

Rechnerstrukturen, Teil 2

Peter Marwedel

Informatik 12

Otto-Hahn-Str. 16

Tel. 755 6111

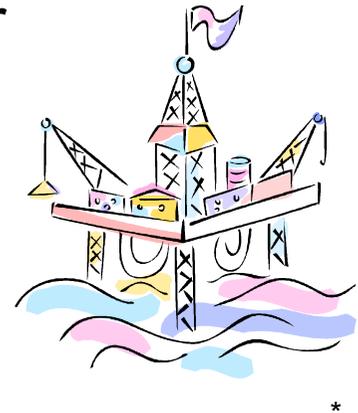
E-mail: peter.marwedel@tu-dortmund.de

Sprechstunde: Mo 13:00-14:00

2010/09/01

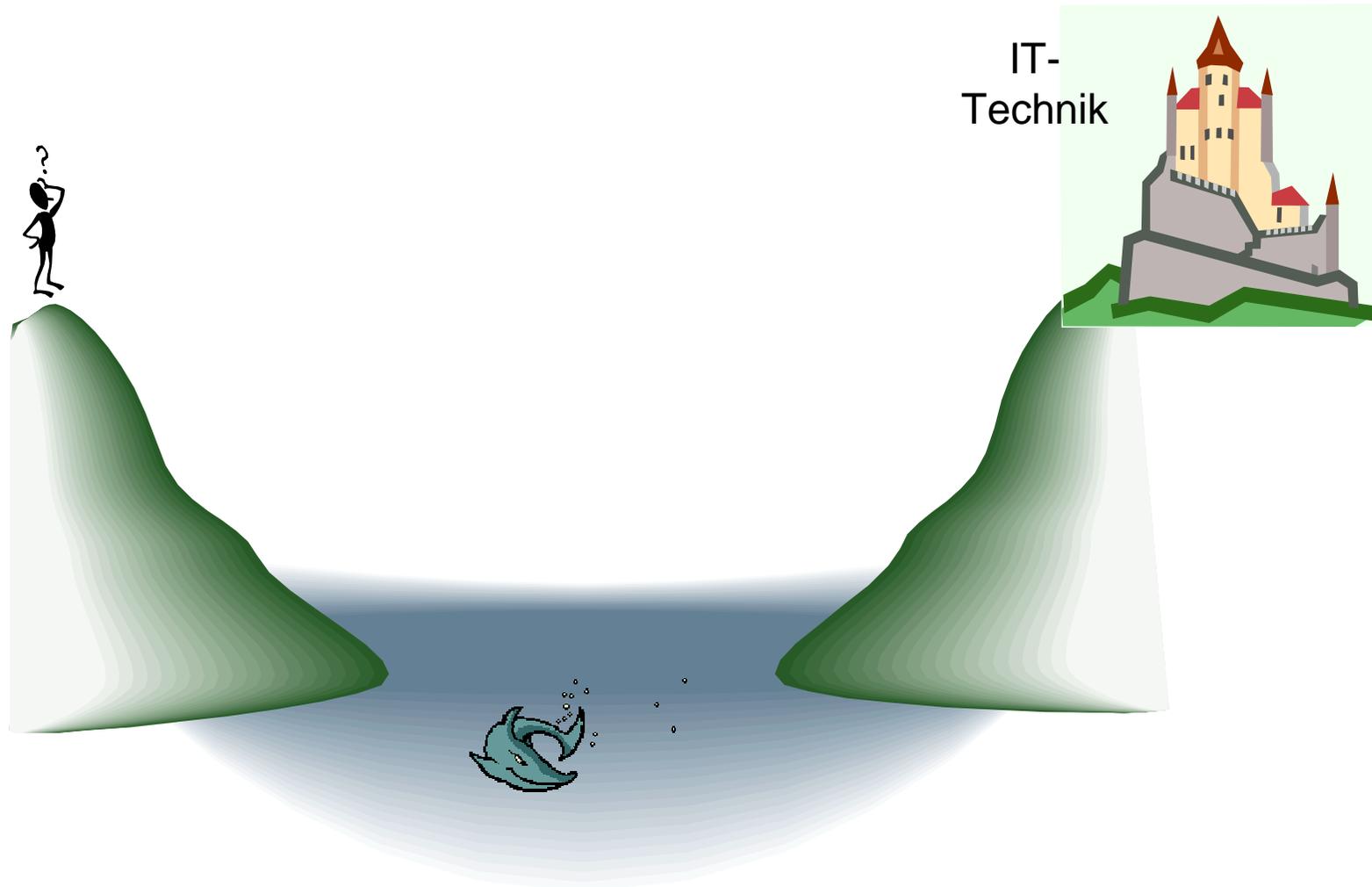
Motivation

- Jede Ausführung von Programmen bedarf einer zur Ausführung fähigen Hardware.
- Wir nennen diese auch ***execution platforms***.
- *Platform-based design* ist ein Ansatz für viele Anwendungen (Handys, Autos, ...)
- Plattformen sind nicht immer ideal (z.B. führen Anwendungen nicht in 0 Zeit mit 0 Energie aus)
- Grundlegendes Verständnis für nicht-ideales Verhalten ist wichtig
- Deshalb Beschäftigung in dieser Vorlesung mit *execution platforms*.

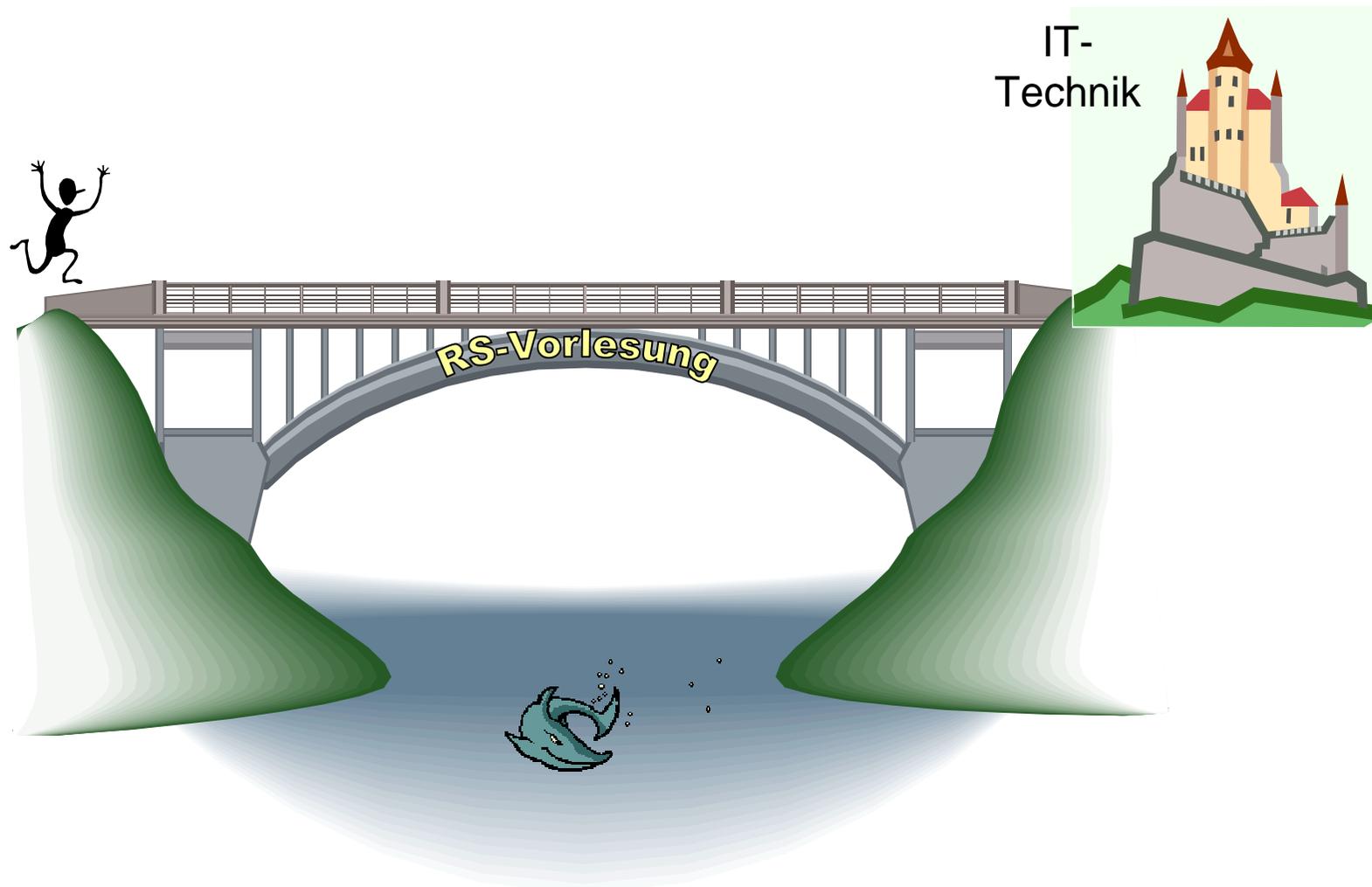


* Bei Graphiken ohne Quellenangabe handelt es sich um ClipArts der Fa. Microsoft, deren Nutzungseinschränkungen einzuhalten sind.

Problematische Situationen ...



... und Techniken zu deren Vermeidung



Thema des zweiten Teils der Vorlesung

Ziel: Verständnis der Arbeitsweise von Rechnern, einschl.

- der Programmierung von Rechnern
- des Prozessors
- der Speicherorganisation
- des Anschlusses von Plattenlaufwerken u.a. Peripherie
- Anwendungen bei Eingebetteten Systemen



Stil des zweiten Teils der Vorlesung

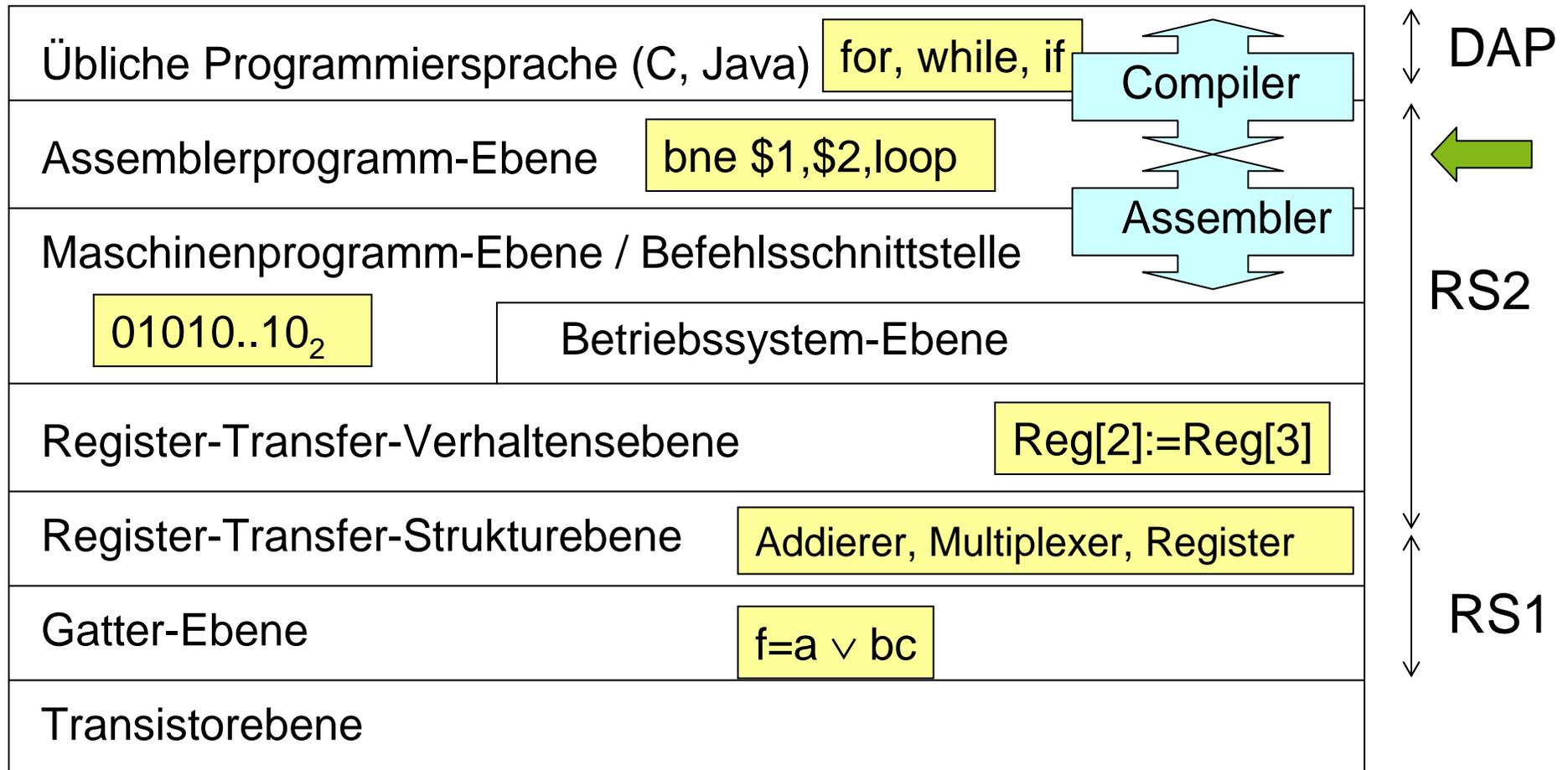
Stil:

- Betonung des Skripts
- Integration mit praktischen Übungen
Einsatz eines Simulators 
- Buch von Hennessy/Patterson: *Computer Organization: The hardware/software interface*, Morgan Kaufman, 2. Aufl. (siehe Lehrbuchsammlung) oder 3. Aufl. als grobe Leitlinie
- Soviel Interaktion, wie möglich 



Rechnerarchitektur - Einleitung -

Abstraktionsebenen:



2.2 Die Befehlsschnittstelle

2.2.1 Der MIPS-Befehlssatz



Beispiel: MIPS (*~ machine with no interlocked pipe stages*)

≠ MIPS (*million operations per second*)

Entwurf Anfang der 80er Jahre

Warum MIPS ?

- Weitgehend sauberer und klarer Befehlssatz
- Kein historischer Ballast
- Basis der richtungsweisenden Bücher von Hennessy/Patterson
- Simulator verfügbar
- MIPS außerhalb von PCs (bei Druckern, Routern, Handys) weit verbreitet

Begriffe

Assemblerprogramm-Ebene

Maschinenprogramm-Ebene / Befehlsschnittstelle

- **MIPS-Befehle** sind elementare Anweisungen an die MIPS-Maschine
- Ein **MIPS-Maschinenprogramm** ist eine konkrete Folge von MIPS-Befehlen
- Die **MIPS-Maschinsprache** ist die Menge möglicher MIPS-Maschinenprogramme
- Entsprechendes gilt für die Assemblerprogramm-Ebene
- Vielfach keine Unterscheidung zwischen beiden Ebenen

MIPS-Assembler-Befehle

Arithmetische und Transportbefehle

Erstes Beispiel: Addition:

Allgemeines Format:

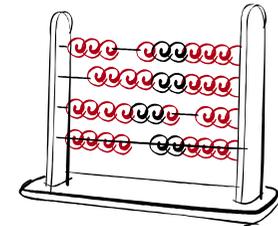
`add a,b,c` mit $a,b,c \in \$0..\31

$\$0..\31 stehen für 32 Bit lange Register,

`a` ist das Zielregister,

Beispiel:

`add $3,$2,$1`



Funktion des Additionsbefehls

Beispiel: `add $3,$2,$1`

Register („Reg“)

\$0	"0...0"
\$1	5
\$2	6
\$3	11
..	
\$31	

\$0 ist ständig = 0

`add $3,$2,$1`



Simulation des MIPS-Befehlssatzes mit MARS

**Simulator MARS: www.cs.missouristate.edu/MARS/
(erfordert Java),**

Warum Simulation statt Ausführung des Intel-Befehlssatzes?

- Möglichkeit der Benutzung des MIPS-Befehlssatzes
- Keine Gefährdung des laufenden Systems
- Bessere Interaktionsmöglichkeiten
- MARS läuft auf verschiedenen Plattformen: Windows XP, Vista, MAC OS X, Linux
- Installation jetzt dringend empfohlen, für Studierende ohne PC-Zugang Nutzung an Fachbereichsrechnern möglich.
- Schreiben Sie eigene kleine Programme!
- Üblicherweise beziehen sich mindestens 2 von 4 Klausuraufgaben auf die MIPS-Programmierung.

Älterer Simulator: SPIM

- „2. MARS-Semester“
- MARS versucht, SPIM-Obermenge zu implementieren
- Bekannte Ausnahmen:
 - .set-Anweisung
 - *Delayed branches*
 - Kein Standard-*trap handler* in MARS
 - Keine Extra-Befehlsliste verfügbar
 - Vergrößerung des Bildschirm-Fonts?
 - Programm-Ende mittels exit-SVCs statt mit `jr $31`
 - Andere Realisierung großer Konstanten
- (SPIM-) Befehlsliste befindet sich im Anhang des Skripts.

Semantik: per Register-Transfer-Notation

(genauer: Register-Transfer-Verhaltens-Notation)

Argumente oder Ziele: Register oder Speicher, z.B.

Reg[3]; PC; Reg[31]

Zuweisungen: mittels **:=**, z.B.

PC := Reg[31]

Konstante Bitvektoren: Einschluss in **"**, z.B:

"01010100011"

Selektion von einzelnen Bits: Punkt + runde Klammern:

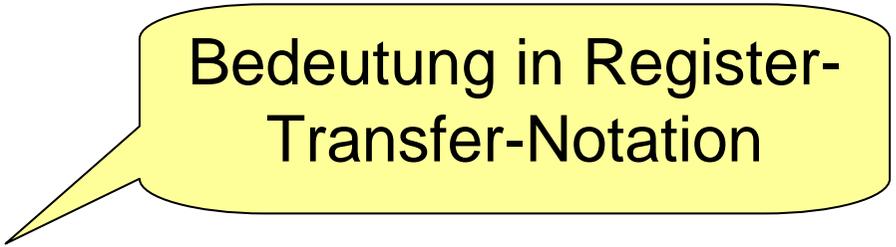
PC.(15:0)

Konkatenation (Aneinanderreihung) mit **&**, z.B.

(Hi & Lo);

PC := PC.(31:28) & I.(25:0) & "00"

Semantik des Additionsbefehls



Bedeutung in Register-
Transfer-Notation

Beispiel:

```
add $3,$2,$1      # Reg[3] := Reg[2]+Reg[1]
```

leitet in der Assemblernotation einen Kommentar ein.

Register speichern (Teils des) aktuellen Zustands;
add-Befehl veranlasst Zustandstransformation.

Addition für 2k-Zahlen oder für vorzeichenlose Zahlen? (1)

Muss der `add`-Befehl „linkestes“ Bit als Vorzeichen betrachten?

Nein, bei 2k-Zahlen und bei vorzeichenlosen Zahlen („Betragzahlen“) kann jede Stelle des Ergebnisses gemäß der Gleichungen für Volladdierer bestimmt werden, unabhängig davon, ob die Bitfolgen als 2k-Zahlen oder als Betragzahlen zu interpretieren sind (siehe RS, Teil 1).

- ☞ es reicht ein Additionsbefehl zur Erzeugung der Ergebnis-Bitvektoren für beide Datentypen aus.
Allerdings Unterschiede hinsichtlich der Behandlung von Bereichsüberschreitungen.

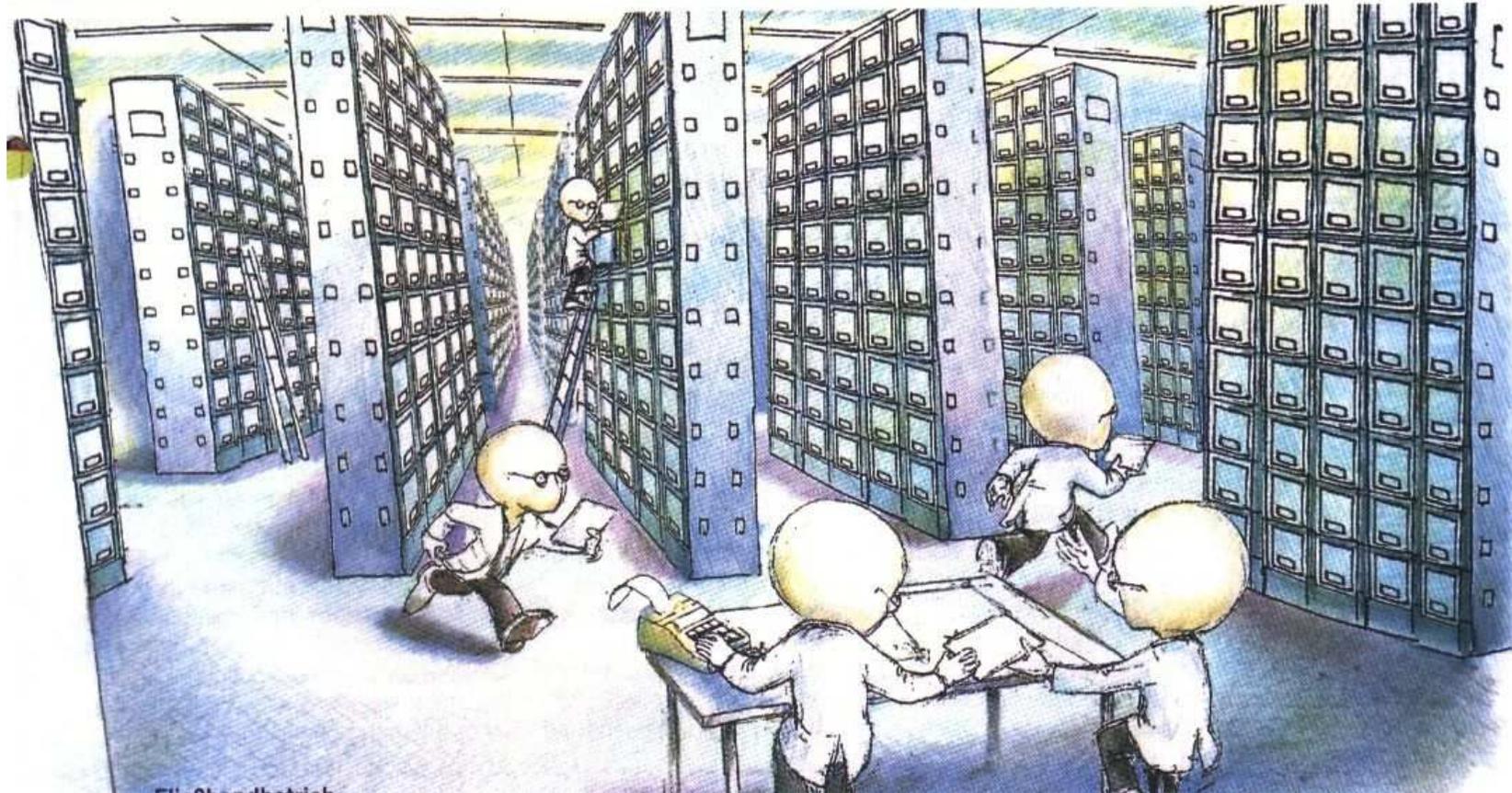
Addition für 2k-Zahlen oder für vorzeichenlose Zahlen? (2)

MIPS-Architektur bietet `addu`-Befehl für *unsigned integers*:

- `add`-Befehl signalisiert Bereichsüberschreitungen (für vorzeichenbehaftete Zahlen),
- `addu`-Befehl ignoriert diese (kein Signalisieren von Bereichsüberschreitungen vorzeichenloser Zahlen).

