datentyp
  2. Datentypen $=$ 8 Byte in zwei a-Registern, niedrigwertige Hälfte zuerst
  3. Datentypen $>$ 8 Byte als Pointer auf Caller-Stack
  4. Falls zu wenige Register: Übergabe über Stack
- Stackpointer muss immer ein Vielfaches von 16 Byte sein!

Register

Register	ABI Name	Description	Saver
x0	zero	Hard-wired zero	—
x1	ra	Return address	Caller
x2	sp	Stack pointer	Callee
x3	gp	Global pointer	—
x4	tp	Thread pointer	—
x5-x7	t0-t2	Temporaries	Caller
x8	s0/fp	Saved register/frame pointer	Callee
x9	s1	Saved register	Callee
x10-11	a0-1	Function arguments/return values	Caller
x12-17	a2-7	Function arguments	Caller
x18-27	s2-11	Saved registers	Callee
x28-31	t3-6	Temporaries	Caller

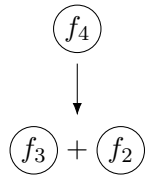
Rekursion (1)

- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

Rekursion (1)

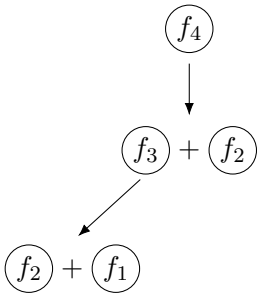
- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

Rekursion (1)



- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

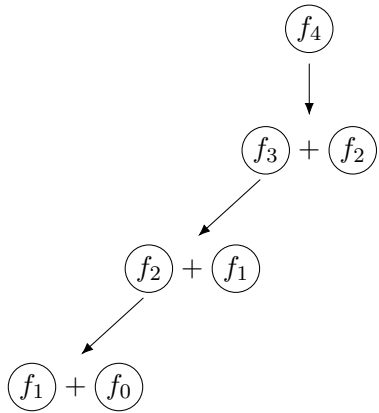
Rekursion (1)



- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

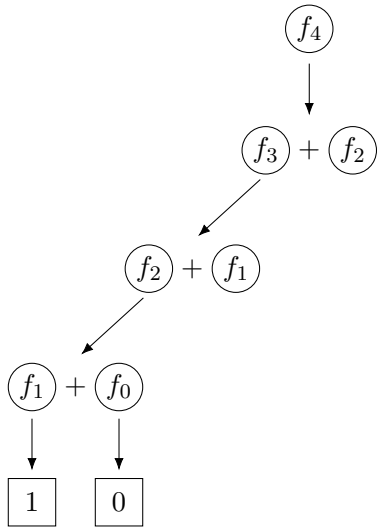
Rekursion (1)

- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$



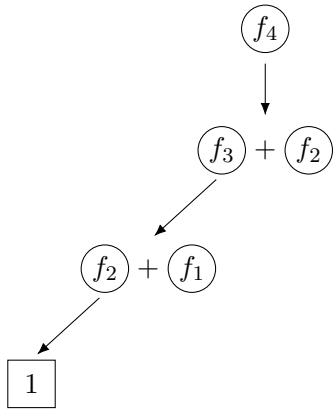
Rekursion (1)

- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$



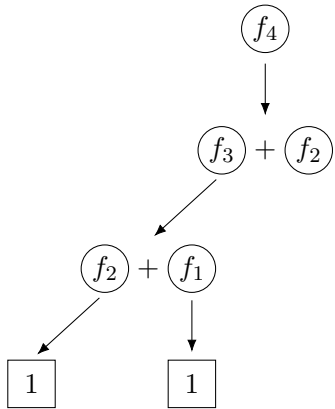
Rekursion (1)

- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

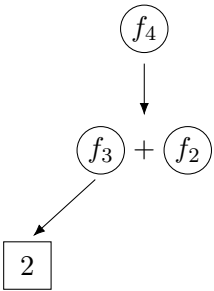


Rekursion (1)

- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

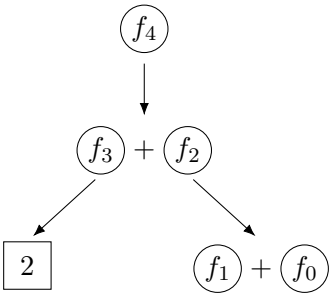


Rekursion (1)



- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

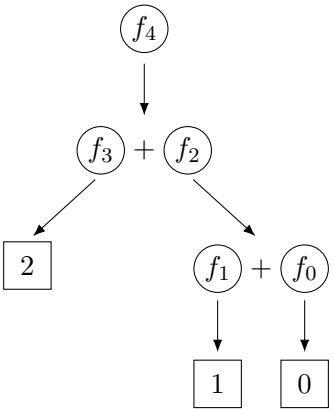
Rekursion (1)



