LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

mobile and distributed systems group

Grundlagen zur Assemblerprogrammierung unter SPIM

im Sommersemester 2016

Lorenz Schauer
Mobile & Verteilte Systeme

05. Juli 2016

Agenda

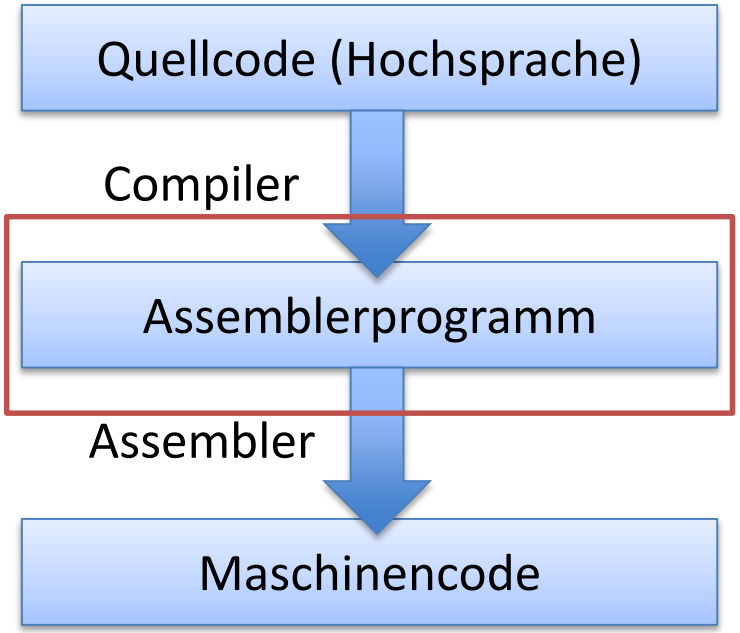
Theoretische Grundlagen

- Motivation
- Register
- Aufbau eines Programms
  - Daten-Segment:
    - Direktiven: Word, asciiz,…
  - Text-Segment
- Befehle
  - Ladebefehle
  - Speicherbefehle
  - Arithmetische Befehle
- SPIM-Betriebssystem: Ein- und Ausgabe

Vom Programm zum Maschinenprogramm

Vereinfachter Ablauf:

- Hochsprache (C++, Java,…) wird mittels Compiler in eine Assemblersprache übersetzt
- Compiler analysiert das Programm und erzeugt Assemblercode
  - Für Menschen verständlicher Maschinencode
- Assembler übersetz Assemblercode in Maschinencode
  - Maschinensprache bestehen aus 0 und 1



Fokus nun auf Maschinenebene & Assemblerprogrammierung!

Assemblerprogrammierung

Assemblersprache:

- Hardwarenahe Programmiersprache
- Wird von Assembler direkt in ausführbaren Maschinencode umgewandelt
- Alle Verarbeitungsmöglichkeiten des Mikrokontrollers werden genutzt
- Hardwarekomponenten können direkt angesteuert werden
- Erlauben Namen für Instruktionen, Speicherplätze, Sprungmarken, etc.
- I.d.R. effizient, geringer Speicherplatzbedarf
- Anwendung:
  - Gerätetreiber
  - Eingebettete Systeme
  - Echtzeitsysteme
  - Neue Hardware (Keine Bibliotheken vorhanden)
  - Programmierung von Mikroprozessoren (Bsp.: MIPS)