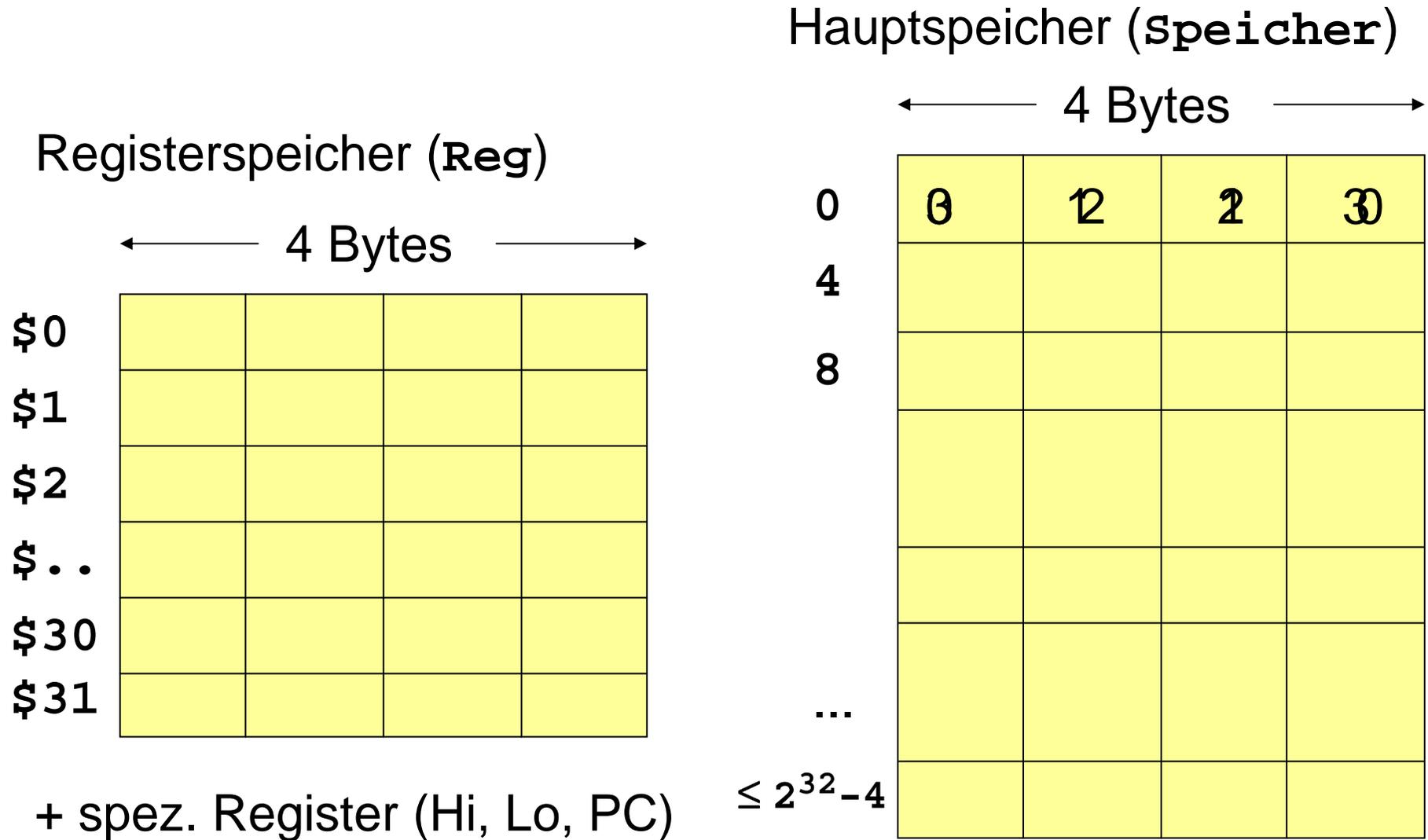
Wir werden die *unsigned* Varianten von `add/sub`-Befehlen wenig betrachten.

Das Speichermodell



© Bode, TUM

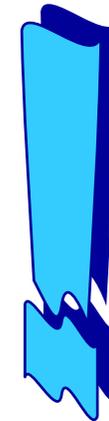
Das Speichermodell der MIPS-Architektur



Eigenschaften des Von-Neumann-Rechners (1)

Wesentliche Merkmale der heute üblichen Rechner, die auf dem Prinzip des Von-Neumann-Rechners basieren:

1. Einteilung des Speichers in Zellen gleicher Größe, die über **Adressen** angesprochen werden können.



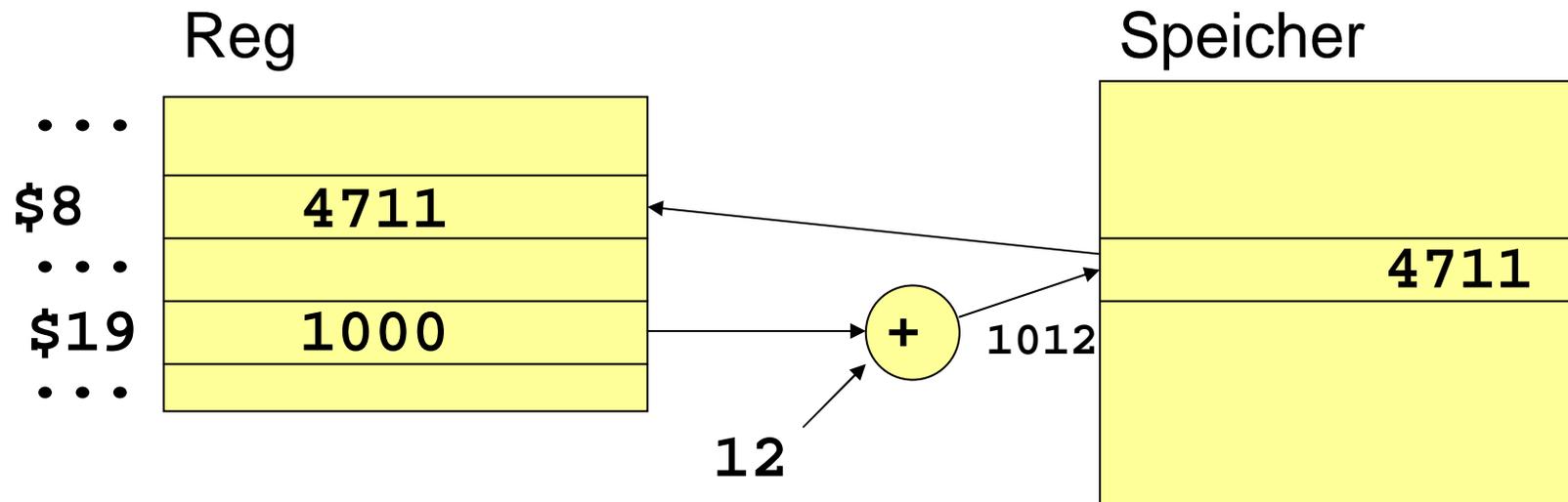
Der load word-Befehl

Allgemeine Form:

`lw ziel, offset(reg)` mit `ziel, reg` \in $\$0..\31 ,
`offset`: Konstante $\in -2^{15} .. 2^{15}-1$, deren Wert beim Laden
des Programms bekannt sein muss bzw. deren Bezeichner.
Beispiel:



`lw $8, 12($19)# Reg[8]:=Speicher[12+Reg[19]]`



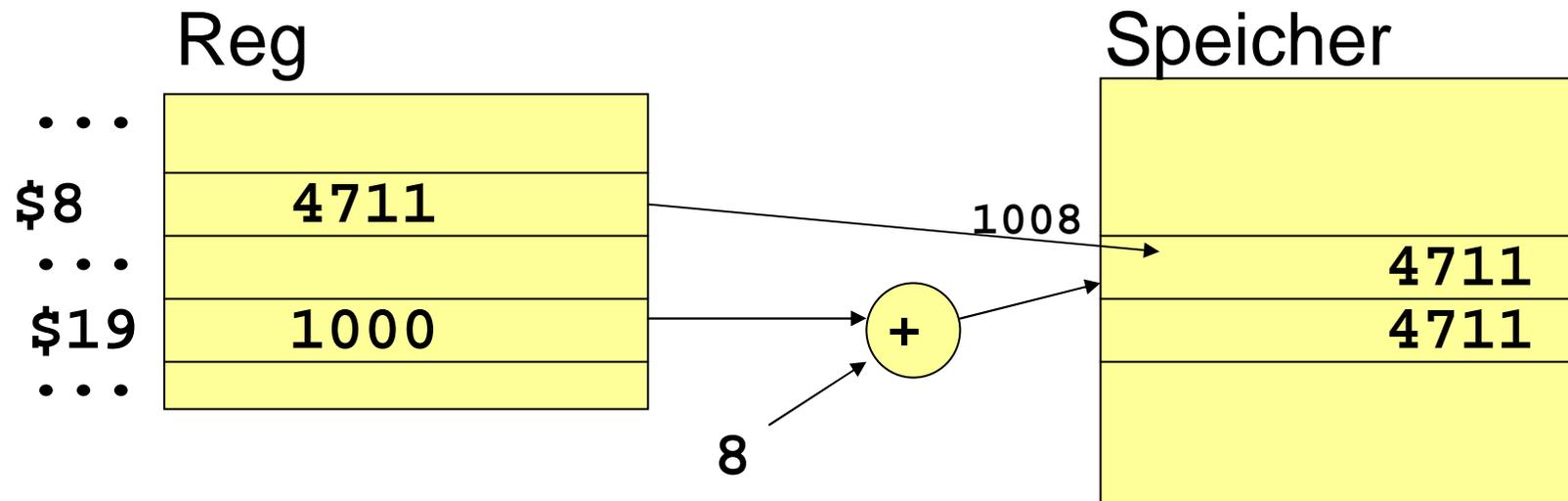
Der store word-Befehl

Allgemeine Form:

`sw quel, offset(reg)` mit $quel, reg \in \$0..\31 ,
`offset`: Konstante $\in -2^{15} .. 2^{15}-1$, deren Wert beim Laden des
Programms bekannt sein muss bzw. deren Bezeichner.

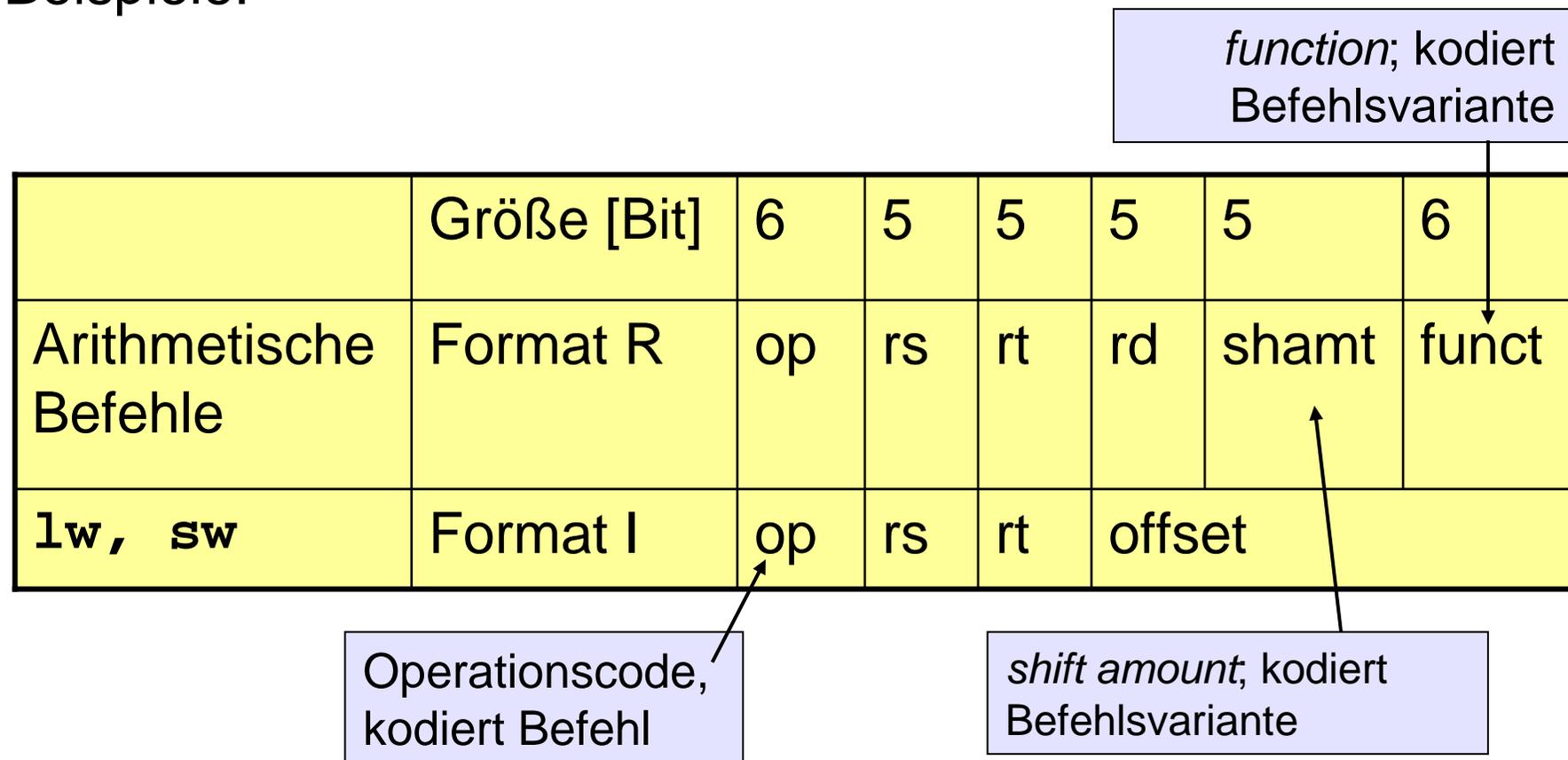
Beispiel:

`sw $8, 8($19) # Speicher[8+Reg[19]] := Reg[8]`



Darstellung von Befehlen im Rechner

Zergliederung eines Befehlswortes in **Befehlsfelder**;
Jede benutzte Zergliederung heißt **Befehlsformat**;
Beispiele:



Beispiele

`add rd,rs,rt` # (Format R)

Bits: 6 5 5 5 5 6

0	rs,	rt,	rd,	0,	32
---	-----	-----	-----	----	----

2. `lw rt,offset(rs)` # (Format I)

Bits: 6 5 5 16

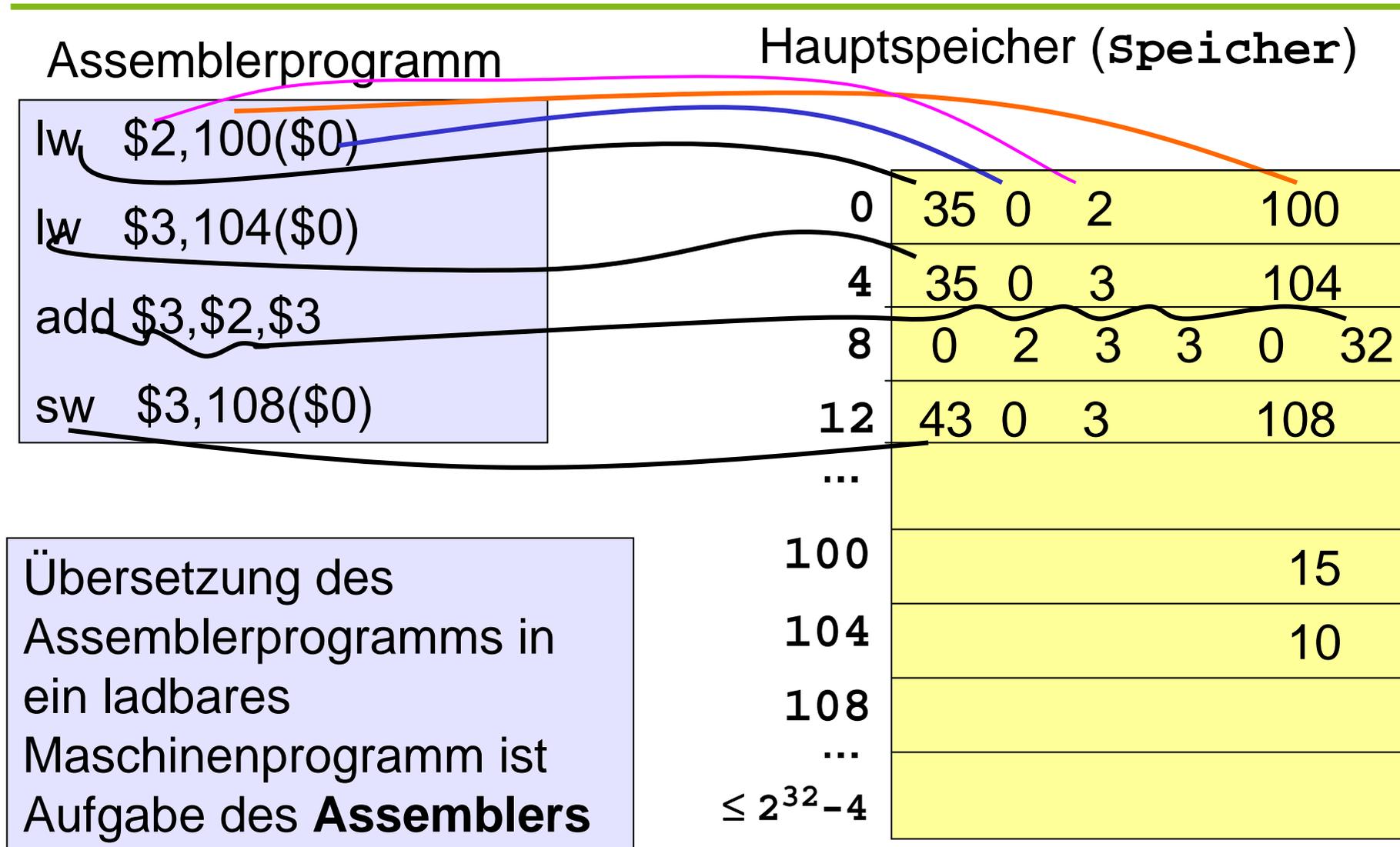
35	rs,	rt,	offset
----	-----	-----	--------

3. `sw rt,offset(rs)` # (Format I)

Bits: 6 5 5 16

43	rs,	rt,	offset
----	-----	-----	--------

Speicherung von Befehlen im Rechner

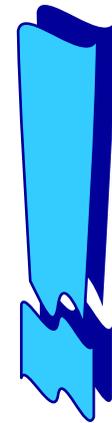


Übersetzung des Assemblerprogramms in ein ladbares Maschinenprogramm ist Aufgabe des **Assemblers**

Eigenschaften des Von-Neumann-Rechners (2)

Wesentliche Merkmale der heute üblichen Rechner, die auf dem Prinzip des Von-Neumann-Rechners basieren:

2. Verwendung von speicherprogrammierbaren Programmen.
3. Speicherung von Programmen und Daten in demselben Speicher.

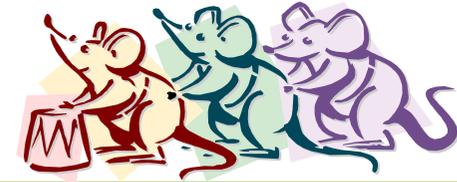


Zusammenfassung



- Schichtenmodell
 - Programmiersprache
 - Assemblerprogramme
 - Maschinenprogramme
 - RT-Strukturen
 - Gatter
- Unterscheidung zw. Programmen, Sprachen, Befehlen
- Exemplarische Betrachtung der MIPS-Assembler- & Maschinensprache  MARS
 - add, lw-, sw-Befehle; RT-Semantik; Unterscheidung add/addu
 - Speichermodell
 - Darstellung von Befehlen
- Prinzipien der von Neumann-Maschine

Abarbeitung: immer der Reihe nach



Reg

\$0	
\$1	
\$2	15
\$3	25
..	0

Hauptspeicher (Speicher)

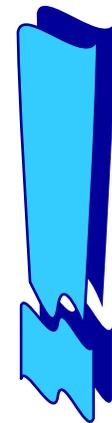
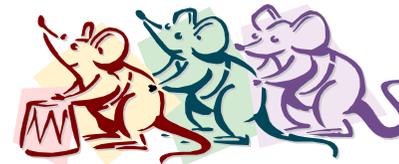
→ 0	35	0	2	100		
→ 4	35	0	3	104		
→ 8	0	2	3	3	0	32
→ 12	43	0	3	108		
...						
100				15		
104				10		
108				25		
...						
$\leq 2^{32}-4$						

Der Zeiger auf den gerade ausgeführten Befehl wird im Programmzähler PC (*program counter*) gespeichert

Eigenschaften des Von-Neumann-Rechners (3)

Wesentliche Merkmale der heute üblichen Rechner, die auf dem Prinzip des Von-Neumann-Rechners basieren:

4. Die sequentielle Abarbeitung von Befehlen.
5. Es gehört zur Semantik eines jeden Befehls (Ausnahme: Sprungbefehle, s.u.), dass zusätzlich zu den erwähnten Änderungen der Speicherinhalte noch der Programmzähler PC erhöht wird, im Fall der MIPS-Maschine jeweils um 4.