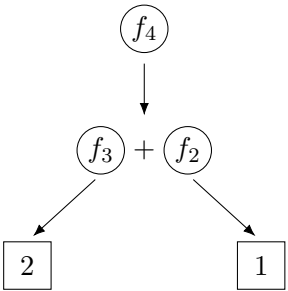
- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

Rekursion (1)

- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$



Rekursion (1)



- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

Rekursion (1)

- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

Rekursion (1)

- Funktion die sich selbst aufruft
- Konzept: Berechnung aufteilen bis Basisfall erreicht
- jede rekursive Funktion kann auch iterativ implementiert werden ($\rightarrow$ Schleife)
- Beispiel Fibonacci-Folge:
  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$,
  $f_1 = 1$, $f_0 = 0$

$$f_4 = 3$$

Rekursion (2)

```
1  fun:
2    addi sp, sp, -8
3    sw ra, 0(sp)
4    sw a0, 4(sp)
5    beq a0, zero, end
6    addi a0, a0, -1
7    jal fun
8  end:
9    lw ra, 0(sp)
10   addi sp, sp, 8
11   jalr zero, 0(ra)
```

Achtung: 8 Byte nicht CC-konform, nur zur besseren Darstellung

1. Abbruchbedingung(en)
2. Sicherung von `ra` und evtl. Parametern
3. Vorbereitung der Parameter für den rekursiven Aufruf
4. Rekursiver Aufruf
5. Ergebnis des Aufrufs verwerten
6. Wiederherstellung von `ra`, `sp`
7. Rücksprung

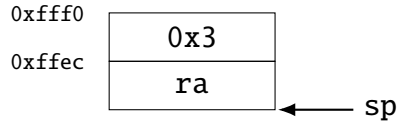
Schritte 3–5 können mehrmals vorkommen!

Rekursion (2)

```
1  fun:
2    addi sp, sp, -8
3    sw ra, 0(sp)
4    sw a0, 4(sp)
5    beq a0, zero, end
6    addi a0, a0, -1
7    jal fun
8  end:
9    lw ra, 0(sp)
10   addi sp, sp, 8
11   jalr zero, 0(ra)
```

Achtung: 8 Byte nicht CC-konform, nur zur besseren Darstellung

Aufruf mit a0 = 3:

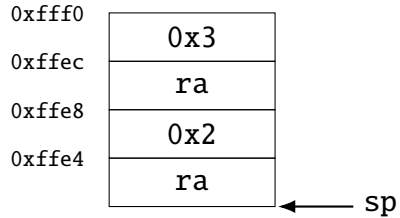


Rekursion (2)

```
1  fun:
2    addi sp, sp, -8
3    sw ra, 0(sp)
4    sw a0, 4(sp)
5    beq a0, zero, end
6    addi a0, a0, -1
7    jal fun
8  end:
9    lw ra, 0(sp)
10   addi sp, sp, 8
11   jalr zero, 0(ra)
```

Achtung: 8 Byte nicht CC-konform, nur zur besseren Darstellung

Aufruf mit a0 = 3:

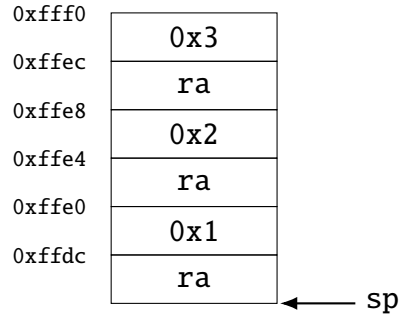


Rekursion (2)

```
1  fun:
2    addi sp, sp, -8
3    sw ra, 0(sp)
4    sw a0, 4(sp)
5    beq a0, zero, end
6    addi a0, a0, -1
7    jal fun
8  end:
9    lw ra, 0(sp)
10   addi sp, sp, 8
11   jalr zero, 0(ra)
```

Achtung: 8 Byte nicht CC-konform, nur zur besseren Darstellung

Aufruf mit a0 = 3:

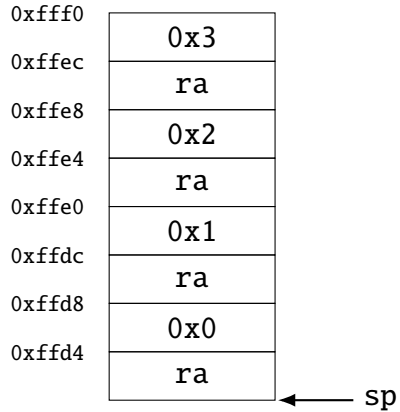


Rekursion (2)

```
1  fun:
2    addi sp, sp, -8
3    sw ra, 0(sp)
4    sw a0, 4(sp)
5    beq a0, zero, end
6    addi a0, a0, -1
7    jal fun
8  end:
9    lw ra, 0(sp)
10   addi sp, sp, 8
11   jalr zero, 0(ra)
```