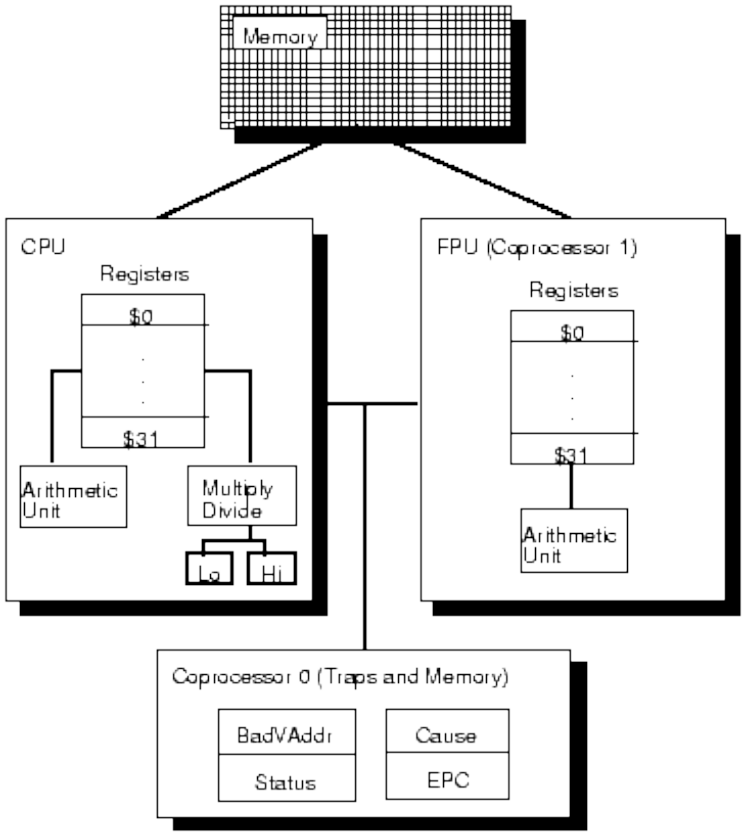
```
lw      $t0,($a0)
add     $t0, $t1,$t2
sw      $t0,($a0)
jr      $ra
```

Beispiel: Assemblercode

Struktur des MIPS Prozessors

MIPS R2000: RISC-Architektur

- Nicht alle Funktionen sind im Prozessor selbst realisiert, sondern in Coprozessoren ausgelagert.



MIPS-Register

- MIPS verfügt über 32 Register:
  - Jedes Register enthält ein 32-bit Wort (4 Byte)
  - Jedes Register kann für jeden Zweck verwendet werden (außer $zero)
- Spezialregister in Koprozessor 0 (hier nicht weiter relevant)
- Register haben Nummern, aber auch Namen
- Konvention für Registernutzung:

MIPS-Register (32 Bit breit)

Name	Nummer	Verwendung
$zero	0	Enthält den Wert 0, kann nicht verändert werden.
$at	1	temporäres Assemblerregister. (Nutzung durch Assembler)
$v0	2	Funktionsergebnisse 1 und 2 auch für Zwischenergebnisse
$v1	3	
$a0	4	Argumente 1 bis 4 für den Prozeduraufruf
$a1	5	
$a2	6	
$a3	7	
$t0,…,$t7	8-15	temporäre Variablen 1-8. Können von aufgerufenen Prozeduren verändert werden.

MIPS-Register 16-31

Name	Nummer	Verwendung
$s0,…, $s7	16 … 23	langlebige Variablen 1-8. Dürfen von aufgerufenen Prozeduren nicht verändert werden.
$t8,$t9	24,25	temporäre Variablen 9 und 10. Können von aufgerufenen Prozeduren verändert werden.
$k0,k1	26,27	Kernel-Register 1 und 2. Reserviert für Betriebssystem, wird bei Unterbrechungen verwendet.
$gp	28	Zeiger auf Datensegment (global pointer)
$sp	29	Stackpointer Zeigt auf das erste freie Element des Stacks.
$fp	30	Framepointer, Zeiger auf den Prozedurrahmen
$ra	31	Return Adresse

Load and Store Architektur

SPIM hat eine Load-Store Architektur

- Daten müssen erst aus dem Hauptspeicher in Register geladen werden (load), bevor sie verarbeitet werden können.

- Ergebnisse müssen aus Registern wieder in den Hauptspeicher geschrieben werden (store).

Es gibt **keine Befehle**, die **Daten direkt aus dem Hauptspeicher** verarbeiten.

Trennung von Programm und Daten

Grundprinzip (Von-Neumann):