2.2.1 Der MIPS-Befehlssatz

2.2.1.1 Arithmetische und Transportbefehle

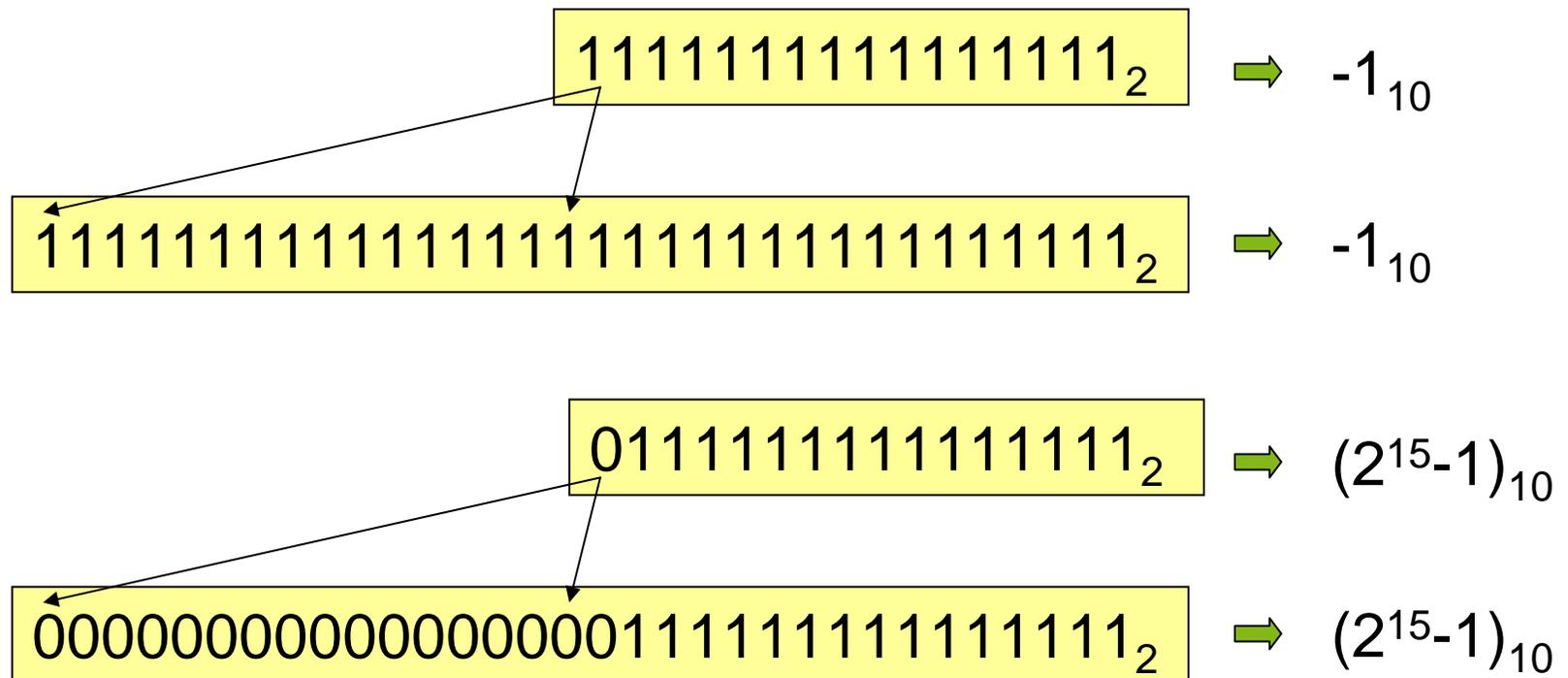
Darstellung von Befehlen im Rechner (Wdh.)

	Größe [Bit]	6	5	5	5	5	6
Arithmetische Befehle	Format R	op	rs	rt	rd	shamt	funct
lw, sw	Format I	op	rs	rt	offset		

Problem: Passt nicht zur Länge der Register

Nutzung des 16-Bit-Offsets in der 32-Bit Arithmetik

Replizierung des Vorzeichenbits liefert 32-Bit 2k-Zahl:



sign_ext(a, m) : Function, die Bitvektor a auf m Bits erweitert

Beweis der Korrektheit von `sign_ext`

Bitvektor $a=(a_{n-1}, \dots, a_0)$ repräsentiert bei 2^k -Kodierung Zahl

$$\text{int}(a) = -a_{n-1}2^{n-1} + \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i$$

- Sei nun $a_{n-1}='0'$. Dann ist

$$\text{int}(\text{sign_ext}(a,m)) = \text{int}(\underbrace{"00..0"}_{m-n+1} \& (a_{n-2}, \dots, a_0)) = \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i = \text{int}(a)$$

- Sei nun $a_{n-1}='1'$. Dann ist

$$\text{int}(\text{sign_ext}(a,m)) = \text{int}(\underbrace{"11..1"}_{m-n+1} \& (a_{n-2}, \dots, a_0)) = -2^{m-1} + \sum_{i=n-1}^{m-2} 2^i + \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i$$

Wegen $\sum_{i=n-1}^{m-2} 2^i + 2^{n-1} = 2^{m-1}$ folgt $2^{m-1} - \sum_{i=n-1}^{m-2} 2^i = 2^{n-1}$, also auch

$$\text{int}(\text{sign_ext}(a,m)) = -2^{n-1} + \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i = \text{int}(a) \quad \text{q.e.d.}$$

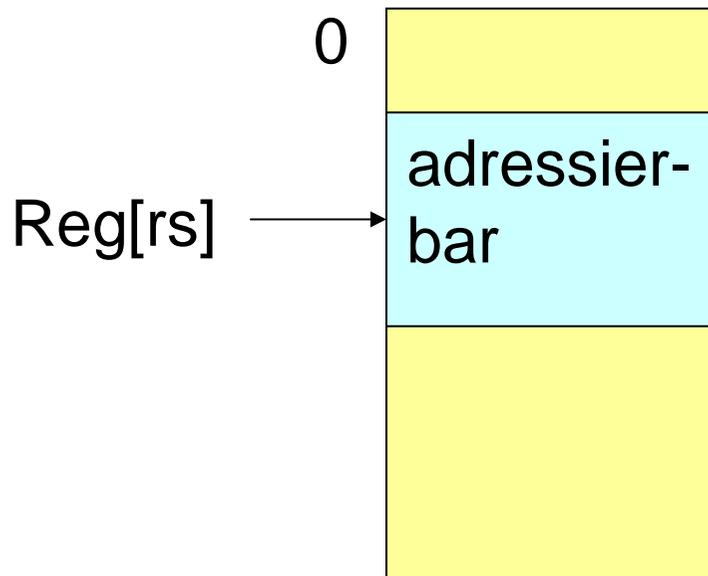
Auswirkung der Nutzung von `sign_ext` bei der Adressierung

Präzisere Beschreibung der Bedeutung des `sw`-Befehls:

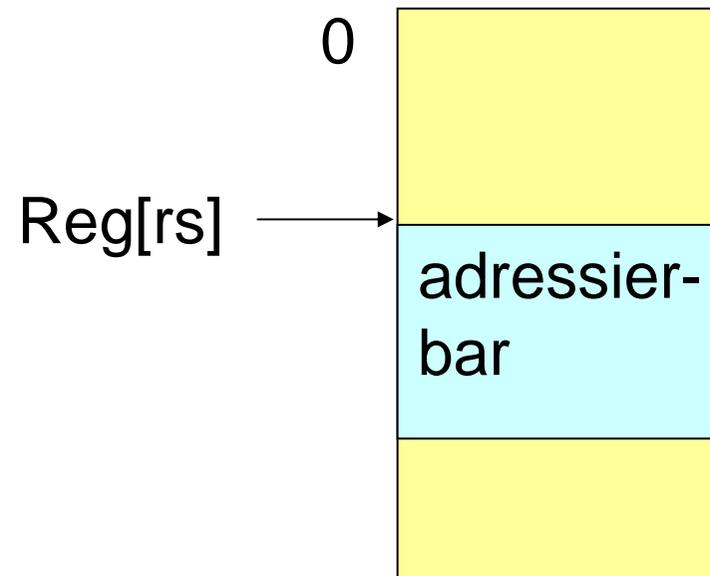
```
sw rt, offset(rs) #
```

```
Speicher[Reg[rs]+sign_ext(offset,32)] := Reg[rt]
```

mit Vorzeichenweiterung



mit *zero-extend* (00000 & ...)

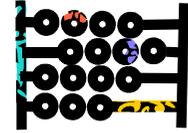


Einsatz der Vorzeichenerweiterung bei Direktoperanden (*immediate addressing*)

- Beschreibung der Bedeutung des *add immediate*-Befehls*
`addi rt, rs, const #` benutzt Format I
`# Reg[rt] := Reg[rs] + sign_ext(const, 32)`
- *add immediate unsigned*-Befehl
`addiu rt, rs, const #` benutzt Format I
Wie `addi` ohne Erzeugung von Überläufen (!)

* Der MIPS-Assembler erzeugt vielfach automatisch *immediate*-Befehle, wenn statt eines Registers direkt eine Konstante angegeben ist, z.B. bei `add $3,$2,3`

Subtraktionsbefehle



`sub $4,$3,$2 # Reg[4]:= Reg[3]-Reg[2]`

Subtraktion, Ausnahmen möglich

`subu $4,$3,$2 # Reg[4]:= Reg[3]-Reg[2]`

Subtraktion, keine Ausnahmen signalisiert

Format: R

Multiplikationsbefehle

Die Multiplikation liefert doppelt lange Ergebnisse.

Beispiel: $-2^{31} \times -2^{31} = 2^{62}$;

2^{62} benötigt zu Darstellung einen 64-Bit-Vektor.

Wo soll man ein solches Ergebnis abspeichern?

MIPS-Lösung: 2 spezielle Register **Hi** und **Lo**:

```
mult $2,$3 # Hi & Lo := Reg[2] * Reg[3]
```

Höherwertiger Teil
des Ergebnisses

Niederwertiger Teil
des Ergebnisses

Konkatenation (Aneinanderreihung)

Transport in allgemeine Register:

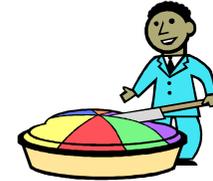
```
mfhi, $3 # Reg[3] := Hi
```

```
mflo, $3 # Reg[3] := Lo
```

Varianten des Multiplikationsbefehls

- `mult $2,$3 # Hi&Lo:=Reg[2]*Reg[3];`
für ganze Zahlen in 2k-Darstellung
- `multu $2,$3 # Hi&Lo:=Reg[2]*u Reg[3];`
für natürliche Zahlen (*unsigned int*)
- `mul $4,$3,$2 # Besteht aus mult und mfl0`
`# Hi&Lo:=Reg[3]*Reg[2]; Reg[4]:=Lo;`
für 2k-Zahlen, niederwertiger Teil im allgem. Reg.
- `mul0 $4,$3,$2 #`
`# Hi&Lo:=Reg[3]* Reg[2]; Reg[4]:=Lo;`
für 2k-Zahlen, niederwertiger Teil im allg. Reg, Überlauf-Test.
- `mulou $4,$3,$2 #`
`# Hi&Lo:=Reg[3]*u Reg[2]; Reg[4]:=Lo;`
für *unsigned integers*, im allg. Reg., Überlauf-Test

Divisionsbefehle



Problem: man möchte gern sowohl den Quotienten wie auch den Rest der Division speichern;

Passt nicht zum Konzept eines Ergebnisregisters

MIPS-Lösung: Verwendung von **Hi** und **Lo**

- `div $2,$3` # für ganze Zahlen in 2k-Darstellung
`Lo:=Reg[2]/Reg[3]; Hi:=Reg[2] mod Reg[3]`
- `divu $2,$3` # für natürliche Zahlen (*unsigned integers*)
`Lo:=Reg[2]/u Reg[3]; Hi:=Reg[2] mod Reg[3]`

Logische Befehle



Beispiel	Bedeutung	Kommentar
<code>and \$4,\$3,\$2</code>	$\text{Reg}[4] := \text{Reg}[3] \wedge \text{Reg}[2]$	und
<code>or \$4,\$3,\$2</code>	$\text{Reg}[4] := \text{Reg}[3] \vee \text{Reg}[2]$	oder
<code>andi \$4,\$3,100</code>	$\text{Reg}[4] := \text{Reg}[3] \wedge \text{zero_ext}(100)$	und mit Konstanten
<code>sll \$4,\$3,10</code>	$\text{Reg}[4] := \text{Reg}[3] \ll 10$	Schiebe nach links logisch
<code>sr1 \$4,\$3,10</code>	$\text{Reg}[4] := \text{Reg}[3] \gg 10$	Schiebe nach rechts logisch

Laden von Konstanten

Wie kann man 32-Bit-Konstanten in Register laden?

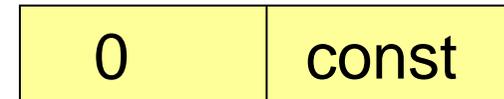
- Allgemeine Form der ori-Befehle*:

`ori r,s,const # Reg[r]:=Reg[s] ∨ (000016 & const)`

- Für den Sonderfall s=\$0:

Für Konstanten mit: oberes Halbwort = 0

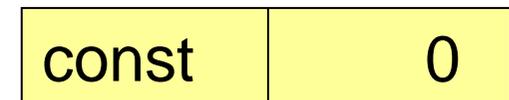
`ori r,$0,const # Reg[r]:=0 ∨ const`



- Für Konstanten mit: unteres Halbwort = 0

`lui r, const #Reg[r]:=const &000016`

(load upper immediate)

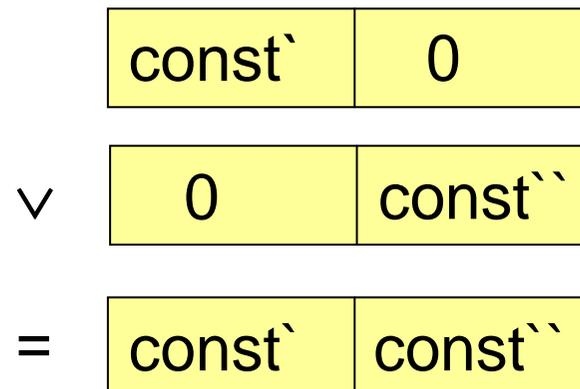


*MARS setzt teilweise addi-Befehle ein.

Laden von Konstanten (2)

- Für andere Konstanten:

```
lui $1, const`  
ori r,$1,const``
```



Sequenz wird vom Assembler für `lui` (*load immediate*) erzeugt.

Register \$1 ist immer für den Assembler freizuhalten.

Der load address – Befehl `la`

In vielen Fällen muss die Adresse einer Speicherzelle in einem Register bereit gestellt werden.

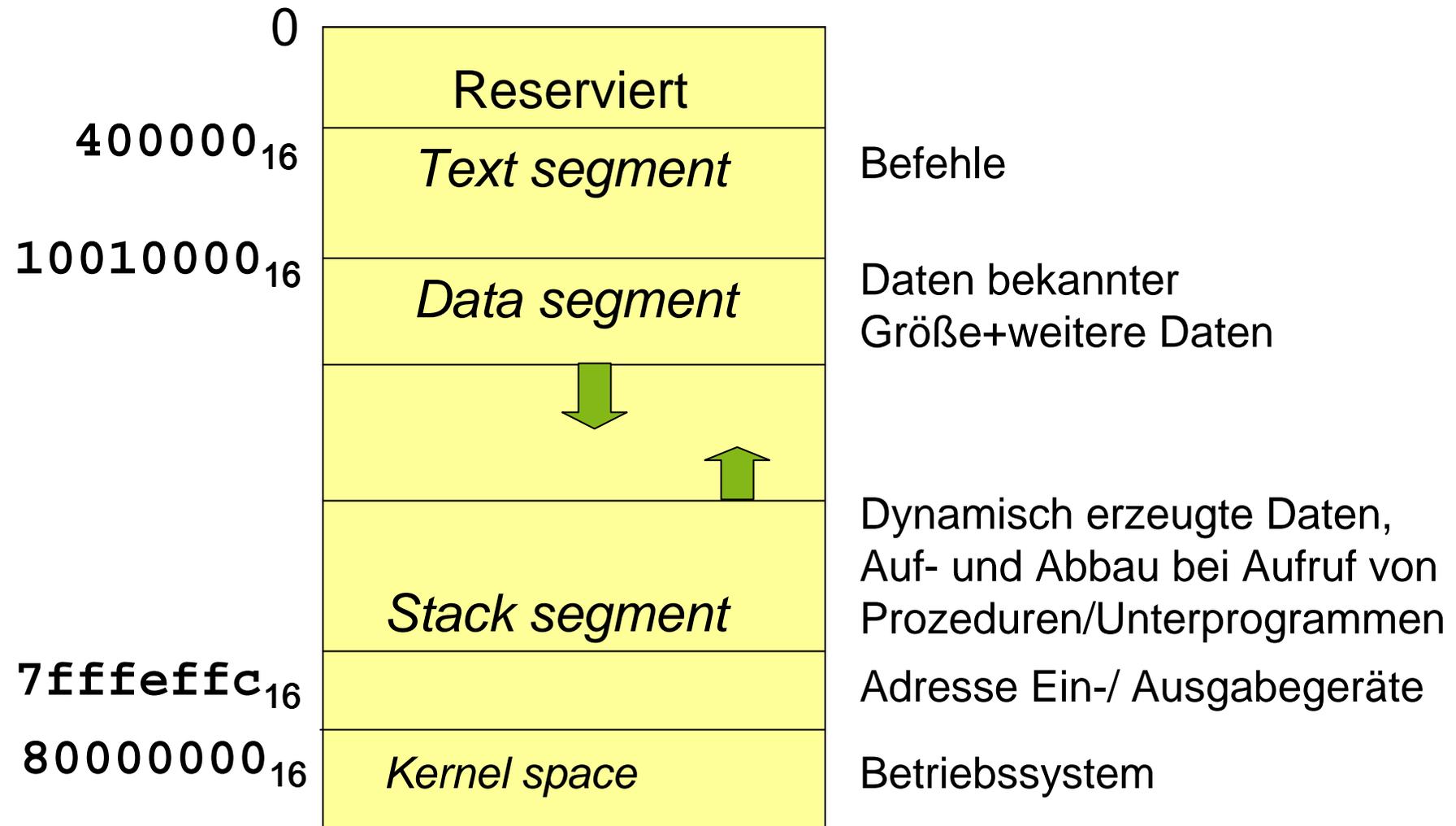
Dies ist mit den bislang vorgestellten Befehlen zwar möglich, der Lesbarkeit wegen wird ein eigener Befehl eingeführt.

Der Befehl `la` entspricht dem `lw`-Befehl, wobei der Speicherzugriff unterbleibt. Beispiel:

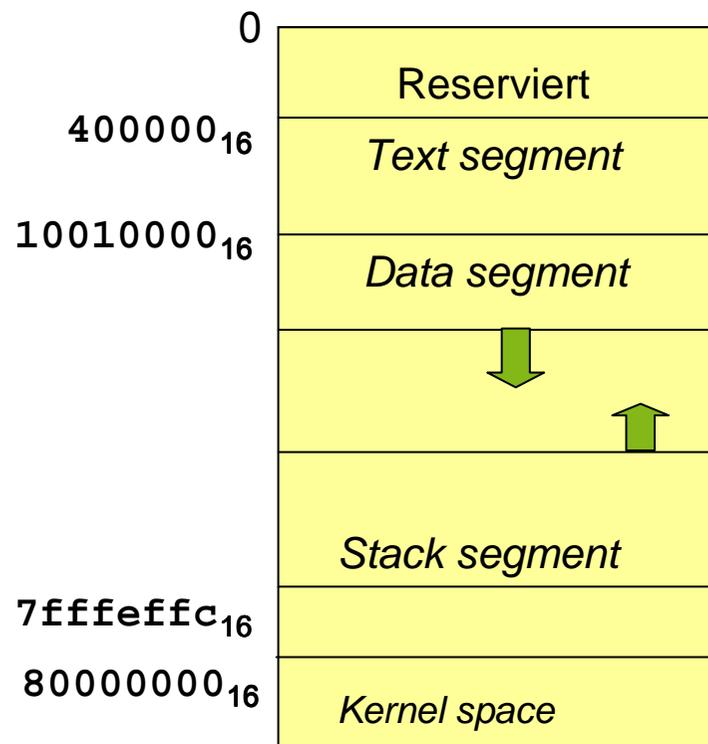
```
la $2,0x20($3) # Reg[2] := 0x20 + Reg[3]
```

Bei hinreichend kleinen Konstanten wird `la` über `addi` realisiert, ansonsten über eine Sequenz aus `li` und `add`.

Einteilung des Speicherbereichs (*memory map*) im Simulator folgt üblicher C/Unix-Konvention



Problem der Nutzung nicht zusammenhängender Adressbereiche



Man müsste den Segmenten verschiedenen physikalischen Speicher zuordnen, wenn man mit diesen Adressen wirklich den physikalischen Speicher adressieren würde.

Auswege:

- Umrechnung der Adressen (siehe Abschnitt über Speicher) oder
- Benutzung weitgehend zusammenhängender Speicherbereiche

Benutzung weitgehend zusammenhängender Speicherbereiche

Betriebssystem

Text segment

Data segment

Stack segment

....