Achtung: 8 Byte nicht CC-konform, nur zur besseren Darstellung

Aufruf mit a0 = 3:

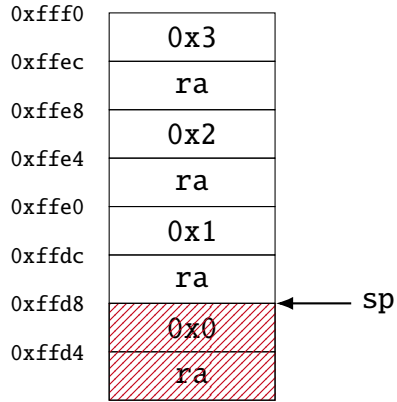


Rekursion (2)

```
1  fun:
2    addi sp, sp, -8
3    sw ra, 0(sp)
4    sw a0, 4(sp)
5    beq a0, zero, end
6    addi a0, a0, -1
7    jal fun
8  end:
9    lw ra, 0(sp)
10   addi sp, sp, 8
11   jalr zero, 0(ra)
```

Achtung: 8 Byte nicht CC-konform, nur zur besseren Darstellung

Aufruf mit a0 = 3:

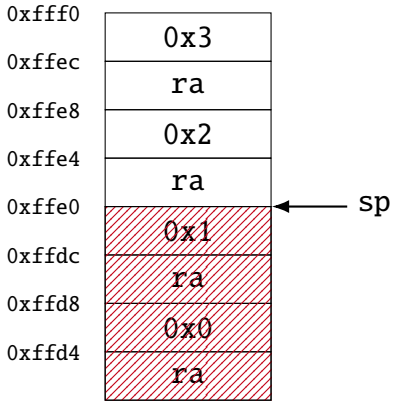


Rekursion (2)

```
1  fun:
2    addi sp, sp, -8
3    sw ra, 0(sp)
4    sw a0, 4(sp)
5    beq a0, zero, end
6    addi a0, a0, -1
7    jal fun
8  end:
9    lw ra, 0(sp)
10   addi sp, sp, 8
11   jalr zero, 0(ra)
```

Achtung: 8 Byte nicht CC-konform, nur zur besseren Darstellung

Aufruf mit a0 = 3:

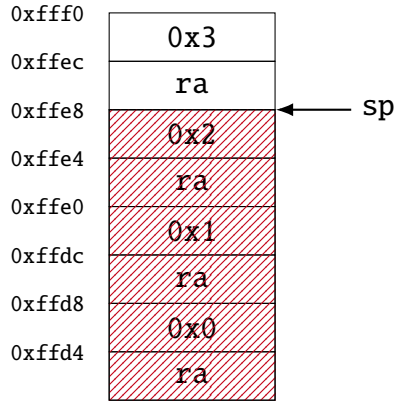


Rekursion (2)

```
1  fun:
2    addi sp, sp, -8
3    sw ra, 0(sp)
4    sw a0, 4(sp)
5    beq a0, zero, end
6    addi a0, a0, -1
7    jal fun
8  end:
9    lw ra, 0(sp)
10   addi sp, sp, 8
11   jalr zero, 0(ra)
```

Achtung: 8 Byte nicht CC-konform, nur zur besseren Darstellung

Aufruf mit a0 = 3:

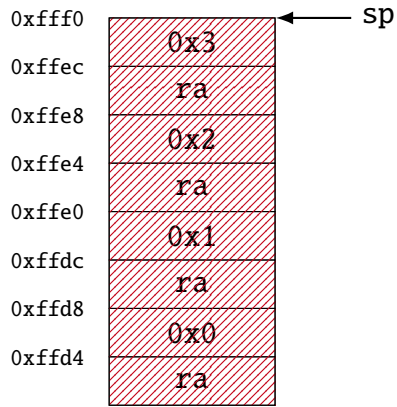


Rekursion (2)

```
1  fun:
2    addi sp, sp, -8
3    sw ra, 0(sp)
4    sw a0, 4(sp)
5    beq a0, zero, end
6    addi a0, a0, -1
7    jal fun
8  end:
9    lw ra, 0(sp)
10   addi sp, sp, 8
11   jalr zero, 0(ra)
```

Achtung: 8 Byte nicht CC-konform, nur zur besseren Darstellung

Aufruf mit a0 = 3:



Fragen?

Links

- Zulip: „ERA Tutorium – Mi-1600-3“ bzw. „ERA Tutorium – Fr-1500-1“
- ERA-Moodle-Kurs
- ERA-Artemis-Kurs
- Übersicht an RISC-V-Instruktionen
- Übersicht an RISC-V-Pseudoinstruktionen

School of Computation, Information and Technology
Technische Universität München

Übung 04: Rekursion und Calling Convention

Einführung in die Rechnerarchitektur

Niklas Ladurner

School of Computation, Information and Technology
Technische Universität München

7. November 2025