- Gemeinsamer Speicher für Daten und Programme

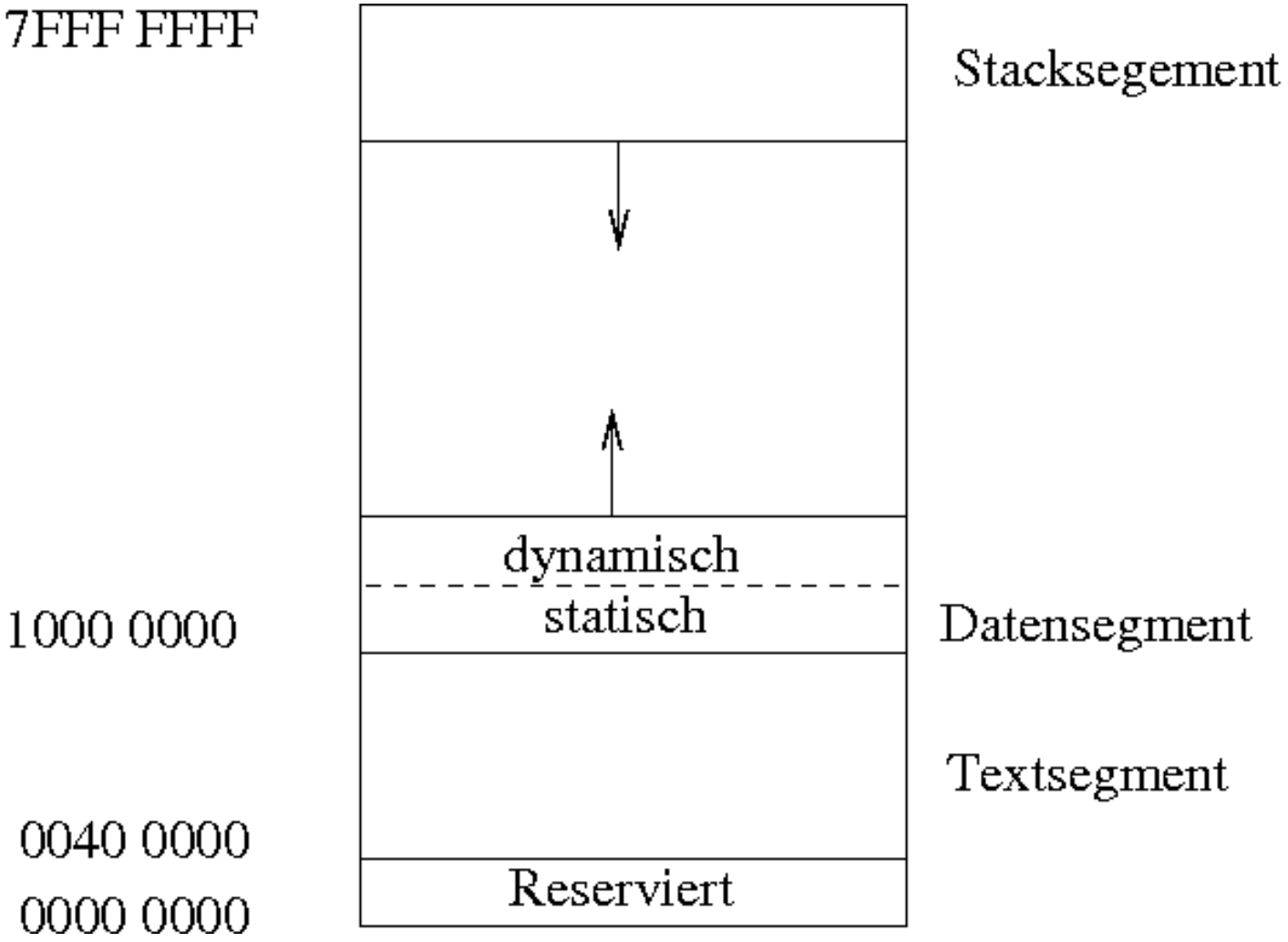
SPIM teilt den Hauptspeicher in **Segmente,** um Konflikte zu vermeiden:

- **Datensegment**
  - Speicherplatz für Programmdaten (Konstanten, Variablen, Zeichenketten, ...)
- **Textsegment**
  - Speicherplatz für das **Programm**.
- **Stacksegment**
  - Speicherplatz für den Stack.

Es gibt auch noch jeweils ein Text- und Datensegment für das Betriebssystem:

- Unterscheidung zwischen User- und Kernel- Text/Data Segement

Speicherlayout



Programmaufbau

Schreiben Sie ein Programm, das x+y berechnet. Die beiden Variablen sollen bereits im Datensegment initialisiert sein.

```
        .data  <-------------  Datensegment


        .text  <-------------  Textsegemnt
main:  <-------------  Marke, die vom SPIM
                       Betriebssystem angesprungen wird.
```

Programmaufbau

Schreiben Sie ein Programm, das den Umfang des Dreiecks mit den Kanten x, y, z berechnet!