Erfordert eine relativ gute Kenntnis der Größe der Segmente

Benutzung der Speicherbereiche in einem Beispielprogramm

Beispielprogramm

```
.glob main                                #Globales Symbol
main: lw $2, 0x10010000($0)                #Anfang Datenbereich
      lw $3, 0x10010004($0)
      add $3,$2,$3
      sw $3, 0x10010008($0)
```

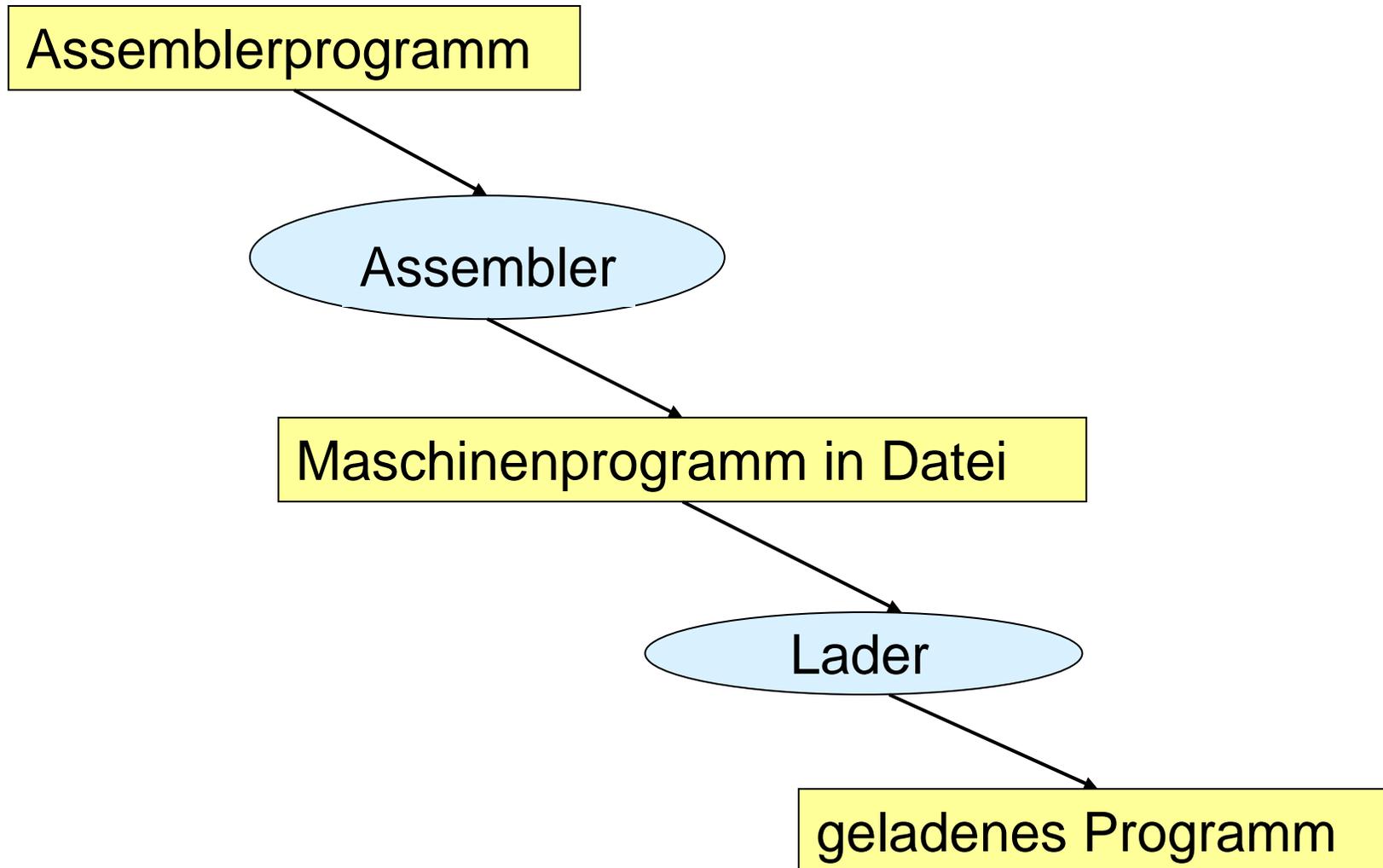
Zwei Versionen des Additionsprogramms

```
.glob main
main: lw $2, 0x10010000($0)
      lw $3, 0x10010004($0)
      add $3,$2,$3
      sw $3, 0x10010008($0)
```

```
#Globales Symbol
#Anfang Datenbereich
```

```
.glob main
main: li $4,0x10010000
      lw $2, 0($4)
      lw $3, 4($4)
      add $3,$2,$3
      sw $3, 8($4)
```

Transformation der Programmdarstellungen



Funktion des Assemblers (1)

- Übersetzt symbolische Befehlsbezeichnungen in Bitvektoren.
- Übersetzt symbolische Registerbezeichnungen in Bitvektoren.
- Übersetzt Pseudo-Befehle in echte Maschinenbefehle.
- Verwaltet symbolische Marken.
- Nimmt die Unterteilung in verschiedene Speicherbereiche vor.

Funktion des Assemblers (2)

- Verarbeitet einige Anweisungen an den Assembler selbst:

<code>.ascii</code>	<code>text</code>	Text wird im Datensegment abgelegt
<code>.asciiz</code>	<code>text</code>	Text wird im Datensegment abgelegt, 0 am Ende
<code>.data</code>		die nächsten Worte sollen in das Daten-Segment
<code>.extern</code>		Bezug auf externes globales Symbol
<code>.globl</code>	<code>id</code>	Bezeichner <code>id</code> soll global sichtbar sein
<code>.kdata</code>		die nächsten Worte kommen in das Kernel-Daten-Segment
<code>.ktext</code>		die nächsten Worte kommen in das Kernel-Text-Segment
<code>.set</code>		SPIM-Befehl, in MARS ignoriert
<code>.space</code>	<code>n</code>	<code>n</code> Bytes im Daten-Segment reservieren
<code>.text</code>		die nächsten Worte kommen in das Text-Segment
<code>.word</code>	<code>wert, ... wert</code>	Im aktuellen Bereich zu speichern

Assembler übersetzt symbolische Registernummern

\$zero = \$0 usw., siehe Anhang

zero	0	Constant	0	s0	16	Saved temporary, preserved across call
at	1	Reserved for assembler		s1	17	Saved temporary, preserved across call
v0	2	Expression evaluation and		s2	18	Saved temporary, preserved across call
v1	3	results of a function		s3	19	Saved temporary, preserved across call
a0	4	Argument 1		s4	20	Saved temporary, preserved across call
a1	5	Argument 2		s5	21	Saved temporary, preserved across call
a2	6	Argument 3		s6	22	Saved temporary, preserved across call
a3	7	Argument 4		s7	23	Saved temporary, preserved across call
t0	8	Temporary, \rightarrow preserved across call		t8	24	Temporary, not preserved across call
t1	9	Temporary, \rightarrow preserved across call		t9	25	Temporary, not preserved across call
t2	10	Temporary, \rightarrow preserved across call		k0	26	Reserved for OS kernel
t3	11	Temporary, \rightarrow preserved across call		k1	27	Reserved for OS kernel
t4	12	Temporary, \rightarrow preserved across call		gp	28	Pointer to global area
t5	13	Temporary, \rightarrow preserved across call		sp	29	Stack pointer
t6	14	Temporary, \rightarrow preserved across call		fp	30	Frame pointer
t7	15	Temporary, \rightarrow preserved across call		ra	31	Return address, used by function call

Zusammenfassung



- Sequentielle Befehlsbearbeitung
- Laden von Konstanten
- Vorzeichenerweiterung
- Weitere arithmetische/logische Befehle
- Funktion des Assemblers
- Übliche Speichereinteilung

2.2.1.5 Sprungbefehle



Problem mit dem bislang erklärten Befehlssatz:
keine Abfragen möglich.

Lösung: (bedingte) Sprungbefehle (*conditional branches*).

Elementare MIPS-Befehle:

`beq rega, regb, Sprungziel` (*branch if equal*)
mit `rega, regb` \in $\$0..\31 ,
und `Sprungziel`: 16 Bit *integer* (oder Bezeichner dafür).

`bne rega, regb, Sprungziel` (*branch if not equal*)
mit `rega, regb` \in $\$0..\31 ,
und `Sprungziel`: 16 Bit *integer* (oder Bezeichner dafür).

Anwendung von beq und bne

Übersetzung von

```
if (i==j) goto L1
f=g+h;
L1: f=f-i;
```

Assembler rechnet L1 in die im Maschinencode zu speichernde Konstante um.

in

```
beq $19, $20, L1          # nach L1, falls i=j
    add $16, $17, $18     # f=g+h
L1: sub $16, $16, $19     # immer ausgeführt
```

Symbolische Bezeichnung für eine Befehlsadresse.

Unbedingte Sprünge

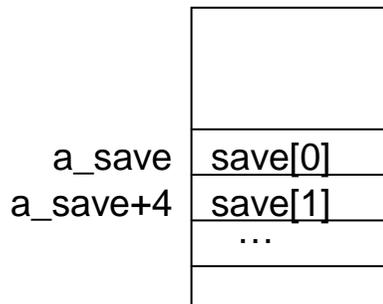
Problem: Übersetzung von

```
if (i==j) f=g+h; else f = g -h;
```

Lösung

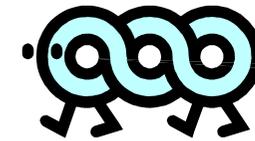
```
bne $19, $20, Else      # nach Else falls i≠j
    add $16, $17, $18    # f=g+h
    j    Exit           # Unbedingter Sprung
                        # (unconditional jump)
Else: sub $16, $17, $18  # f=g-h
Exit: ...
```

Realisierung von Array-Zugriffen



- Bei C beginnen Arrays mit dem Index 0
- Die Adresse des Arrays ist gleich der Adresse der Komponente 0
- Wenn jede Array-Komponente ein Wort belegt, dann belegt Komponente i das Wort i des Arrays.
- Wenn a_save die Anfangsadresse eines Arrays ist, dann ist $(a_save + i \times c)$ die Adresse der Komponente i .
 c ist die Anzahl der adressierbaren Speicherzellen, die pro Element des Arrays belegt werden (=4 bei 32-Bit Integern auf der MIPS-Maschine)

Realisierung von Schleifen mit unbedingten Sprüngen



Problem: Übersetzung von

```
while (save[i]==k) i = i+j;
```

a_save	save[0]
a_save+4	save[1]
	...

Lösung:

```
li    $10,4           # Reg[10]:=4
Loop: mul  $9,$19,$10  # Reg[9]:=i * 4
      lw   $8,a_save($9) # Reg[8]:=save[i]
      bne  $8,$21,Exit  # nach Exit, falls ≠
      add  $19,$19,$20  # i=i+j
      j   Loop
Exit: ...
```

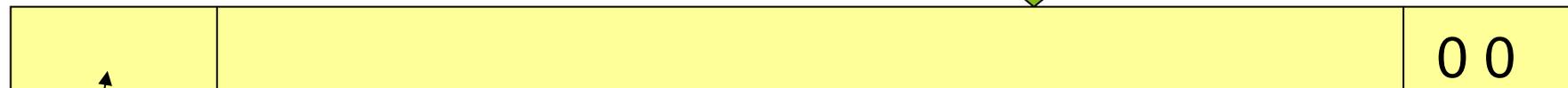
Format und Bedeutung unbedingter Sprünge

	Größe [Bit]	6	5	5	5	5	6
Arithmetische Befehle	Format R	op	rs	rt	rd	shamt	func t
lw, sw	Format I	op	rs	rt	offset		
j, jal	Format J	op	adresse				

PC

31 28 27

2 1 0



alter Wert

Sprünge außerhalb 256MB schwierig

Tests auf $<$, \leq , $>$, \geq



MIPS-Lösung: `slt`-Befehl (*set if less than*)

```
slt ra,rb,rc #  
# Reg[ra]:=if Reg[rb]<Reg[rc] then 1 else 0
```

Tests werden vom Assembler aus `slt`, `bne` und `beq`-Befehlen zusammengesetzt:

Beispiel:

```
aus blt $2,$3,L wird  
slt $1,$2,$3  
bne $1,$0,L
```

\$1 ist per Konvention dem Assembler vorbehalten

Weitere Befehle



Weitere Befehle:

- slti (Vergleich mit Direktoperanden)
- sltu (Vergleich für Betragszahlen)
- sltui (Vergleich für Betragszahlen als Direktoperand)
- ble (Verzweige für *less or equal*)
- blt (Verzweige für *less than*)
- bgt (Verzweige für *greater than*)
- bge (Verzweige für *greater or equal*)

} Pseudo-
befehle

Übersetzung einer for-Schleife

Bedingte Sprünge werden auch zur Übersetzung von `for`-Schleifen benötigt. Beispiel: Das C-Programm

```
j = 0;  
for (i=0; i<n; i++) j = j+i;
```

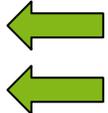
kann in das folgende Programm übersetzt werden:

```
main:  li    $2,0           # j:=0  
       li    $3,0           # i:=0  
loop:  bge   $3,$4, ende    # i>=n?  
       add  $2,$2,$3        # j=j+i  
       addi $3,$3,1         # i=i+1  
       j    loop  
ende:  ...
```

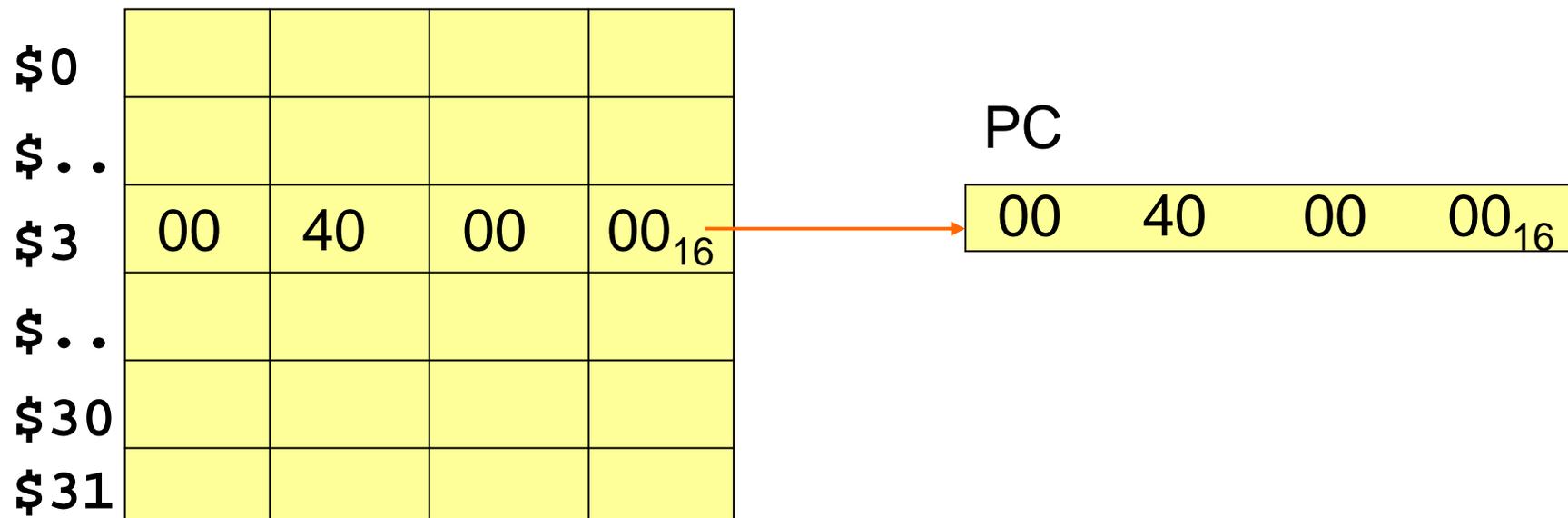
Realisierung von berechneten Sprüngen: der jr-Befehl

Format: `jr reg` (jump register), mit `reg` \in `$0..$31`

Semantik: `PC := Reg[reg]`

Beispiel: `jr $3` 

Registerspeicher (Reg)

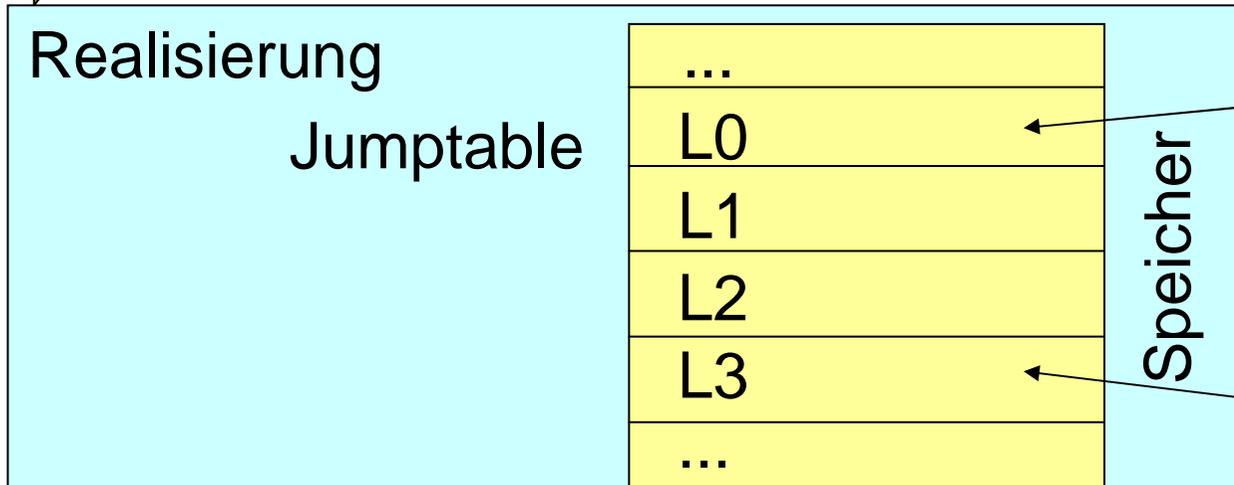


SWITCH-Anweisungen



Annahme: $k=2$

```
switch(k) { /* k muss  $\in 0..3$  sein! */
  case 0: f=i+j; break; /* k =0 */
  case 1: f=g+h; break; /* k =1 */
  case 2: f=g-h; break; /* k =2 */
  case 3: f=i-j; break; /* k =3 */
}
```



Adresse des ersten Befehls für case 0

Adresse des ersten Befehls für case 3

* <http://www.bund-deutscher-baumschulen.de/qualitaet/baum/images/10g.jpg>

```
.text
Jumtable: .word L0,L1,L2,L3, ..
```

Realisierung von SWITCH-Anweisungen mittels des jr-Befehls

```
switch(k) {  
  case 0: f=i+j; break; /* k =0 */  
  case 1: f=g+h; break; /* k =1 */  
  case 2: f=g-h; break; /* k =2 */  
  case 3: f=i-j; break; /* k =3 */ }  
}
```

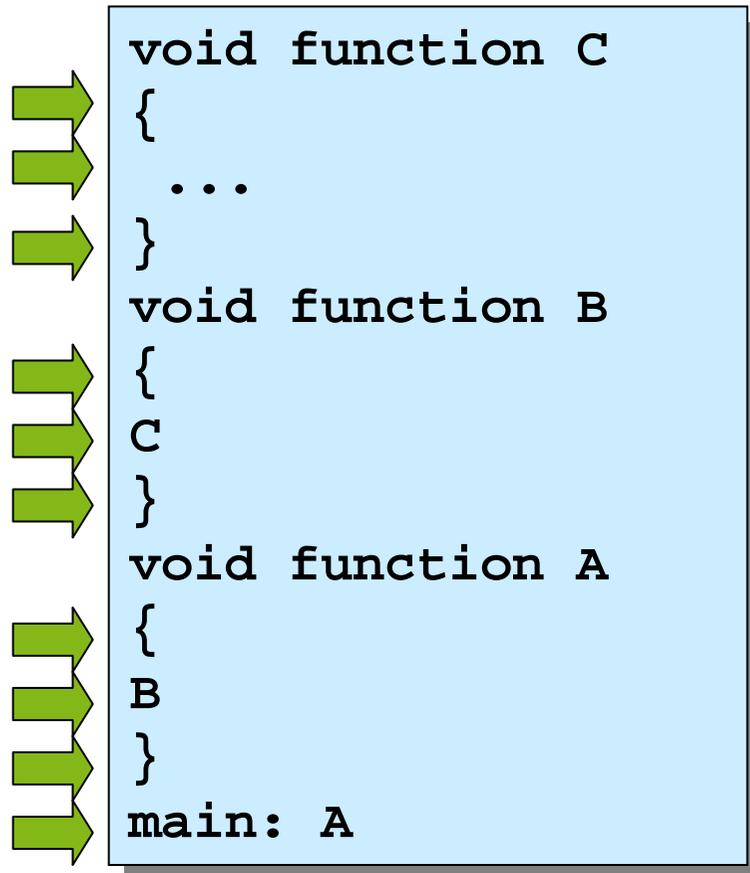
```
      li    $10,4           # Reg[10]:=4  
swit: mul  $9,$10,$21      # Reg[9]:=k*4  
➔ lw    $8,Jumptable($9)  # 1 der 4 Adressen  
      jr    $8             # PC:=Reg[8]  
L0:   add  $16,$19,$20     # k ist 0;  
      j    Exit           # entspricht break  
L1:   add  $16,$17,$18     # k ist 1;  
      j    Exit           # entspricht break  
L2:   sub  $16,$17,$18     # k ist 2;  
      j    Exit           # entspricht break  
L3:   sub  $16,$19,$20     # k ist 3;  
Exit: ...                 #
```

Zusammenfassung

- (Unbedingte) Sprungbefehle
- Bedingte Sprungbefehle
- Realisierung von for-Schleifen
- Realisierung von switch-Anweisungen



2.2.1.6 Prozeduraufrufe



Man muss

- sich merken können, welches der auf den aktuellen Befehl im Speicher folgende ist (d.h., man muss sich PC+4 merken) und
- an eine (Befehls-) Adresse springen.

Der *jump-and-link*-Befehl

Format: `jal adresse`

wobei `adresse` im aktuellen 256 MB-Block liegt

Bedeutung: `Reg[31] := PC + 4; PC := adresse`

Beispiel: `jal 0x410000`

Registerspeicher (Reg)

\$0				
\$1				
\$..				
\$..				
\$30				
\$31	00	40	00	04 ₁₆

Nach der Ausführung von
`jal` an Adresse `40000016`

PC

00	41	00	00 ₁₆
----	----	----	------------------

Realisierung nicht verschachtelter Prozeduraufrufe mit jal und jr

\$0				
\$1				
\$..				
\$..				
\$30				
\$31	00	40	00	04

410000
410004

400000
400004

```
void function A
{
...
    /* jr, $31 */
}
main: A; /*jal A*/
...
```

+4

PC

00	40	00	04
----	----	----	----

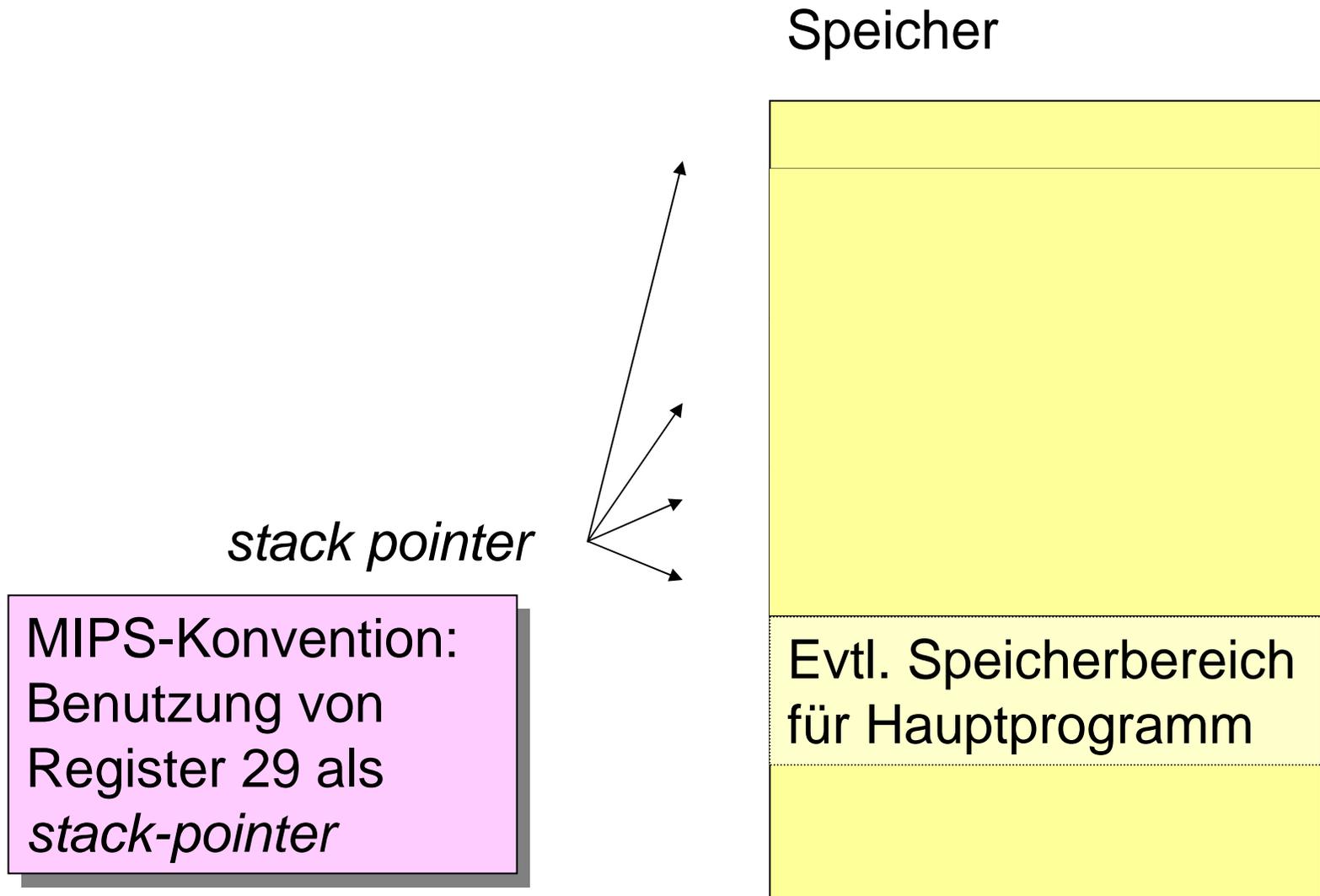
Das Stapel-Prinzip



```
void function C
{
  ...
}
void function B
{
  C
}
void function A
{
  B
}
main: A
```

Evtl. Speicherbereich
für Hauptprogramm

Realisierung eines Stapels im Speicher



Konkrete Realisierung für drei Prozeduren

Statisch:

```

C()
{ ...; } /* jr*/
B()
{ /*$31->stack*/
  C();
} /*stack->$31, jr */
A()
{ /*$31->stack*/
  B();
} /*stack->$31, jr */
main()
{A();}
    
```

Dynamisch:

Aktiv	Befehl
main	jal A
A	\$31 -> stack
A	jal B
B	\$31 -> stack
B	jal C
C	jr \$31
B	Rückschreiben von \$31
B	jr \$31
A	Rückschreiben von \$31
A	jr \$31
main	

Sichern von Registerinhalten



Einige Register sollten von allen Prozeduren genutzt werden können, unabhängig davon, welche Prozeduren sie rufen und von welchen Prozeduren sie gerufen werden.

Die Registerinhalte müssen beim Prozeduraufruf gerettet und nach dem Aufruf zurückgeschrieben werden.

2 Methoden:

1. Aufrufende Prozedur rettet vor Unterprogrammaufruf Registerinhalte (*caller save*) und kopiert sie danach zurück.
2. Gerufene Prozedur rettet nach dem Unterprogrammaufruf diese Registerinhalte und kopiert sie vor dem Rücksprung zurück (*callee save*).

Sichern von Registern (2)

caller save

caller: Retten der Register auf den *stack*.

jal ...

callee:

Retten von \$31.

Befehle f. Rumpf.

Rückschreiben von \$31.

jr \$31.

caller:

Rückschreiben der Register.

callee save

caller: jal ...

callee:

Retten der Register auf den *stack*.

Retten von \$31.

Befehle f. Rumpf.

Rückschreiben von \$31.

Rückschreiben der Register.

jr \$31.

caller:

2.2.1.7 Prozeduren mit Parametern

```
int stund2sec(int stund)
{return stund*60*60}
stund2sec(5);
```

Wo findet stund2sec
den Eingabeparameter?

Konflikt:

- Parameter möglichst in Registern übergeben (schnell)
- Man muss eine beliebige Anzahl von Parametern erlauben.

MIPS-Konvention:

Die ersten 4 Parameter werden in Registern \$4, \$5, \$6, \$7 übergeben, alle weiteren im *stack*.

Benutzung der Register

Register	Verwendung
\$0	0
\$1	Assembler
\$2,\$3	Funktionsergebnis
\$4-\$7	Parameter
\$8-\$15	Hilfsvariable, nicht gesichert
\$16-\$23	Hilfsvariable, gesichert
\$24-\$25	Hilfsvariable, nicht gesichert
\$26-\$27	Für Betriebssystem reserviert
\$28	Zeiger auf globalen Bereich
\$29	<i>Stack pointer</i>
\$30	Zeiger auf Datenbereich
\$31	Rückkehradresse

Call by value vs. call by reference

An Prozeduren Parameterwert oder dessen Adresse übergeben?

Parameterwert selbst
(**call by value**):

Gerufener Prozedur ist nur der Wert bekannt.

Die Speicherstelle, an der er gespeichert ist, kann nicht verändert werden.

Adresse des Parameters
(**call by reference**):

Erlaubt Ausgabeparameter, Änderung der Werte im Speicher durch die gerufene Prozedur möglich.

Bei großen Strukturen (*arrays*) effizient.

C: Bei skalaren Datentypen (*int*, Zeigern, usw.): *call by value*, bei komplexen Datentypen (*arrays*): *call by reference*.

Prozedur swap , Prinzip der Übersetzung in Assembler

```
swap (int v[], int k)
{int temp;
temp=v[k];
v[k]=v[k+1];
v[k+1]=temp;
}
```

Adresse (v)

v[0]
...
v[k] 15
v[k+1] 25

Schritte der Übersetzung in Assembler:

1. Zuordnung von Speicherzellen zu Variablen
2. Übersetzung des Prozedurrumpfes in Assembler
3. Sichern und Rückschreiben der Register

Zuordnung von Registern

Variable	Speicherzelle	Kommentar
Adresse von v	\$4	Aufgrund der MIPS-Konvention für den 1. Parameter
k	\$5	Aufgrund der MIPS-Konvention für den 2. Parameter
temp	\$15	(irgendein freies Register)
Interne Hilfsvariable	\$16	(irgendein freies Register)

Realisierung des Rumpfes

```
temp=v[k];  
v[k]=v[k+1];  
v[k+1]=temp;
```

\$4=
Adresse (v)



v[0]	
...	
v[k]	25
v[k+1]	15

```
li    $2, 4           #  
mul   $2, $2, $5      #Reg[2]:=4*k  
add   $2, $4, $2      #Adresse von v[k]  
lw    $15, 0($2)     #lade v[k]  
lw    $16, 4($2)     #lade v[k+1]  
sw    $16, 0($2)     #v[k]:=v[k+1]  
sw    $15, 4($2)     #v[k+1]:=temp
```

Sichern der Register

Prolog: Sichern der in swap überschriebenen Register:

Prolog ←
Prozedurrumpf
Epilog

```
addi $29,$29,-12  
sw $2, 0($29)  
sw $15, 4($29)  
sw $16, 8($29)
```

Speicher

\$29 →

Nach dem Sichern belegter Teil des *Stacks*

Vorab belegter Teil des *Stacks*

Wegen der Verwendung des *Stacks* auch für *Interrupts* (siehe 2.2.2.3) immer **zuerst** mittels `addi` den Platz auf dem *Stack* schaffen!

Rückschreiben der Register

Epilog: Rückschreiben der in swap überschriebenen Register:

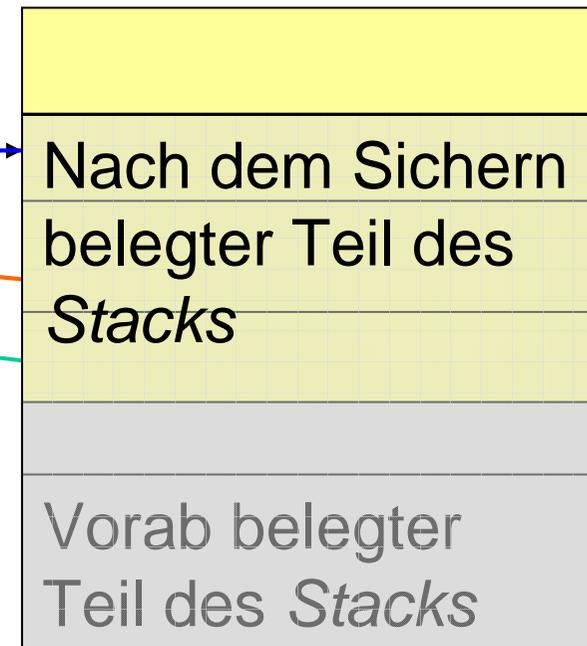
Prolog

Prozedurrumpf

Epilog ←

```
lw $2, 0($29)
lw $15, 4($29)
lw $16, 8($29)
addi $29,$29,12
```

Speicher



Wegen der Verwendung des *Stacks* auch für *Interrupts* (siehe 2.2.2.3) immer **zuletzt** mittels **addi** den Platz auf dem *Stack* freigeben!

Übersetzung von *bubble sort*



```
int v[10000]
sort(int v[], int n)
{int i,j;
  for (i=0; i<n; i=i+1) {
    for (j=i-1; j>=0 && v[j]>v[j+1]; j=j-1){
      swap(v,j);
    }
  }
}
```

Schritte der Übersetzung in Assembler:

1. Zuordnung von Speicherzellen zu Variablen
2. Übersetzung des Prozedurrumpfes in Assembler
3. Sichern und Rückschreiben der Registerinhalte

* http://www.bstu.bund.de/DE/Archiv/Rekonstruktion/Bildergalerie/reko__bild04,property=default.jpg

Zuordnung von Registern

Adresse von v	\$4	Lt. Konvention
n	\$5	Lt. Konvention
j	\$17	irgendein freies R.
Kopie von \$4	\$18	Sichern der Parameter zur Vorbereitung des Aufrufs von swap
i	\$19	irgendein freies R.
Kopie von \$5	\$20	wie \$4
Hilfsvariable	\$15,\$16,\$24,\$25	irgendwelche freien Register
Hilfsvariable	\$8	nicht gesichert

Übersetzung des Rumpfes

```
int v[10000]
sort(int v[], int n)
{int i,j;
  for(i=0;i<n;i=i+1){
    for(j=i-1;j>=0 &&
      v[j]>v[j+1];j=j-1)
      {swap(v,j);}}
```

Adr. von v	\$4
n	\$5
j	\$17
Kopie von \$4	\$18
i	\$19
Kopie von \$5	\$20
Hilfsvariable	\$15,\$16,\$24,\$25
Hilfsvariable, nicht gesichert	\$8

```
add $18,$4,$0 #
add $20,$5,$0 #
li $19,0 # i:=0
for1: bge $19,$20,ex1 # i>=n?
      addi $17,$19,-1 # j:=i-1
for2: slti $8,$17,0 # j<0?
      bne $8,$0,ex2 #
      li $8,4 # $8:=4
      mul $15,$17,$8 # j*4
      add $16,$18,$15 # Adr(V[j])
      lw $24,0($16) # v[j]
      lw $25,4($16) # v[j+1]
      ble $24,$25,ex2 # v[j]<=
      add $4,$18,$0 # 1.Param.
      add $5,$17,$0 # 2.Param.
      jal swap
      addi $17,$17,-1 # j:=j-1
      j for2 # for-ende
ex2: addi $19,$19,1 # i:=i+1
      j for1 # for-ende
ex1 : # ende
```

Sichern der Registerinhalte

Prolog: Sichern der überschriebenen Register:

Prolog ←
Prozedurrumpf
Epilog

Adr. von v	\$4
n	\$5
j	\$17
Kopie von \$4	\$18
i	\$19
Kopie von \$5	\$20
Hilfsvariable	\$15,\$16,\$24,\$25
Hilfsvariable, nicht gesichert	\$8

```
addi $29, $29, -36
sw $15, 0($29)
sw $16, 4($29)
sw $17, 8($29)
sw $18, 12($29)
sw $19, 16($29)
sw $20, 20($29)
sw $24, 24($29)
sw $25, 28($29)
sw $31, 32($29)
```

Rückschreiben der Registerinhalte

Epilog: Rückschreiben der Registerinhalte:

Prolog
 Prozedurrumpf
 Epilog ←

Adr. von v	\$4
n	\$5
j	\$17
Kopie von \$4	\$18
i	\$19
Kopie von \$5	\$20
Hilfsvariable	\$15,\$16,\$24,\$25
Hilfsvariable, nicht gesichert	\$8

```
lw    $15, 0($29)
lw    $16, 4($29)
lw    $17, 8($29)
lw    $18, 12($29)
lw    $19, 16($29)
lw    $20, 20($29)
lw    $24, 24($29)
lw    $25, 28($29)
lw    $31, 32($29)
addi  $29, $29, 36
jr    $31
```

Zusammenfassung



- Nicht-verschachtelte Prozeduren
- jr- und jal-Befehle
- Das Stapel- (*stack*) Prinzip
- Verschachtelte Prozeduren
- Konventionen zur Registernutzung
- *Call-by-value, call-by-reference*
- Sichern und Rückschreiben von Registerinhalten
- *Callee-save* und *caller-save*
- Beispiele

2.2.2 Allgemeine Sicht der Befehlsschnittstelle

Bislang haben wir ein spezielles Beispiel einer Befehlsschnittstelle betrachtet.

☞ Jetzt allgemeine Sicht auf die Befehlsschnittstelle.

Zur Befehlsschnittstelle (*instruction set architecture, ISA*) gehören:

1. Die nutzbaren **Maschinenbefehle** (einschließlich der elementaren Datentypen).
2. Ein **Modell des Speichers** (siehe 2.2.2.3).
3. Die logische Sicht auf das **Unterbrechungssystem** (*interrupt system*).



Vorlesung Rechnerstrukturen, Teil 2

2 Rechnerarchitektur

2.2 Die Befehlsschnittstelle

2.2.2 Allgemeine Sicht der Befehlsschnittstelle

2.2.2.1 Das Speichermodell

Das Speichermodell



- **Zeitkomplexität des Zugriffs:** Verhalten entspricht dem eines großen Arrays, Zugriff in $O(1)$.
- Größe der **adressierbaren Einheiten:** meist Byte-adressierbar.
- **Alignment**-Beschränkungen beschreiben Einschränkungen hinsichtlich der Ausrichtung (z.B.: Befehle und *int*'s beginnen auf Wortgrenzen).
- Maximale **Größe** des Speichers:
Historisch gesehen immer wieder unterschätzt.
"640k will be enough for everyone", Bill Gates (?), 1981.
Verdopplung alle 2-3 Jahre.
- Die Speicher realisieren den **Zustand** des Rechensystems.

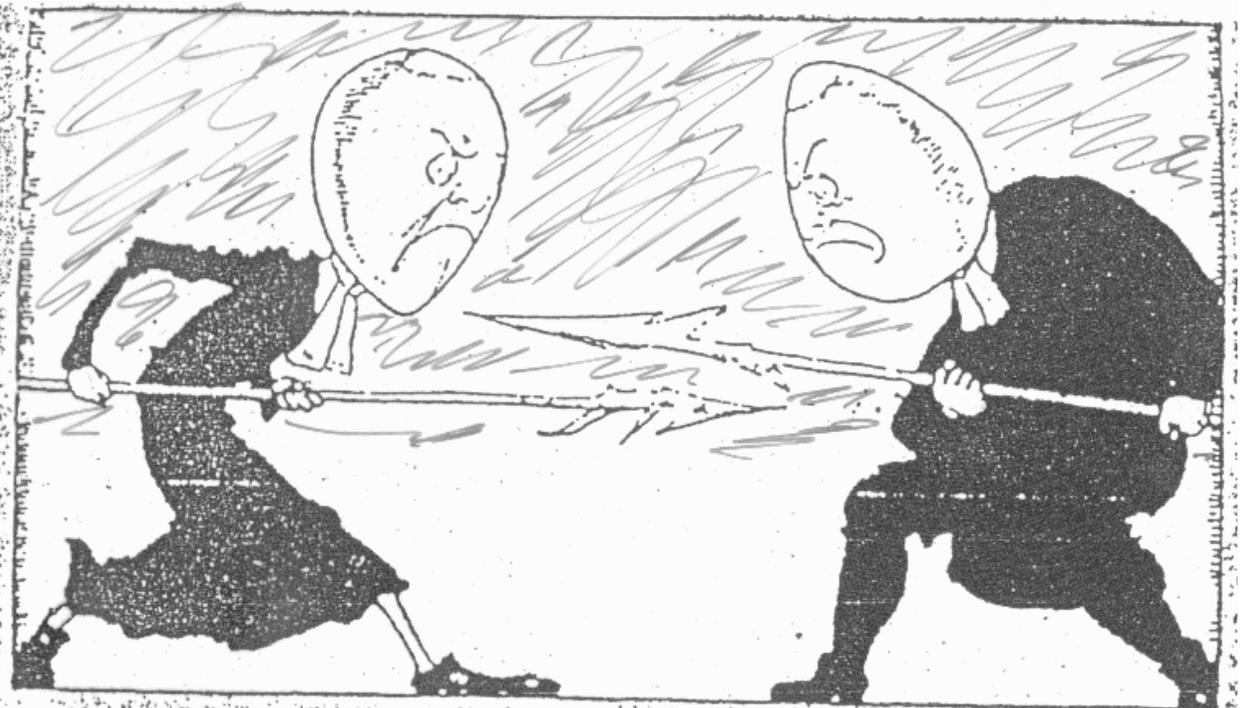
Little endians und big endians (1)

(Endianess)

Little endians: der am wenigsten signifikante Teil eines Wortes erhält die niedrigste Byteadresse.

Big endians: der signifikanteste Teil eines Wortes erhält die niedrigste Byteadresse.

Ursprung:
Gulliver's Reisen.



Reproduced from *The Annotated Gulliver's Travels* by Isaac Asimov; Published by Crown Publishers, Inc.

Little endians und big endians (2)

Anwendungen, u.a.:

1. Bei der Speicherbelegung durch 32-Bit Integer

Beispiel: Darstellung von 00010203_{16}

<i>little endian</i>		<i>big endian</i>	
Adresse	Wert	Adresse	Wert
"..00"	3	"..00"	0
"..01"	2	"..01"	1
"..10"	1	"..10"	2
"..11"	0	"..11"	3

Invertierung der beiden letzten Adressbits bewirkt Umschaltung zwischen den beiden Systemen.

Little endians und big endians (3)

Anwendungen, unter anderem:

2. Bei der Zeichenketten-Darstellung und Verarbeitung
Beispiel: Darstellung von "Esel"

<i>little endian</i>		<i>big endian</i>	
Adresse	Wert	Adresse	Wert
"..00"	I	"..00"	E
"..01"	e	"..01"	s
"..10"	s	"..10"	e
"..11"	E	"..11"	I

Vorteile von *big endian*:

- Inkrementieren der Adresse liefert das nächste Zeichen.
- Verlängern der Zeichenkette ist einfach.