Programmaufbau

Das Programm berechnet den Umfang des Dreiecks mit den Kanten x, y, z

```
        .data
x:      .word 12
y:      .word 14
z:      .word 5
U:      .word 0

        .text
main:   lw $t0, x       # $t0 := x
        lw $t1, y       # $t1 := y
        lw $t2, z       # $t2 := z
        add $t0, $t0, $t1 # $t0 := x+y
        add $t0, $t0, $t2 # $t0 := x+y+z
        sw $t0, U       # U := x+y+z
        li $v0, 10      # EXIT
        syscall
```

Datensegment

Textsegment

Kommentarzeichen

Erklärung

Direktiven:

- .data (.text):
  - Kennzeichnet den Start des Datensegments (Textsegments)
- .word:
  - sorgt für Reservierung von Speicherplatz
  - hier für die Variablen x,y,z,U. Jeweils ein Wort (32 Bit) wird reserviert.
  - Inhalt wird mit den Zahlen 12, 14, 5 und 0 initialisiert.

(Pseudo-) Befehle:

- **`lw $t0,x`** lädt den Inhalt von x in das Register $t0. (SPIM realisiert Load-Store Architektur)
- **`add $t0,$t0,$t1`** addiert den Inhalt von $t0 zu $t1 und speichert das Resultat wieder in $t0.
- **`sw $t0,U`** speichert den Inhalt von $t0 in den Speicherplatz, der U zugewiesen ist.
- **`li $v0,10`** und syscall halten das Programm an.

Ganzzahltypen

SPIM hat drei verschiedene Integertypen

Folgende Direktiven dienen zur Reservierung für den notwendigen Speicher

- .word (32 Bit Integer)
- .half (16 Bit Integer)
- .byte (8 Bit Integer)

Integer Daten anlegen

Mit der Direktive

`.word Wert1 Wert2` …

werden Folgen von 32-Bit Integern angelegt (z.B. nützlich zur Speicherung von Feldern...)

Beispiel:

```
x: .word 256 0x100
```

- reserviert im Speicher 2*32 Bit und schreibt in beide den Wert 256 hinein (0x… bedeutet hexadezimal).
- **`x`** ist eine *Marke*. Man kann damit auf den ersten Wert zugreifen.
- Mit **`x+4`** kann man auf den **zweiten** Wert zugreifen.

Ein weiteres Beispiel:

```
x: .word 10 20 30
y: .half 3 4
z: .byte 5 6 7
```

reserviert insgesamt 19 Bytes

- 12 Bytes mit den Zahlen 10, 20 und 30
  (zugreifbar über x, x+4 und x+8)
- 4 Bytes mit den Zahlen 3 und 4
  (zugreifbar über y und y+2)
- 3 Bytes mit den Zahlen 5,6 und 7
  (zugreifbar über z, z+1 und z+2)

Betriebssystemaufrufe: syscall

Jeder Prozessor arbeitet nur vernünftig in einem Betriebssystem (Unix, Linux, Windows usw.)

Betriebssystem darf privilegierte Operationen durchführen:

- E/A-Operationen
- ...

Kontrollierten Zugang zu den Funktionen des Betriebssystems notwendig.

Betriebssystemfunktionen werden durchnummeriert, und über spezielle Funktion **syscall** aufgerufen.

syscall kann vor der Ausführung einer Betriebssystemfunktion überprüfen, ob das Programm die Rechte dazu hat.

syscall in SPIM

Befehl **syscall** im SPIM erwartet die Nummer der auszuführenden Betriebssystemfunktion im Register **$v0**.

Um eine Betriebssystemfunktion aufzurufen, lädt man deren Nummer in **$v0** (z.B. **li $v0,4**) und ruft dann **syscall** auf (4 ist die Druckfunktion für Strings).

Betriebssystemfunktionen des SPIM

Laden: `li $v0,<Code>`

Ausführen: `syscall`

Funktion	Code	Argumente	Ergebnis
print_int	1	Wert in $a0 wird dezimal ausgegeben	
print_float	2	Wert in $f12 wird als 32-Bit-Gleitkommazahl	
print_double	3	Wert in $f12 und $f13 wird als 64-Bit-Gleitkommazahl ausgegeben	
print_string	4	Die mit Chr \0 terminierte Zeichenkette, die an der Stelle ($a0) beginnt, wird ausgegeben	
read_int	5		Die auf der Konsole dezimal eingegebene ganze Zahl in $v0

Weitere Betriebssystemfunktionen

Funktion	Code	Argumente	Ergebnis
read_float	6		Die auf der Konsole dezimal eingegebene 32-Bit-Gleitkommazahl in $f0
read_double	7		Die auf der Konsole dezimal eingegebene 64-Bit- Gleit-kommazahl in $f0/1
read_string	8	Adresse, ab der die Zeichenkette abgelegt werden soll in $a0, maximale Länge der Zeichenkette in $a1	Speicher von ($a0) bis ($a0)+$a1 wird mit der eingelesenen Zeichenkette belegt. Es wird "\n" mit eingelesen!
sbrk	9	Größe des Speicherbereichs in Bytes in $a0	Anfangsadresse eines freien Blocks der geforderten Größe in $v0
exit	10		

Zeichenketten


```
string1: .ascii  "Hallo Welt"
string2: .asciiz "Hallo Welt"
```

Die Direktiven .ascii und .asciiz reservieren beide 10 Bytes für die ASCII-Darstellung von "Hallo Welt".

.asciiz hängt zusätzlich noch ein Null-Byte \0 an (Ende der Zeichenkette) und verbraucht insgesamt 11 Bytes.

Die Zeichenketten sind über die Marken string1 bzw. string2 zugreifbar. (string1 greift auf ´H´ zu, string1+1 auf ´a´ usw.)

Zeichenketten

Schreiben Sie ein Programm, das „Servus Welt“ ausgibt.

Schreiben Sie ein Programm, das „Welt“ ausgibt.

Bonus:

- Schreiben Sie ein Programm, das einen String vom Benutzer einliest und ihn anschließend auf der Konsole ausgibt.

Sonderzeichen

Innerhalb eines Strings sind folgende Kombinationen erlaubt:

\n (neue Zeile)
\t (Sprung zum nächsten Tabulator)
\" Das doppelte Anführungszeichen.

Beispiel:

```
a: .ascii "ab\ncd\tef\"gh\""
```

könnte ausgedruckt so aussehen:

```
ab
cd    ef"gh"
```

(\ ist das sog. "escape Zeichen")

Datenausrichtung im Datensegment

4-Byte Integer könnte an den Adressen 0x3, 0x4,0x5,0x6 abgelegt werden (Adressierung geschieht byteweise).

Aber: Das ist *nicht ausgerichtet* (engl. aligned).

Ausgerichtete Speicherung wäre z.B. an den Adressen 0x0,0x1,0x2,0x3 oder 0x4,0x5,0x6,0x7.

Viele SPIM Befehle erwarten ausgerichtete Daten

- Anfangsadressen der Daten ist ein Vielfaches ihrer Länge.
- Die .word, .half und .byte Direktiven machen das automatisch richtig.

Beispiel:

```
x: .half 3
y: .word 55
```

würde nach dem x 2 Byte frei lassen, damit y ausgerichtet ist.