Registerspeicher (1)

Warum Registerspeicher?

Man könnte in Befehlen 3 Adressteile angeben & bei arithmetischen Befehlen ausschließl. den Hauptspeicher benutzen.

Beispiel (so genannter 3-Adressbefehl):

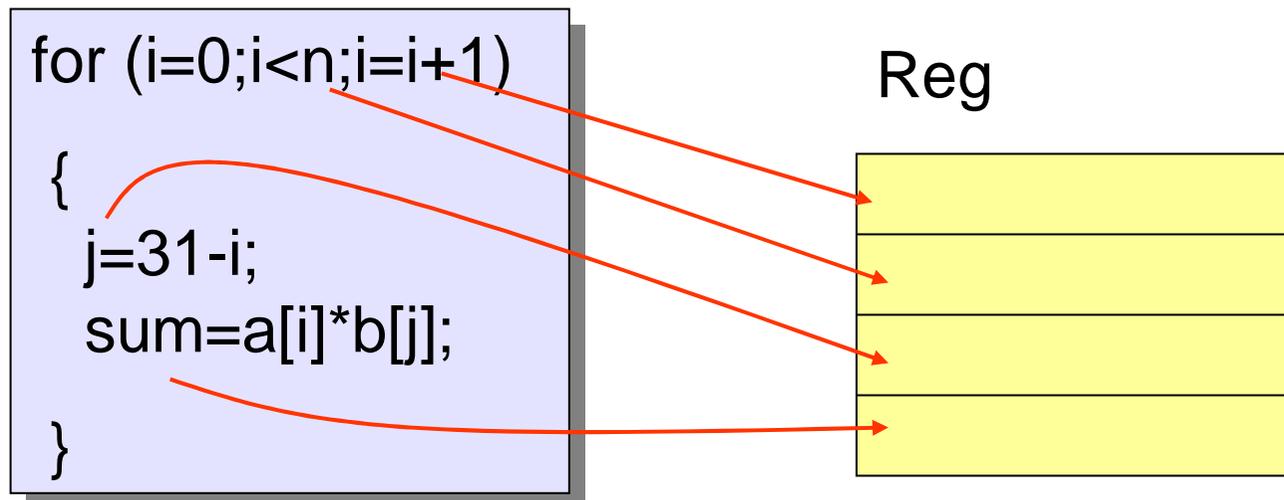
```
add offset1(reg1), offset2(reg2), offset3(reg3)
```

Nachteile:

- Extrem große Befehlswortlänge
 - Unterschiedlich lange Befehlswoorte
 - ☞ Schnelle Abarbeitung in einem Fließband wird schwierig
- Registeradressen ermöglichen Verkürzung der Adressteile.
- ☞ RISC: Alle Operanden & Ziele in Registern

Registerspeicher (2)

Zugriff auf Register viel schneller als Zugriff auf Hauptspeicher.
Programme verhalten sich in der Regel **lokal**.



lokaler Ausschnitt bietet schnellen Zugriff auf häufig genutzte Information.

Größe von Registerspeichern

Vorteile einer großen Anzahl von Registern:

Viele lokale Zugriffe möglich.

- schnelle Zugriffe.
- Entlastung des Hauptspeichers.

Nachteile einer großen Anzahl von Registern:

- Befehlswortbreite wächst an.
- Aufwand für das Retten und Rückschreiben (bei Prozeduraufrufen, Unterbrechungen, Prozessumschaltungen usw.) wächst an.

 Kompromiss

Homogene und heterogene Registersätze

Homogene Registersätze:

Alle Register besitzen dieselbe Funktionalität.

Heterogene Registersätze:

Manche Register besitzen spezielle Funktionen.

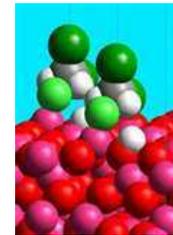
Beispiele: `$0`, `$31`, `Hi` und `Lo`,

Vorteile:

- Befehle mit vielen (≥ 4) Registern leicht zu realisieren.
- Weniger Registernummern im Befehl.
- Kann effizienter sein.

Nachteile:

- Separate Kopierbefehle erforderlich.
- Durch Compiler schwieriger zu nutzen.

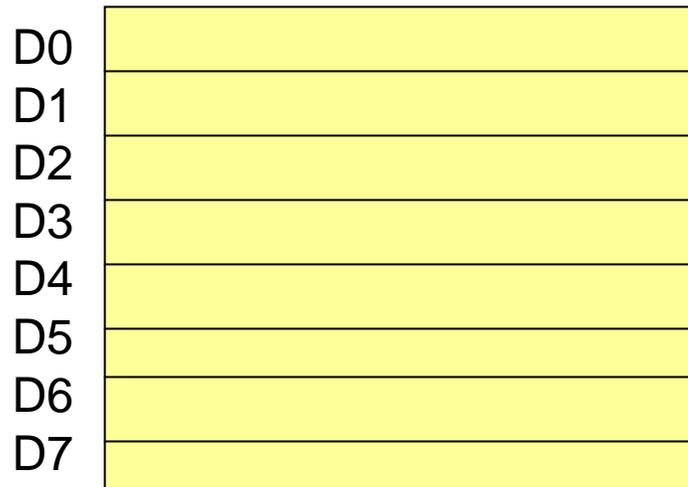


* <http://www.cardiff.ac.uk/chemy/research/heterogeneous1.jpg>

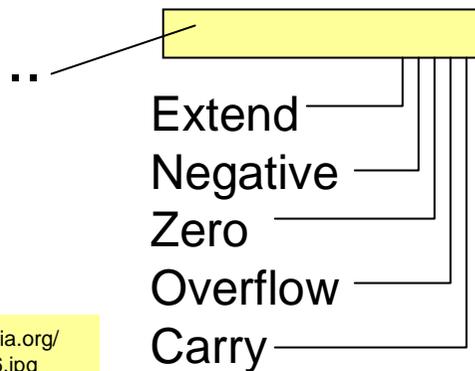
Beispiele: 1. Motorola 680x0/ Freescale ColdFire



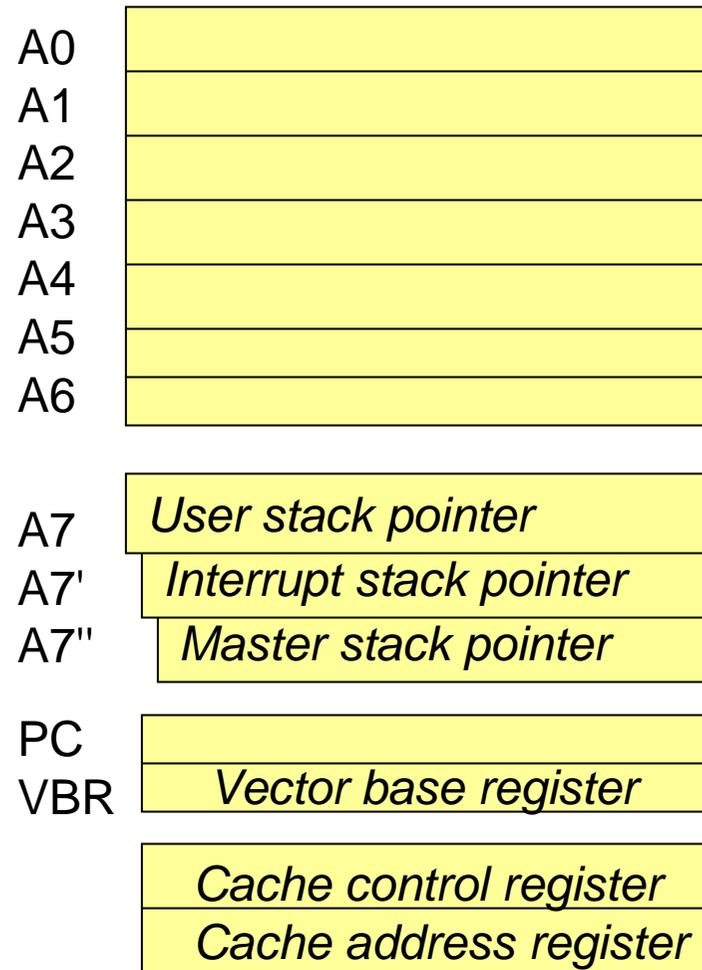
Datenregister



Statusregister



Adressregister

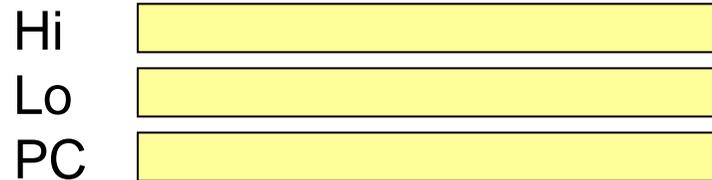
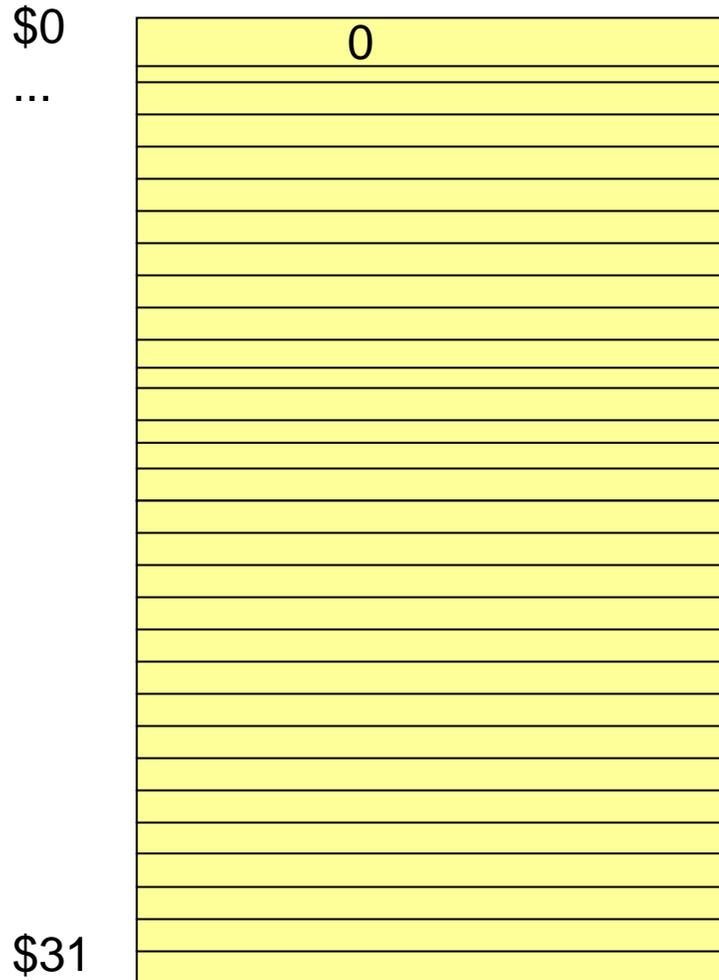


Trennung in Daten- & Adressregister bewirkt Reduktion auf 3 Bits/ Registernummer; spezielle *stack pointer*; separates *condition code register (CCR)*

* <http://upload.wikimedia.org/.../240px-Mc68020rc16.jpg>

Beispiele: 2. MIPS R2000-R8000

Registerspeicher



Gleitkommaregister ...

So genannte *function register*
(z.B. für Unterbrechungen)

Keine *condition code register*.
Weitgehend homogen,
Ausnahmen: \$0, \$31, Hi, Lo,
function register,
Assemblerkonventionen für
Registerbenutzung.

Beispiele: 3. Intel 80x86

Allgemeine Register

EAX	Arithm. Ergeb.	AX
EDX	& Ein/Ausgabe	DX
ECX	Zählregister	CX
EBX	Basis-Register	BX
EBP	Basis-Register	BP
ESI	Index-Register	SI
EDI	Index-Register	DI
ESP	Stack pointer	SP

Spezialregister

PC

Instruction pointer

EFR

...
 sign
 zero
 aux carry
 parity
 carry

Maschinen-Status-Wort

Segmentregister

CS	Code-Segment
SS	Stack-Segment
DS	Daten-Segment
ES	Daten-Segment
FS	Daten-Segment
GS	Daten-Segment

Relativ kleiner & inhomogener Registersatz.
 Hohe Ansprüche an Geschwindigkeit des Hauptspeicherzugriffs.

Zusammenfassung



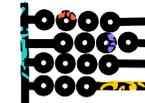
Allgemeine Sicht auf die Befehlsschnittstelle

- Speichermodell
 - Hauptspeicher
 - *Endianess*
 - Registerspeicher
- Befehlssatz
- Interrupts



2.2.2.2 Befehlssätze - Befehlsgruppen -

- Transferbefehle (*lw, sw, mfhi*)
- E/A-Befehle (*in, out*)
- Arithmetische Befehle (*add, sub, mul, div*)
- Logische Befehle (*and, or, not*)
- Vergleichsbefehle (*sgt, ..* oder Seiteneffekt arithmet. Befehle)
- Bitfeld- und Flag-Befehle
- Schiebebefehle
- Sprungbefehle
- Kontrollbefehle (*disable interrupt*)
- Ununterbrechbare Befehle (*test-and-set*)



0101 v 0101



2.2.2.2 Befehlssätze - Adressierungsarten -

Klassifikation der Adressierung nach der Anzahl der Zugriffe auf den Speicher

0-stufige Adressierung

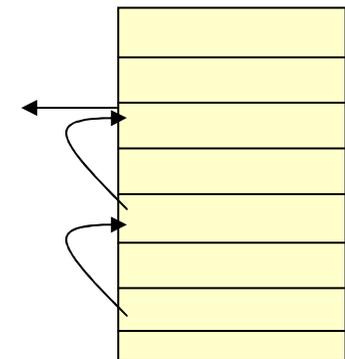
z.B. Operanden in Registern, Direktoperanden

1-stufige Speicheradressierung (Referenzstufe 1)

z.B. bisherige `lw`, `sw`-Befehle

2-stufige Adressierung (Referenzstufe 2)

n-stufige Adressierung (Referenzstufe n)



0-stufige Adressierung

- **Registeradressierung:**

ausschließlich Operanden aus & Ziele in Registern

Beispiele:

<code>mflo \$15</code>	<code>Reg[15] := Lo</code>	MIPS
<code>clr, 3</code>	<code>D[3] := 0</code>	680x0
<code>ldpsw, 3</code>	<code>D[3] := PSW</code>	680x0

- **unmittelbare Adressierung, Direktoperanden, *immediate addressing*:**

Operanden sind Teil des Befehlswords

Beispiele:

- <code>lui \$15, 3</code>	<code>Reg[15] := 3 << 16</code>	MIPS
- <code>ld D3, #100</code>	<code>D[3] := 100</code>	680x0

1-stufige Adressierung, Referenzstufe 1 (1)

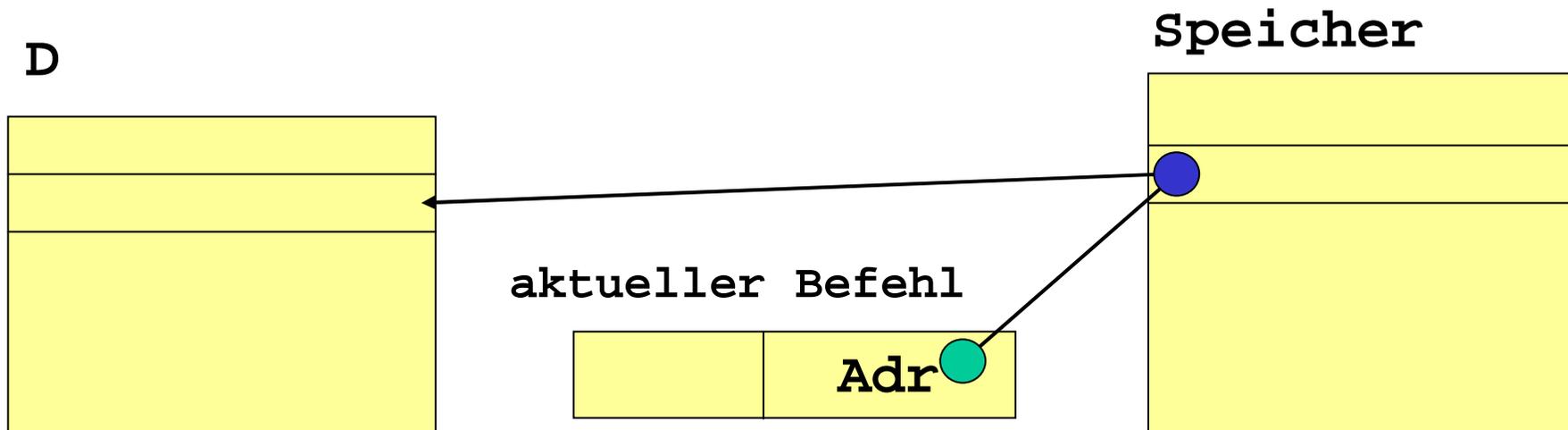
Genau 1 Zugriff auf den Speicher

- **Direkte Adressierung, absolute Adressierung**
Adresse ist ausschließlich im Befehlsword enthalten

Beispiele:

<code>lw \$15,Adr</code>	<code># Reg[15]:=Speicher[Adr]</code>	MIPS
<code>ld D3,Adr</code>	<code># D[3] :=Speicher[Adr]</code>	680x0

Aus Befehlsword



1-stufige Adressierung, Referenzstufe 1 (2)

- **Register-indirekte Adressierung**

Adresse ist ausschließlich im Register enthalten

Beispiele:

```
lw $15,($2)      # Reg[15]:=Speicher[Reg[2]]      MIPS
ld D3,(A4)       # D[3]:=Speicher[A[4]]          680x0
```

Varianten: *pre/post-increment/decrement* zur Realisierung von Stapeloperationen.

Beispiel:

```
ld D3,(A4)+      # D[3]:=Speicher[A[4]];
                  # A[4]:=A[4]+4 beim Laden von 32 Bit
```

1-stufige Adressierung, Referenzstufe 1 (3)

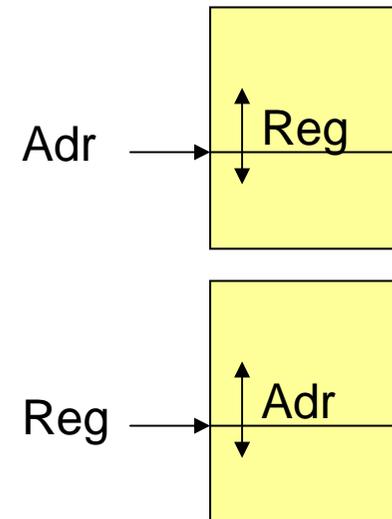
- **Relative Adressierung, indizierte Adressierung, Basis-Adressierung:** Adresse ergibt sich aus der Addition eines Registerinhaltes und einer Konstanten im Befehl.

Beispiele:

```
lw $15,Adr($2) # Reg[15]:=Speicher[Adr+Reg[2]] MIPS  
ld D3,Adr(A4) # D[3]:=Speicher[Adr+A[4]] 680x0
```

Varianten (nicht immer einheitlich bezeichnet):

- **Indizierte Adressierung:**
Adr umfasst vollen Adressbereich,
Register evtl. nicht.
- **Basisadressierung, Register-Relative Adressierung (MIPS)**
Register umfasst vollen Adressbereich,
Adr evtl. nicht.



1-stufige Adressierung, Referenzstufe 1 (4)

- **Register-Relative Adressierung mit Index**

Addition zweier Register, z.B. zeigt eines auf relevanten Speicherbereich, ein zweites enthält einen Array-Index

Beispiele:

`ld D3,Adr(A3,D4) # D[3]:=Speicher[Adr+A[3]+D[4]] 680x0`

IBM-370/390: nur 12 Bit für `Adr`, Zeiger auf relevanten Speicherbereich immer benötigt.

1-stufige Adressierung, Referenzstufe 1 (5)

- **Programmzähler-relative Adressierung**

Addition des Programmzählers zu Adr

Beispiele:

```
L:bne $4,$0,Z #PC:=PC+(if Reg[4]≠0 then Z-Lo else 4)
```

```
L:bra Z #PC:=PC+(Z-L)o 680x0
```

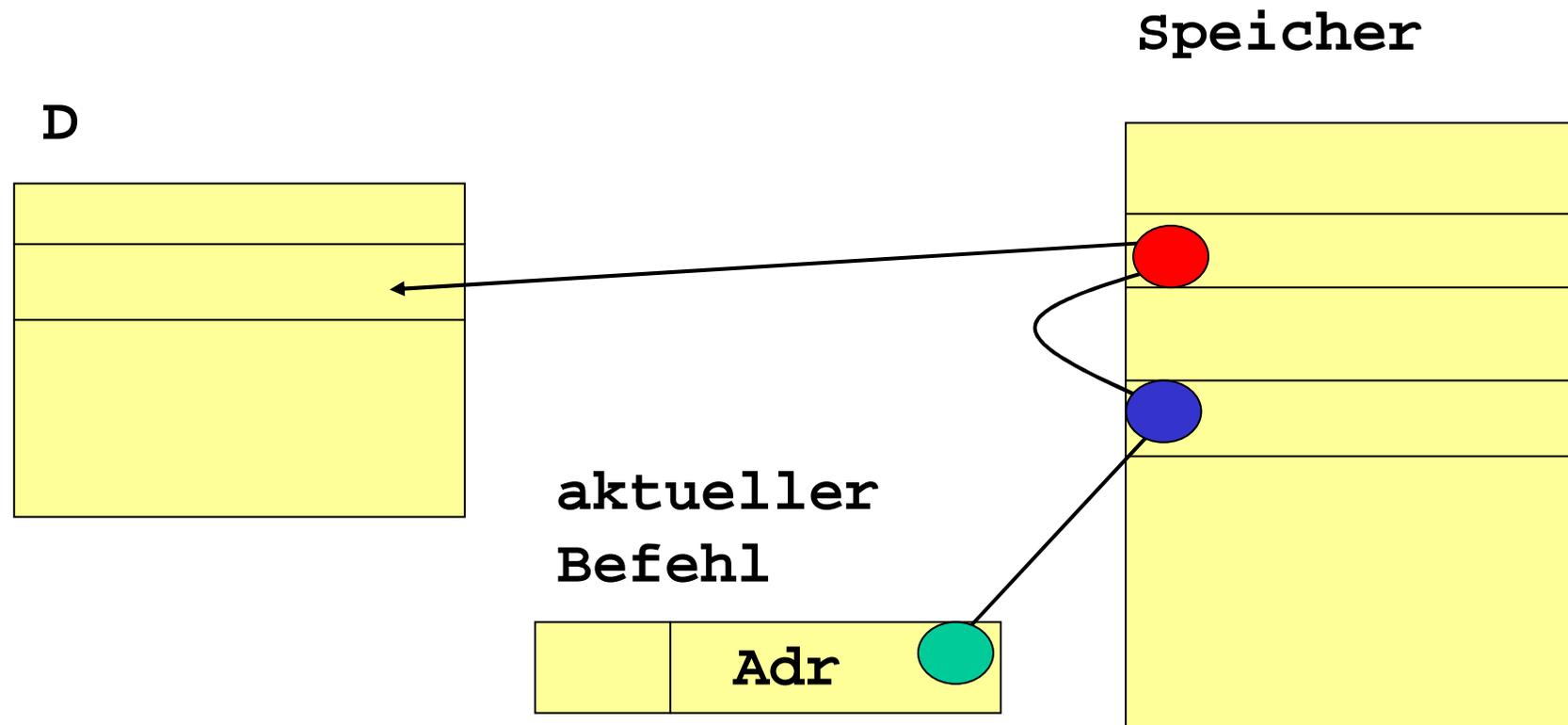
°Konstante wird so bestimmt, dass Sprung an Z erfolgt.