Befehlsübersicht

Befehl	Argumente	Wirkung
add	Rd, Rs1, Rs2	Rd := Rs1 + Rs2 (mit Überlauf)
sub	Rd, Rs1, Rs2	Rd := Rs1 - Rs2 (mit Überlauf)
addu	Rd, Rs1, Rs2	Rd := Rs1 + Rs2 (ohne Überlauf)
subu	Rd, Rs1, Rs2	Rd := Rs1 - Rs2 (ohne Überlauf)
addi	Rd, Rs1, Imm	Rd := Rs1 + Imm
addiu	Rd, Rs1, Imm	Rd := Rs1 + Imm (ohne Überlauf)
div	Rd, Rs1, Rs2	Rd := Rs1 DIV Rs2
rem	Rd, Rs1, Rs2	Rd := Rs1 MOD Rs2
mul	Rd, Rs1, Rs2	Rd := Rs1 × Rs2
b	label	unbedingter Sprung nach label
j	label	unbedingter Sprung nach label
jal	label	unbed.Sprung nach label, Adresse des nächsten Befehls in $ra
jr	Rs	unbedingter Sprung an die Adresse in Rs
beq	Rs1, Rs2, label	Sprung, falls Rs1 = Rs2
beqz	Rs, label	Sprung, falls Rs = 0
bne	Rs1, Rs2, label	Sprung, falls Rs1 ≠ Rs2
bnez	Rs1, label	Sprung, falls Rs1 ≠ 0
bge	Rs1, Rs2, label	Sprung, falls Rs1 ≥ Rs2
bgeu	Rs1, Rs2, label	Sprung, falls Rs1 ≥ Rs2
bgez	Rs, label	Sprung, falls Rs ≥ 0
bgt	Rs1, Rs2, label	Sprung, falls Rs1 > Rs2
bgtu	Rs1, Rs2, label	Sprung, falls Rs1 > Rs2
bgtz	Rs, label	Sprung, falls Rs > 0
ble	Rs1, Rs2, label	Sprung, falls Rs1 ≤ Rs2
bleu	Rs1, Rs2, label	Sprung, falls Rs1 ≤ Rs2
blez	Rs, label	Sprung, falls Rs ≤ 0
blt	Rs1, Rs2, label	Sprung, falls Rs1 < Rs2
bltu	Rs1, Rs2, label	Sprung, falls Rs1 < Rs2
bltz	Rs, label	Sprung, falls Rs < 0
not	Rd, Rs1	Rd := ¬ Rs1 (bitweise Negation)
and	Rd, Rs1, Rs2	Rd := Rs1 & Rs2 (bitweises UND)
or	Rd, Rs1, Rs2	Rd := Rs1 | Rs2 (bitweises ODER)
xori	Rd, Rs1, Imm	Rd := Rs1 ↮ Imm (bitweises XOR)
syscall		führt Systemfunktion aus
move	Rd, Rs	Rd := Rs
la	Rd, label	Adresse des Labels wird in Rd geladen
lb	Rd, Adr	Rd := MEM[Adr]
lw	Rd, Adr	Rd := MEM[Adr]
li	Rd, Imm	Rd := Imm
sw	Rs, Adr	MEM[Adr] := Rs (Speichere ein Wort)
sh	Rs, Adr	MEM[Adr] MOD 2^{16} := Rs (Speichere ein Halbwort)
sb	Rs, Adr	MEM[Adr] MOD 256 := Rs (Speichere ein Byte)

Funktion	Code in $v0	Funktion	Code in $v0
print_int	1	read_float	6
print_float	2	read_double	7
print_double	3	read_string	8
print_string	4	sbrk	9
read_int	5	exit	10

Aufbau einer Assembler-Befehlszeile


```
<Marke>: <Befehl> <Arg 1> <Arg 2> <Arg 3> #<Kommentar>
```

Oder mit Kommas

```
<Marke>: <Befehl> <Arg 1>,<Arg 2>,<Arg 3> #<Kommentar>
```

In der Regel 1 – 3 Argumente:

- Fast alle arithm. Befehle 3: 1 Ziel + 2 Quellen
- Befehle für Datenübertragung zw. Prozessor und HS: 2 Arg
- Treten i*n folgender Reihenfolge auf:*

  1.) Register des Hauptprozessors, zuerst das Zielregister,

  2.) Register des Coprozessors,

  3.) Adressen, Werte oder Marken

Ladebefehl und Adressierung

Befehl	Argumente	Wirkung	Erläuterung
lw	Rd, Adr	RD=MEM[Adr]	Load word

`lw` lädt die Daten aus der angegeben Adresse **`Adr`** in das Zielregister **`Rd`**.

`Adr` kann auf verschiedene Weise angegeben werden:

- **`(Rs)`**: Der Wert steht im Hauptspeicher an der Adresse, die im Register **`Rs`** steht (Register-indirekt)
- **`label`** oder **`label+Konstante`**: Der Wert steht im Hauptspeicher an der Stelle, die für **`label`** reserviert wurde, bzw. nachdem Konstante dazu addiert wurde (direkt).
- **`label(Rs)`** oder **`label+Konstante(Rs)`**: Der Wert steht im Hauptspeicher an der Stelle, die für **`label`** reserviert wurde **`+ Konstante + Inhalt`** von Register **`Rs`** (indexiert).

Ladebefehl und Adressierung

Befehl	Argumente	Wirkung	Erläuterung
la	Rd, Label	RD=Adr(Label)	Load address

`la` lädt die **Adresse** auf die das Label **label** zeigt in das Zielregister Rd.

Zum Vergleich: **`lw`** lädt die **Daten** aus der angegeben Adresse **`Adr`** in das Zielregister **`Rd`**.

Aufgabe

Welcher Wert steht jeweils im Register?

```
.data

x: .word 3 4 5 6 7 8 9 10
word_length: .byte 4

.text
main:

   lw $t0, x

   lw $t1, x+12

   la $t2, word_length

   lw $t3, ($t2)

   lw $t4, x+12($t3)

   la $t5, x

   lw $t6, 20($t5)

   li $v0, 10
   syscall
```

3 (direkt)
6 (direkt)
Adr[label] direkt
4 (indirekt)
7 (indexiert)
Adr[label] direkt
8 (indexiert)
10 (transfer)

Weitere Ladebefehle

`lb` und **`lh`** müssen aus 8 bzw. 16 Bit ein 32 Bit Integer machen.

Bei negativer Zahl muss mit 1en aufgefüllt werden!

`lbu` und **`lhu`** füllen **immer** mit 0en auf.

Befehl	Argumente	Wirkung	Erläuterung
lb	Rd,Adr	RD=MEM[Adr]	Load byte
lbu	Rd,Adr	RD=MEM[Adr]	Load unsigned byte
lh	Rd,Adr	RD=MEM[Adr]	Load halfword
lhu	Rd,Adr	RD=MEM[Adr]	Load unsigned halfword
ld	Rd,Adr	Lädt das Doppelword an der Stelle Adr in die Register Rd und Rd+1	Load double word

Speicherbefehle

speichern Registerinhalte zurück in den Hauptspeicher.

Befehl	Argumente	Wirkung	Erläuterung
sw	Rs,Adr	MEM[Adr]:=Rs	store word
sb	Rs,Adr	MEM[Adr]:=Rs MOD 256	store byte (die letzten 8 Bit)
sh	Rs,Adr	MEM[Adr]:=Rs MOD 2^{16}	store halfword(die letzten 16 Bit)
sd	Rs,Adr	sw Rs,Adr sw Rd+1,Adr+4	Store double word

Register-Transfer Befehle

move: Kopieren zwischen Registern.

li: Direktes laden des Wertes in ein Register

lui: Lädt den Wert in die oberen 16 Bits des Registers (und macht die unteren 16 Bits zu 0).

Befehl	Argumente	Wirkung	Erläuterung
move	Rd,Rs	Rd :=Rs	move
li	Rd, Imm	Rd := Imm	load immediate
lui	Rd,Imm	Rd := Imm * 2^{16}	Load upper immediate

Addition und Subtraktion

Ein Überlauf (Overflow) bewirkt den Aufruf eines Exception Handlers (ähnlich catch in Java).

Es gibt auch arithmetische Befehle, die Überläufe ignorieren.

Weitere arithmetische Befehle:

- **div, mult** (in Versionen mit und ohne overflow, sowie mit und ohne Vorzeichen)
- **neg** (Zahl negieren), **abs** (Absolutbetrag), **rem** (Rest)

Befehl	Argumente	Wirkung	Erläuterung
add	Rd,Rs1,Rs2	Rd := Rs1+Rs2	addition (mit overflow)
addi	Rd,Rs1,Imm	Rd := Rs1+Imm	addition immediate (mit overflow)
sub	Rd,Rs1,Rs2	Rd := Rs1-Rs2	subtract(mit overflow)

Aufgabe

Erstellen Sie ein vollständiges SPIM-Programm, das die Fläche eines Rechtecks berechnet:

- Es werden 2 positive Integer-Zahlen für die beiden Seitenlängen des Rechtecks von der Konsole eingelesen
- Es wird die Fläche berechnet
- Das Ergebnis wird auf der Konsole ausgegeben
- Sowohl die Eingabe als auch die Ausgabe soll mit einem Anweisungstext versehen werden

Aufgabe

Geben Sie eine Sequenz von MIPS-Instruktionen für eine neue Anweisung „swap“ an, die die Werte der beiden Register $s0 und s1 vertauscht.

Sie dürfen dazu genau ein weiteres Register (z.B $t0) verwenden.

Literatur

Deutschsprachiges SPIM-Tutorial von Reinhard Nitzsche (97) zu finden unter:

http://www.mobile.ifi.lmu.de/wp-content/uploads/lehrveranstaltungen/rechnerarchitektur-sose16/spim_tutorial_de.pdf