2-stufige Adressierung

- Indirekte Adressierung - (1)

- Indirekte (absolute) Adressierung

$D[\text{Reg}] := \text{Speicher}[\text{Speicher}[\text{Adr}]]$



2-stufige Adressierung - Indirekte Adressierung - (2)

- **Indirekte Register-indirekte Adressierung**

$D[\text{Reg}] := \text{Speicher}[\text{Speicher}[D[\text{IReg}]]]$ mit $\text{IReg} \in 0..7$

- **Indirekt indizierte Adressierung, Vorindizierung**

$D[\text{Reg}] := \text{Speicher}[\text{Speicher}[\text{Adr} + D[\text{IReg}]]]$ mit $\text{IReg} \in 0..7$

- **Indizierte indirekte Adressierung, Nachindizierung**

$D[\text{Reg}] := \text{Speicher}[\text{Speicher}[\text{Adr}] + D[\text{IReg}]]$ mit $\text{IReg} \in 0..7$

- **Indirekte Programmzähler-relative Adressierung**

$D[\text{Reg}] := \text{Speicher}[\text{Speicher}[\text{Adr} + \text{PC}]]$

$\text{PC} := \text{Speicher}[\text{Adr} + \text{PC} + i]$, mit $i \in \{1, 2, 4\}$

n-stufige Adressierung

- Referenzstufen $n > 2$ werden nur in Ausnahmefällen realisiert.
- Die fortgesetzte Interpretation des gelesenen Speicherwortes als Adresse des nächsten Speicherwortes nennt man **Dereferenzieren**.
- Fortgesetztes Dereferenzieren ist u.a. zur Realisierung der logischen Programmiersprache PROLOG mittels der *Warren Abstract Machine* (WAM) wichtig.
- Bei der WAM wird die Anzahl der Referenzstufen durch Kennzeichen-Bits in den gelesenen Speicherworten bestimmt.

Übersicht

0-stufige Adressierung

Register-Adressierung

unmittelbare Adressierung

1-stufige Speicheradressierung (Referenzstufe 1)

direkte Adressierung, absolute Adressierung

Register-indirekte Adressierung

indizierte Adressierung, Basisadressierung

Programmzähler-relative Adressierung

2-stufige Adressierung (Referenzstufe 2, indirekte A.)

absolute Adressierung

Register-indirekte Adressierung

indizierte Adressierung

Programmzähler-relative Adressierung

n-stufige Adressierung (Referenzstufe $n > 2$)

n-Adressmaschinen

- Die 3-Adressmaschine (1) -

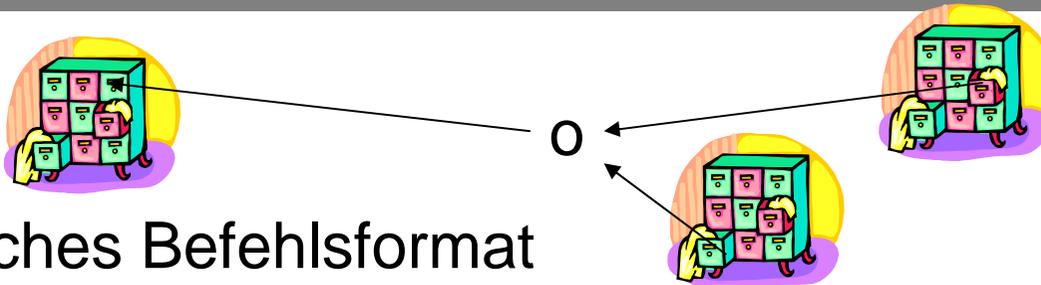
Klassifikation von Befehlssätzen bzw. Befehlen nach der Anzahl der Adressen bei 2-stelligen Arithmetik-Befehlen.

■ 3-Adressmaschinen, 3-Adressbefehle

IBM-Bezeichnung "SSS,,"; Befehle bewirken Transfer:

`Speicher[s1] := Speicher[s2] o Speicher[s3]`

`s1, s2, s3`: Speicheradressen, `o`: 2-stellige Operation.



Mögliches Befehlsformat

Opcode	s1	s2	s3
-------------	----	----	----

4x 32=128 Bit Befehlswordbreite

- Die 3-Adressmaschine (2) -

Anwendung: Zerlegung der Anweisung

$D = (A+B)*C;$

Mit a =Adresse von A , b =Adresse von B , usw.:

```
add t1, a,b    #Speicher[t1]:=Speicher[a]+Speicher[b]
```

```
mult d,t1,c    #Speicher[d]:=Speicher[t1]*Speicher[c]
```

Programmgröße: $2*128=256$ Bit

Speicherzugriffe: $2*3=6$

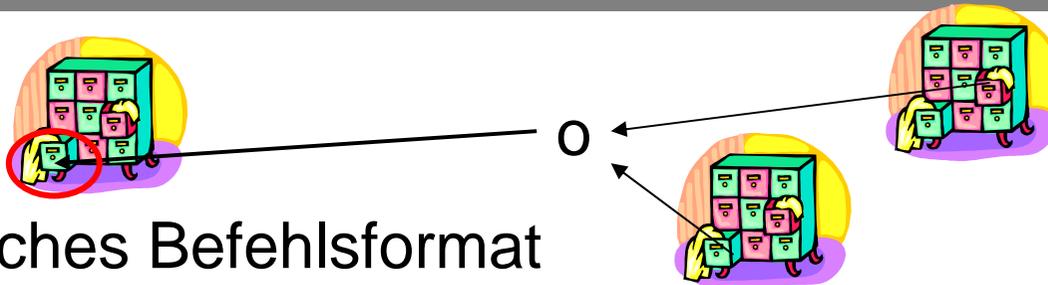
- 3-Adressbefehle im Compilerbau als Zwischenschritt benutzt.
- MIPS: 3-Adress-RRR-Format für Arithmetikbefehle.

Die 2-Adressmaschine (1)

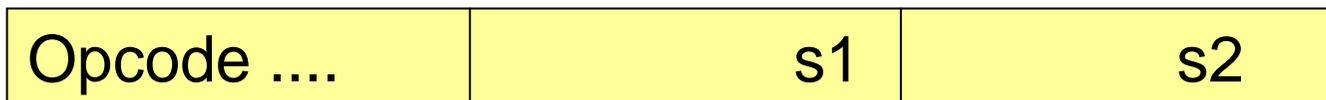
Verkürzung des Befehlswortes durch Überschreiben eines Operanden mit dem Ergebnis.

- **2-Adressmaschinen, 2-Adressbefehle**

IBM-Bezeichnung "SS,,"; Befehle bewirken Transfer der Form:
`Speicher[s1] := Speicher[s1] o Speicher[s2]`
mit `s1, s2`: Speicheradressen, `o`: 2-stellige Operation.



Mögliches Befehlsformat



3x 32=96 Bit Befehlswortbreite

Die 2-Adressmaschine (2)

Anwendung: Zerlegung der Anweisung

$D = (A+B)*C;$

Mit a =Adresse von A , b =Adresse von B , usw.:

```
move t1,a      #Speicher[t1]:=Speicher[a]
add  t1,b      #Speicher[t1]:=Speicher[t1]+Speicher[b]
mult t1,c      #Speicher[t1]:=Speicher[t1]*Speicher[c]
move d,t1      #Speicher[d]:=Speicher[t1]
```

Programmgröße: $4*96=384$ Bit

Speicherzugriffe: $2*3+2*2=10$

Die 1½-Adressmaschine (1)

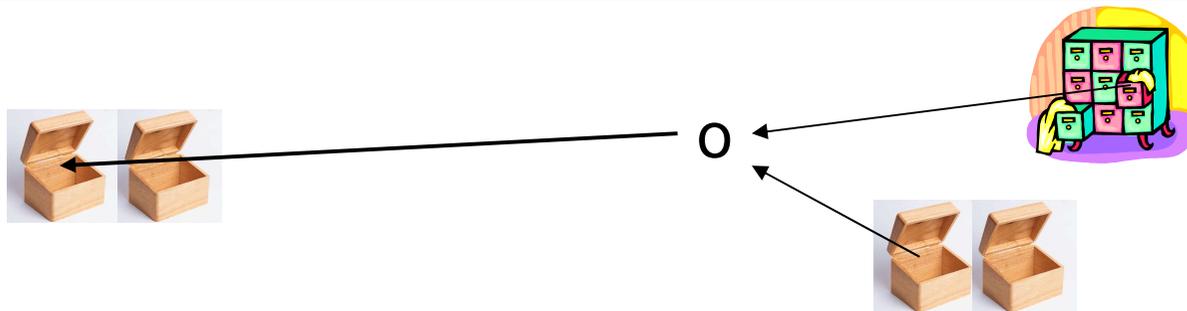
Weitere Verkürzung des Befehlswortes mit Registerspeichern

- **1½-Adressmaschinen, 1½-Adressbefehle**

IBM-Bezeichnung „RS“; Befehle bewirken Transfer der Form:

$\text{Reg}[r] := \text{Reg}[r] \circ \text{Speicher}[s]$

s : Speicheradresse, r : Registernummer, \circ : Operation



Mögliches Befehlsformat

Opcode	RegNr.	s
--------	--------	---

2x 32=64 Bit Befehlswortbreite

Enthält zusätzlich RR-
Befehle der Wirkung
 $\text{Reg}[r1] := \text{Reg}[r2]$

Die 1½-Adressmaschine (2)

Anwendung: Zerlegung der Anweisung

$D = (A+B)*C;$

Mit a=Adresse von A, b=Adresse von B, usw.:

```
lw,    $8, a    # Reg[8]:=Speicher[a]
```

```
add    $8, b    # Reg[8]:=Reg[8] + Speicher[b]
```

```
mult   $8, c    # Reg[8]:=Reg[8] * Speicher[c]
```

```
sw     $8, d    # Speicher[d]:=Reg[8]
```

Programmgröße: $4*64=256$ Bit

Speicherzugriffe: 4

Die 1-Adressmaschine (1)

Sonderfall der Nutzung von nur 1 Register („Akkumulator“)

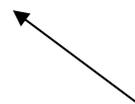
- **1-Adressmaschinen, 1-Adressbefehle**

Befehle bewirken Transfer der Form:

accu := accu o Speicher[s]

mit **s**: Speicheradresse

o: 2-stellige Operation (wie +, -, *, /).



Mögliches Befehlsformat

Opcode .	s
----------	---

2x 32=64 Bit Befehlswordbreite (i.d.R. kürzere Wortlänge)

Die 1-Adressmaschine (2)

Anwendung: Zerlegung der Anweisung

$D = (A+B)*C;$

Mit a =Adresse von A

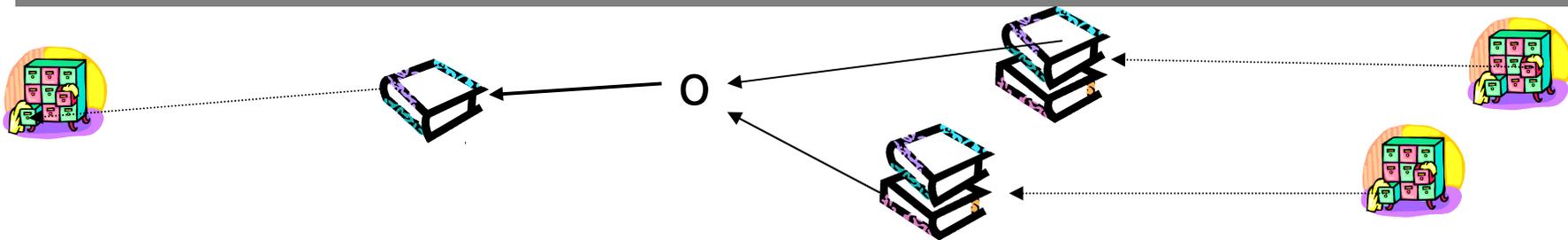
```
lw,   a    # accu := Speicher[a]
add   b    # accu := accu + Speicher[b]
mult  c    # accu := accu * Speicher[c]
sw    d    # Speicher[d] := accu
```

Programmgröße: $4*64=256$ Bit

Speicherzugriffe: 4

Die 0-Adressmaschine (1)

Arithmetische Operationen werden auf Stapel ohne Angabe der Operanden ausgeführt. Die 2 obersten Stapелеlemente werden verknüpft & durch das Ergebnis der Operation ersetzt.



- **0-Adressmaschinen, 0-Adressbefehle**

3 Sorten von Befehlen:

push a # `Speicher[a]` wird oberstes Stapелеlement

add # Addiere die beiden obersten Stapелеlemente und ersetze sie durch die Summe. Ähnlich für -, *, /

pop a # `Speicher[a] :=` oberstes Stapелеlement.
Entferne dieses Element vom Stapel.

Die 0-Adressmaschine (2)

Beispiel:

push a

push b

add

push c

mult

pop d

Stapel

Speicher

10	a
20	b
5	c
150	d

Mögliche Befehlsformate:
Arithmetik-Befehle: 1 Byte;
push, pop: 1 Byte+Adresse=5 Byte

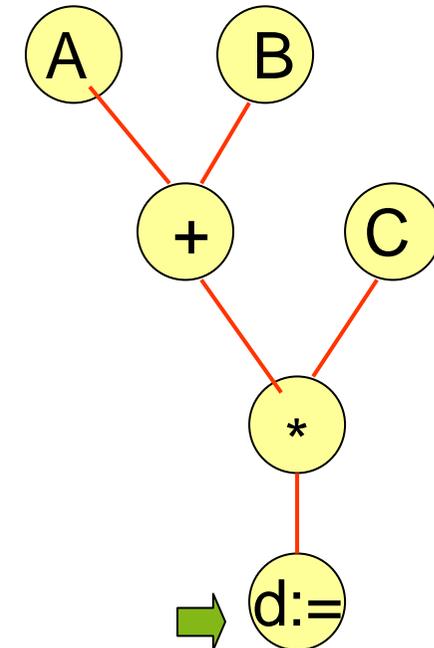
Programmgröße:
22 Byte=176 Bit,
4 Speicherzugriffe

Die 0-Adressmaschine (3)

Wie kommt man vom Ausdruck $D = (A+B)*C$; zur Befehlssequenz?

1. Verwendung der **postfix**-Notation:
 $AB+C*$

2. Mittels des Ausdrucksbaums:
GenerateCode(p)
{
 gehe zum linken Sohn;
 gehe zum rechten Sohn;
 erzeuge Befehl für aktuellen Knoten;
}



```
push a
push b
add
push c
mult
pop d
```

Zusammenfassung



Allgemeine Sicht auf die Befehlsschnittstelle

- Speichermodell
 - Hauptspeicher
 - *Endianess*
 - Registerspeicher
- Befehlssatz (*instruction set architecture, ISA*)
 - Befehlsgruppen
 - Referenzstufen
 - n-Adressmaschinen
 - RISC vs. CISC-Maschinen
- Interrupts

Klassifikation von Befehlssätzen

- *Reduced instruction set computers (RISC) (1)*-

Wenige, einfache Befehle wegen folgender Ziele:

- Hohe Ausführungsgeschwindigkeit
 - durch kleine Anzahl interner Zyklen pro Befehl
 - durch Fließbandverarbeitung (siehe 2.3.2)



Def.: Unter dem **CPI-Wert** (engl. ***cycles per instruction***) einer Menge von Maschinenbefehlen versteht man die mittlere Anzahl interner Bus-Zyklen pro Maschinenbefehl.

RISC-Maschinen: CPI möglichst nicht über 1.

CISC-Maschinen (s.u.): Schwierig, unter CPI = 2 zu kommen.

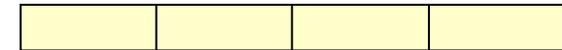
Programmlaufzeit = Anzahl der auszuführenden Befehle * CPI-Wert des Programms * Dauer eines Buszyklus

Klassifikation von Befehlssätzen

- *Reduced instruction set computers (RISC) (2)*-

Eigenschaften daher:

- feste Befehlswortlänge



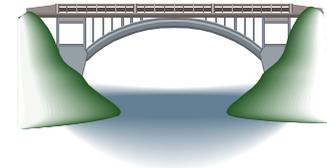
- LOAD/STORE-Architektur

ld \$2,...; ld \$3,...; add \$3,\$3,\$2; sw \$3

- einfache Adressierungsarten

z.B. keine indirekte Adr.

- „semantische Lücke“ zwischen Hochsprachen & Assemblerbefehlen durch Compiler überbrückt.



- Statt aufwändiger Hardware zur Beseitigung von Besonderheiten (z.B. 256 MB-Grenze bei MIPS, 16 Bit Konstanten) wird diese Aufgabe der Software übertragen.
- Rein in Hardware realisierbar („mit Gattern und Flip-Flops“)

Complex instruction set computers (CISC)

- ***Complex instruction set computers (CISC)***



Entstanden in Zeiten schlechter Compiler & großer

Geschwindigkeitsunterschiede Speicher / Prozessor

☞ Befehle sollten möglichst nahe an den Hochsprachen sein

(keine semantische Lücke)

☞ Mit jedem geholten Befehl sollte der Prozessor viel tun

☞ sehr komplexe Befehle

Complex instruction set computers (CISC)

Beispiel MC680x0 (1)



Beispiel: Motorola 68000 (erster Prozessor der 680x0-Serie)

Format des Kopierbefehls MOVE:

Opcode	Größe	Ziel		Quelle	
"00"	"01"=Byte, "11"=Wort, "10"=Doppelwort (32 Bit)	Register	Modus	Register	Modus
bis zu 4 Erweiterungsworte zu je 16 Bit					

Viele komplexe Adressierungsarten schon in den ersten Prozessoren der Serie.

Complex instruction set computers (CISC)

- Beispiel MC680x0 [ColdFire] (2) -

Modus	Register feld	Erweit.	Notation	Adressierung
"000"	n	0	Dn	Register-Adressierung
"001"	n	0	An	Adressregister-Adressierung
"010"	n	0	(An)	Adressregister indir.
"011"	n	0	(An)+	Adressreg. indirekt.mit <i>postincrement</i>
"100"	n	0	-(An)	Adressreg. indirekt.mit <i>predecrement</i>
"101"	n	1	d(An)	Relative Adressierung mit 16 Bit Distanz
"110"	n	1	d(An,Xm)	Register-relative Adressierung mit Index
"111"	"000"	1	d	direkte Adressierung (16 Bit)
"111"	"001"	2	d	direkte Adressierung (32 Bit)
"111"	"010"	1	d(*)	Programmzähler-relativ
"111"	"011"	1	d(*,Xn)	Programmzähler-relativ mit Index
"111"	"100"	1-2	#zahl	unmittelbare Adressierung

Complex instruction set computers (CISC)

- Eigenschaften -



- Relativ kompakte Codierung von Programmen
- Für jeden Befehl wurden mehrere interne Zyklen benötigt
 - Die Anzahl der Zyklen pro Befehl (der **cpi**-Wert) war groß
- (Mikro-) Programm zur Interpretation der Befehle nötig
- Compiler konnten viele Befehle gar nicht nutzen

Zusammenfassung



Allgemeine Sicht auf die Befehlsschnittstelle

- Speichermodell
 - Hauptspeicher
 - *Endianess*
 - Registerspeicher
- Befehlssatz (*instruction set architecture, ISA*)
 - Befehlsgruppen
 - Referenzstufen
 - n-Adressmaschinen
 - RISC vs. CISC-Maschinen
- Interrupts

Vorlesung Rechnerstrukturen, Teil 2

2 Rechnerarchitektur

2.2 Die Befehlsschnittstelle

2.2.2 Allgemeine Sicht der Befehlsschnittstelle

2.2.2.3 Unterbrechungen

Unterbrechungen

„Während der normalen Bearbeitung eines Programms kann es immer wieder zu **Ausnahme-Situationen** (engl. *exceptions*) kommen, die vom Prozessor aus eine vorübergehende Unterbrechung oder aber einen endgültigen Abbruch des Programms, also in jedem Fall eine Änderung des normalen Programmablaufs verlangen.“ (Zitat Bähring)

Beispiele:

- arithmetische Ausnahmen (div 0),
- Überläufe (sofern Ausnahmebehandlung eingeschaltet)
- ungültige Adresse
- Speicherschutz verletzt
- ...



Ablauf (bei MIPS)

Besser wäre ein separater *Interrupt-Stack* (wie MC68k):

1. Benutzer könnte *Stack-Pointer* ungültig setzen
2. Überschreiben des *Stack* kann Überraschung für Benutzer sein.

SPIM sichert daher in festen Speicherzellen!



PC →

add *
...

Retten benötigter Register
Fehlerbehandlung
Rückschreiben der Register
return from interrupt (rti) Befehl

gesicherte Register
Adresse des add-Befehls+4

0

..FFF..

* div prüft per SW auf div 0

\$29 →

ursprünglich belegter Teil des Stacks

Interrupts und Prozeduren (1)

- Interrupts entsprechen automatischem Aufruf von Prozeduren im Fall von Fehlern oder Ausnahmen.
- Hardwaremäßig erzeugter Aufruf entspricht einem `jal`-Befehl;
 - Zieladresse bestimmt sich aus der Unterbrechungsursache. Sofern diese mit der Unterbrechung direkt bekannt ist spricht man vom so genannten ***vectored interrupt***, sonst muss die Ursache erst über Statusabfragen bestimmt werden.
 - Rückkehradresse wird sofort auf dem Stapel[°] gespeichert.
- Benutzung des Stapels erlaubt verschachtelte, sogar rekursive* Unterbrechungen

[°] Alte Rechner benutzen eine feste Zelle pro Ursache (-> keine Rekursion).

* Wegen Problemen in der Realisierung meist ausgeschlossen.

Interrupts und Prozeduren (2)

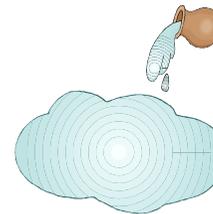
- Bei Vorliegen mehrerer Unterbrechungsursachen entscheidet deren **Priorität**, welche Ausnahmebehandlung zuerst gestartet wird.
- Interrupts können meist mit besonderen Befehlen **gesperrt** werden.
- Dem `jr $31` entspricht hier der `rti`-Befehl,
- Rückkehr-Adresse wird dem Stack entnommen



Synchrone und asynchrone Unterbrechungen

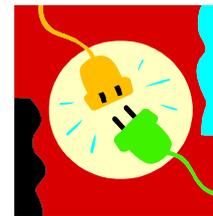
- Die Ausnahmesituationen können durch das aktuell ausgeführte Programm selber herbeigeführt werden. Die Unterbrechungen nennt man synchrone Unterbrechungen.

- Beispiel: Arithmetik-Überlauf



- Ausnahmesituationen können ohne Bezug zum aktuellen Programm sein. Ursachen sind in diesem Fall der Wunsch externer Systemkomponenten, vom Prozessor „bedient“ zu werden. Diese Unterbrechungen nennt man asynchrone Unterbrechungen.

- Beispiel: Netzausfall



Unterbrechung am Ende des laufenden Befehls oder bereits während der Bearbeitung ?

- In einigen Fällen ist ein Abbruch des laufenden Befehls erforderlich:

Beispiele: Speicherschutzverletzung,
illegaler Befehl



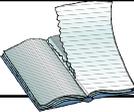
- In anderen Fällen kann bis zum Ende der Bearbeitung des laufenden Befehls gewartet werden:

Beispiele: alle asynchronen Unterbrechungen (es sei denn, die Bearbeitungszeit des Befehls ist sehr lang, wie z.B. bei Kopieren von großen Speicherblöcken mit einem Befehl).

Endgültiger Abbruch oder Fortfahren ?

- In einigen Fällen ist ein endgültiger Abbruch des laufenden Befehls erforderlich: Beispiele:
 - Speicherschutzverletzung,
 - illegaler Befehl
- In anderen Fällen ist ein Fortfahren in der Befehlsausführung erforderlich: Beispiel:
 - Automatische Seiteneinlagerung von der Platte

Übersicht über verschiedene Unterbrechungen

Klasse	Synchron?	Unterbrechung im Befehl ?
Ein-/Ausgabegerät	nein	nein 
Betriebssystems-Aufruf	ja	nein svc
TRACE-Befehl	ja	nein 
Überlauf	ja	ja 
Timer	nein	nein 
Seitenfehler	ja	ja (!) 
Schutz-Verletzung	ja	ja (!) 
Unimplementierter Befehl	ja	ja 
Hardware-Fehler	beides	ja 
Netzausfall	nein	nein (?) 

Systemaufrufe in der MIPS-Maschine

Aufruf von Funktionen des Betriebssystems per **supervisor call (SVC)**,

- Parameter in Registern

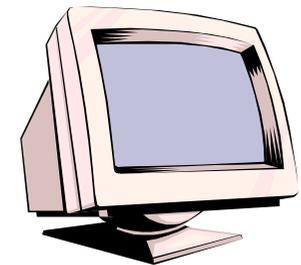


MIPS/SPIM: syscall, Servicenr. in \$v0 (= \$2)			
Servicename	Servicenr	Argumente	Ergebnis
print_int	1	\$a0 = integer	-
print_string	4	\$a0 = Adresse der Zeichenkette	-
read_int	5	-	\$v0
read_string	8	\$a0: Pufferadresse, \$a1: Pufferlänge	-
exit	10		-

Beispiel der Anwendung

```
.data
str: .asciiz "die Antwort ist: " # Nullbyte am Ende
.text
li $v0, 4          # Nummer des Systemaufrufs
la $a0, str        # Adresse der Zeichenkette
syscall           # Systemaufruf
li $v0, 1          # Nummer des Systemaufrufs
li $a0, 5          # integer
syscall           # Systemaufruf
```

- E/A bezieht sich hier auf das Terminal.
- MARS realisiert weitere SVC-Aufrufe, u.a. *file-I/O* (s. *Online-Doku*)



Realisierung von Systemaufrufen

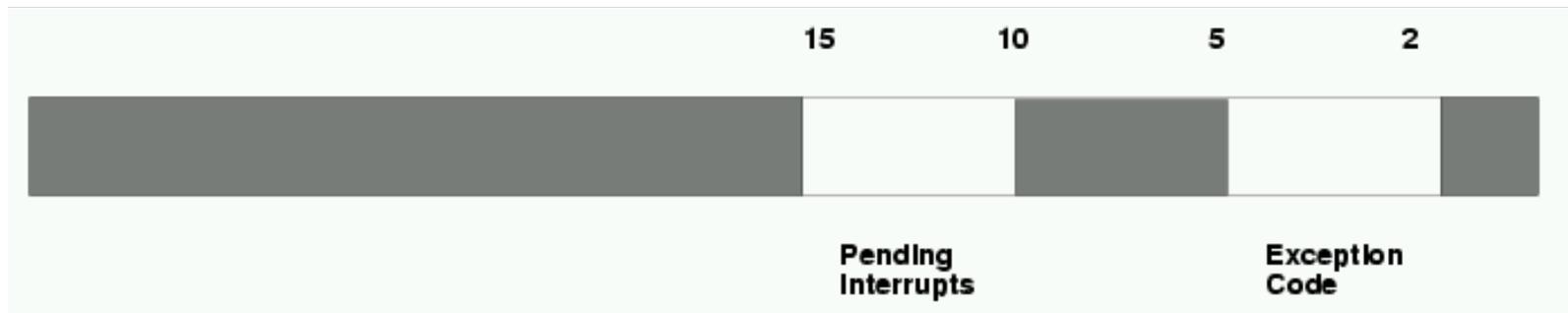
- „Normalerweise“: Aufruf eines hardwaremäßig nicht implementierten Befehls (MIPS: 0x0000000c); Hardware startet Unterbrechungsbehandlung; In der Behandlung: Erkennung des SVC-Aufrufs; Verzeigung an Routine innerhalb des *kernel*s.
- Beim Simulator: Simulation im Simulator selbst; dadurch keine Verzweigung in den *kernel*-Bereich erkennbar.

Unterbrechungen bei MIPS/SPIM

- Im Falle einer Ausnahme erfolgt ein Sprung an die Adresse x80000080
- Ein an dieser Adresse gespeicherter *Trap-Handler* muss die Unterbrechungsursache erfragen. Hierzu müssen Register des Coprozessors 0 gelesen werden.
- Hierzu vorhandene Befehle:
mfc0, mtc0, lwc0, swc0.

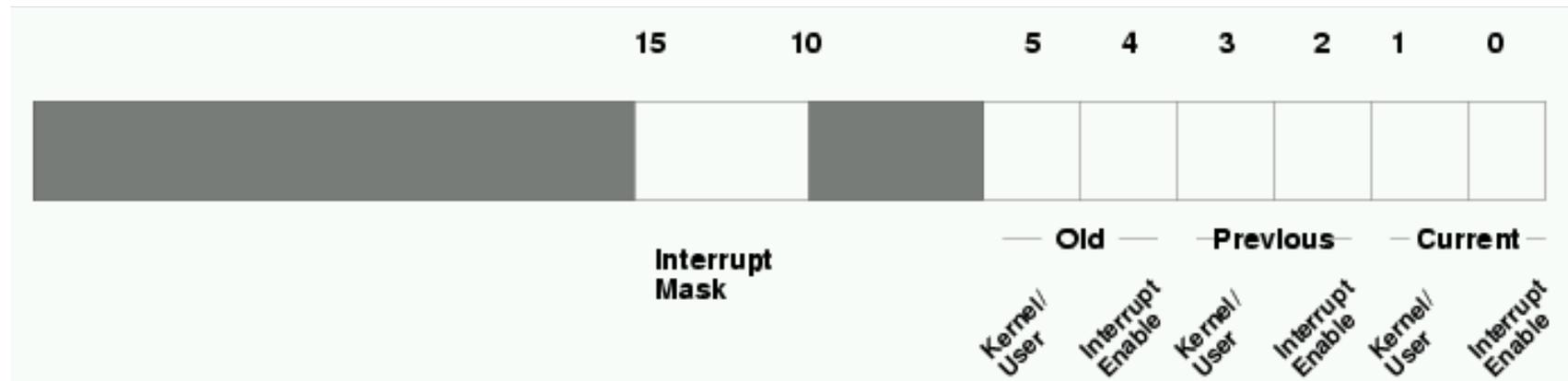
Register Name	Nummer	Benutzung
BadVAddr	8	Memory address of address exception
Status	12	Interrupt mask and enable bits
Cause	13	Exception type & pending interrupt bits
EPC	14	Address of instr. that caused exception

Coprozessorregister-Bedeutung - Cause-Register-

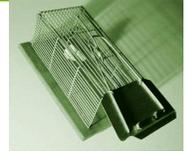


Number	Name	Description
0	INT	External interrupt
4	ADDRL	Address error exception (load or instruction fetch)
5	ADDRS	Address error exception (store)
6	IBUS	Bus error on instruction fetch
7	DBUS	Bus error on data load or store
8	SYSCALL	Syscall exception
9	BKPT	Breakpoint exception
10	RI	Reserved instruction exception
12	OVF	Arithmetic overflow exception

Coprozessorregister-Bedeutung - Status-Register-



SPIM-Traphandler



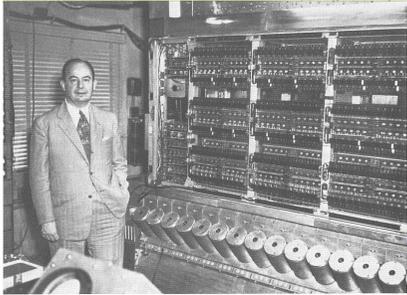
```
s1: .word 0           # Speicher zum Sichern von Registern;
s2: .word 0           # dto.
    .ktext 0x80000080 # Code gehört zum Kernel Textsegment
    .set noat         # keine Nutzung von $1 durch Assembler
move $k1 $at         # Retten von $1 in $27 (für Kernel)
    .set at          # Nutzung durch von $1 wieder möglich
sw $v0 s1           # Rette $v0 in feste Speicherzelle
sw $a0 s2           # Rette $a0 in feste Speicherzelle
                    # Nutzung von $1=$at, $v0 und $a0

mfc0 $k0 $13        # Lade Unterbrechungsursache
...                 # Verzweige abhängig von $k0
...                 # Lösche Ursachenregister
lw $v0 s1           # Rückschreiben von $v0
lw $a0 s2           # Rückschreiben von $a0
    .set noat
move $at $k1        # Restore $at
    .set at
rfe                 # Restaurieren von Statusregistern
mfc0 $k0 $14        # Hole alten Wert des PC
addiu $k0 $k0 4     # Erhöhe um 4
jr $k0              # Führe unterbrochenes Programm fort
```

Wiedereintrittsfähiger Code (*reentrant code*)

- Während einer Unterbrechungsbehandlung kann eine weitere Unterbrechungsbehandlung erforderlich werden (Beispiel: Schutzverletzung während einer Unterbrechungsbehandlung).
- Solche Behandlungen entsprechen rekursiven Prozedurbehandlungen; man müsste Registerinhalte und Variablen auf einem Stapel speichern.
- Unterbrechungsbehandlungen, die selbst wieder unterbrochen werden können, heißen **wiedereintrittsfähig** (engl. *re-entrant* bzw. *reentrant*).
- Der Standard-*Trap*-Handler des SPIM ist nicht *reentrant*, da Register in festen Speicherzellen gesichert werden.



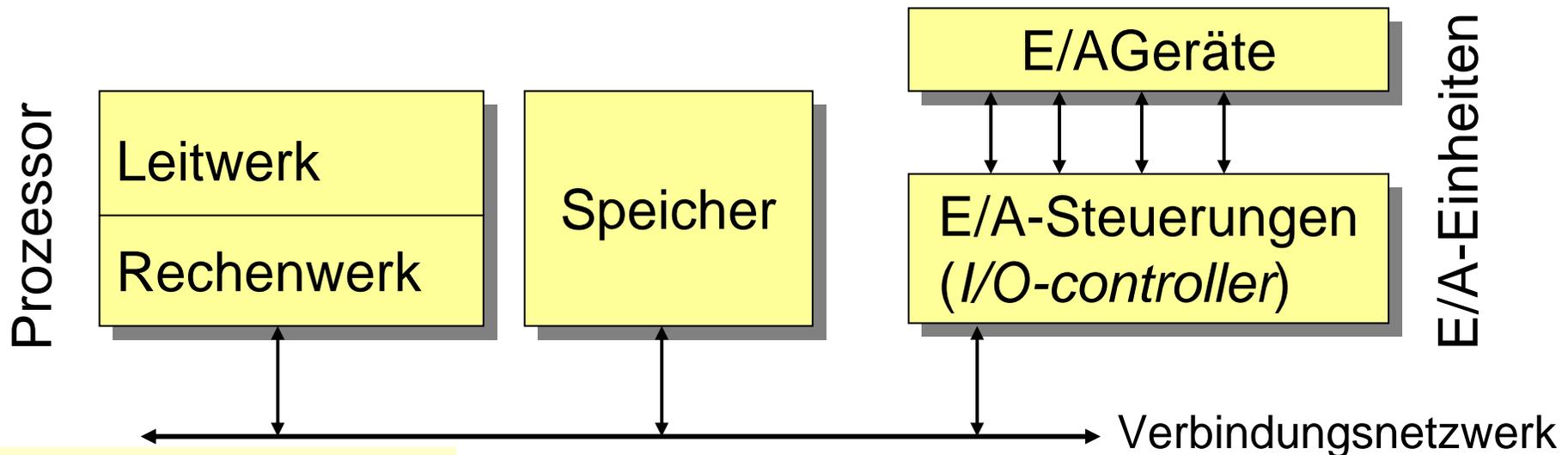


Das Von Neumann-Modell



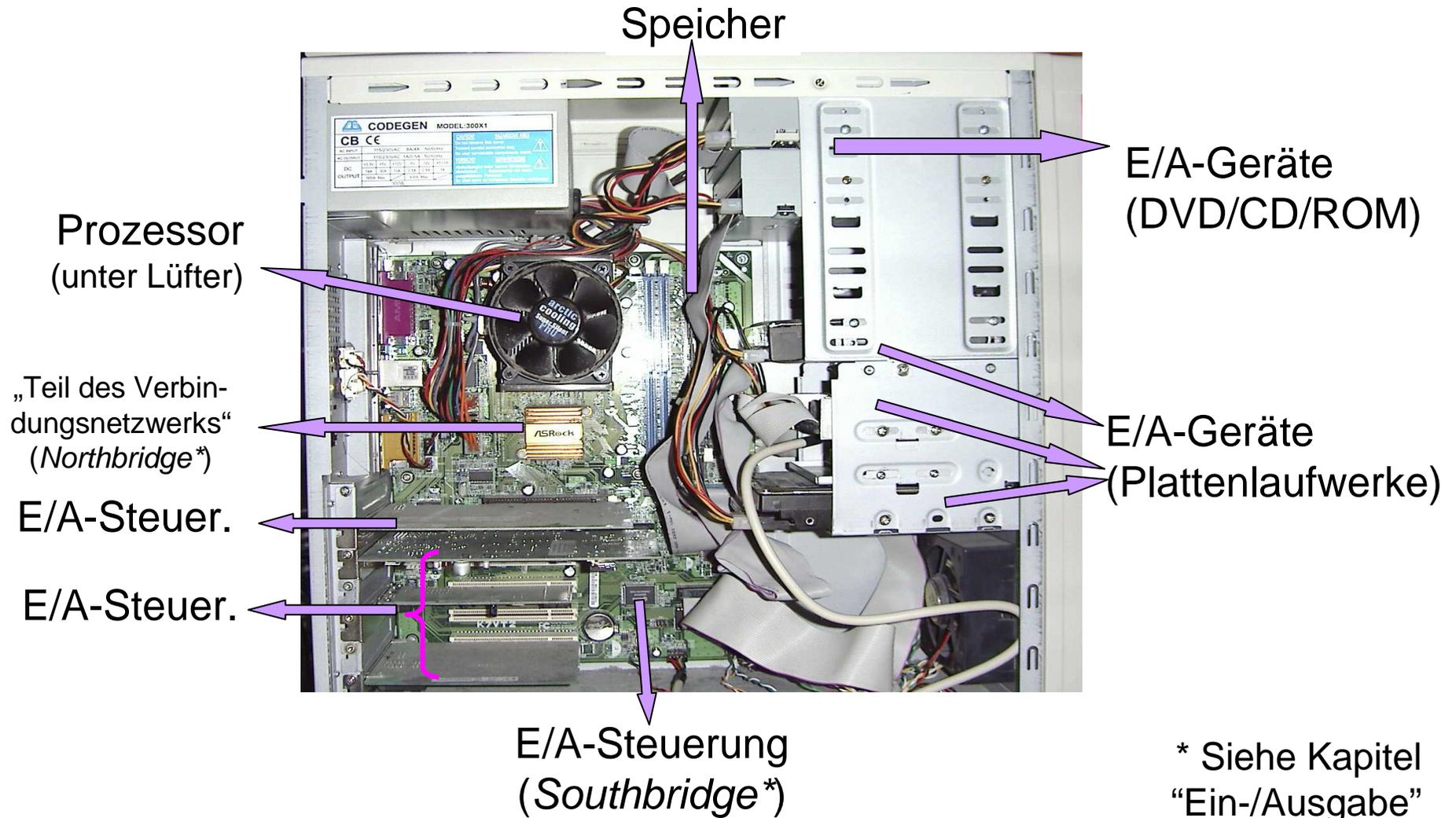
Fast alle der heute üblichen Rechner gehen auf den **Von Neumann-Rechner** mit folgenden Eigenschaften zurück:

1. Die Rechanlage besteht aus den Funktionseinheiten **Speicher**, **Leitwerk** (bzw. Steuerwerk, engl. *controller*), dem **Rechenwerk** (engl. *data path*) und **Ein/Ausgabe-Einheiten**.



* http://kaluza.physik.uni-konstanz.de/a/gesch/1_25.jpg

Wo sind diese Komponenten auf PC-Boards?



Das Von Neumann-Modell (2)

2. Die Struktur der Anlage ist unabhängig vom bearbeiteten Problem. Die Anlage ist **speicherprogrammierbar**.
3. **Anweisungen und Operanden** (einschl. Zwischenergebnissen) werden **in demselben physikalischen Speicher** gespeichert.
4. Der Speicher wird in **Zellen gleicher Größe** geteilt. Die Zellnummern heißen **Adressen**.
5. Das Programm besteht aus einer Folge von elementaren Befehlen, die **in der Reihenfolge der Speicherung bearbeitet werden**.
6. Abweichungen von der Reihenfolge sind mit (bedingten oder unbedingten) **Sprungbefehlen** möglich.



Das Von Neumann-Modell (3)

7. Es werden **Folgen von Binärzeichen** (nachfolgend Bitvektoren genannt) verwendet, um alle Größen darzustellen.
8. Die Bitvektoren erlauben **keine explizite Angabe des repräsentierten Typs**. Aus dem Kontext muss stets klar sein, wie die Bitvektoren zu interpretieren sind.

Alternative:

Typ	Wert
-----	------

Zusammenfassung (Abschnitt)



Allgemeine Sicht auf die Befehlsschnittstelle

- Speichermodell
 - Hauptspeicher, *Endianness*, Registerspeicher
- Befehlssatz (*instruction set architecture, ISA*)
 - Befehlsgruppen, Referenzstufen
 - n-Adressmaschinen, RISC vs. CISC-Maschinen
- Interrupts
 - Ablauf, Vergleich mit Prozeduren
 - Synchrone und asynchrone Interrupts
 - Systemaufrufe
 - Wiedereintrittsfähiger (*reentrant*) Code
- Von-Neumann-Rechner (Übersicht)

Zusammenfassung (Kapitel)



- Modellierung von Rechnern auf verschiedenen Ebenen:
 - der Assemblerebene
 - der Maschinensprachenebene, ...
- MIPS-Assembler- und Maschinensprachenebene
 - Arithmetische, logische und Sprungbefehle
- Übersetzung einer Programmiersprache in Assembler
 - Schleifen, Prozeduren
- Allgemeine Betrachtung der sog. *instruction set architecture* (ISA)
 - Speichermodell, Maschinenbefehle, Unterbrechungen
- Charakterisierung der Von-Neumann-Maschine