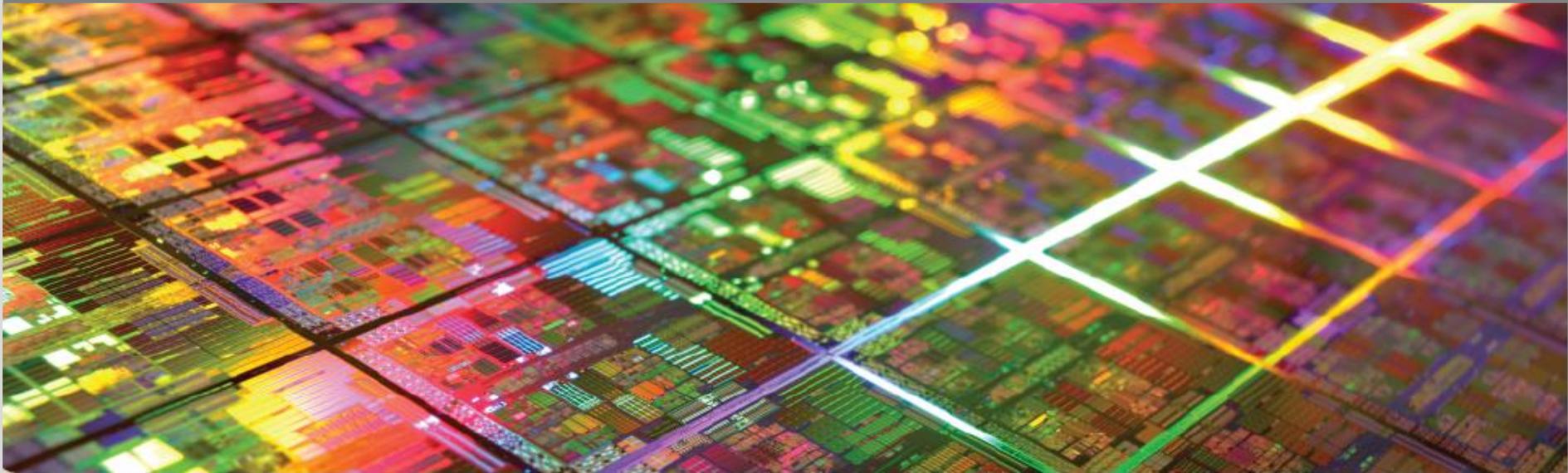


Rechnerstrukturen

Vorlesung im Sommersemester 2016

Prof. Dr. Wolfgang Karl

Institut für Technische Informatik (ITEC), Lehrstuhl für Rechnerarchitektur und Parallelverarbeitung



Vorlesung Rechnerstrukturen

- **Kapitel 4: Vektorverarbeitung**
- 4.1 Grundlagen

Einführung

- **Wie arbeiten Vektorprozessoren?**
- Ein Beispiel: $Y = a * X + Y$,
 - wobei X und Y Vektoren sind und a eine Konstante ist.
 - Bildet die innere Schleife des Linpack-Benchmarks und wird auch als SAXPY (Single Precision $a \times X$ plus Y) bzw. DAXPY (Double Precision $a \times X$ plus Y) bezeichnet.
 - Für alle i , $i = \text{Anzahl der Elemente des Vektors } X \text{ und des Vektors } Y$, ergibt sich der neue Wert für $Y[i]$ aus der Multiplikation von a mit $X[i]$ und der Addition des Zwischenergebnisses mit $Y[i]$

Einführung

- **Wie arbeiten Vektorprozessoren?**
- Ein Beispiel: $Y = a * X + Y$,
- In MIPS-Notation

	L.D	F0,a	;in Rx bzw. Ry Startadresse von X,Y
	DADDIU	R4,Rx,#512	;load scalar a
Loop:	L.D	F2,0(Rx)	;last address to load
	MUL.D	F2,F2,F0	;load X(i)
	L.D	F4,0(Ry)	;a × X(i)
	ADD.D	F4,F4,F2	;load Y(i)
	S.D	0(Ry),F4	;a × X(i) + Y(i)
	DADDIU	Rx,Rx,#8	;store into Y(i)
	DADDIU	Ry,Ry,#8	;increment index to X
	DSUBU	R20,R4,Rx	;increment index to Y
	BNEZ	R20,Loop	;compute bound
			;check if done

Einführung

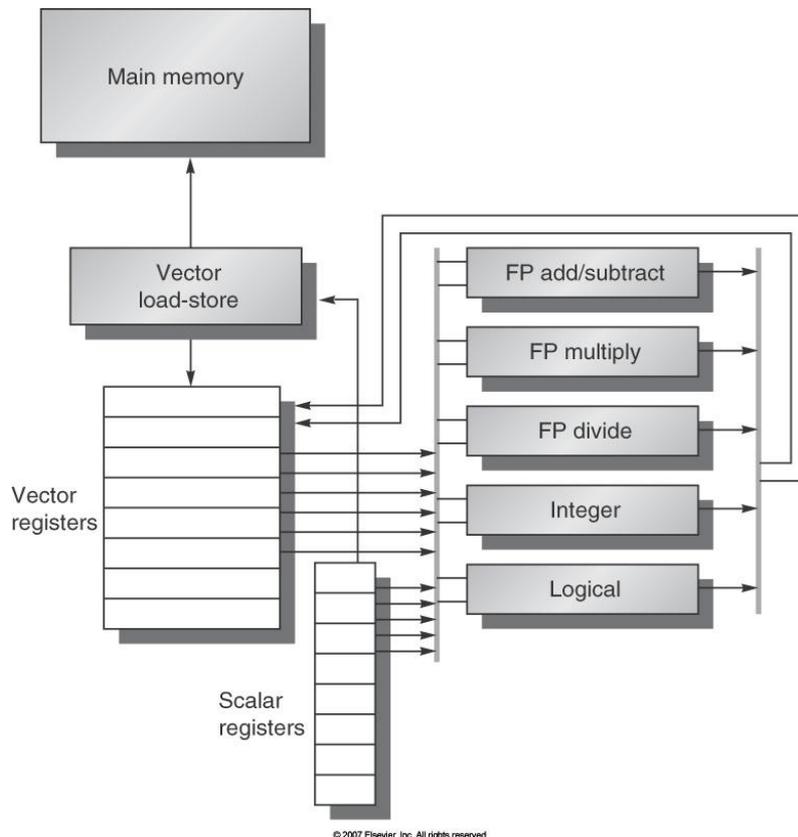
- **Wie arbeiten Vektorprozessoren?**
- Ein Beispiel: $Y = a * X + Y$,
- Analyse:
 - Die Schleife wird ungefähr 600 Mal durchlaufen.
 - Hoher Aufwand:
 - In einem Schleifendurchlauf werden jeweils die Elemente von X und Y addiert und nach der Berechnung wird das Ergebnis gespeichert. Die Adressen werden aktualisiert und das Abbruchkriterium wird geprüft.
 - Beachte Konflikte aufgrund von Datenabhängigkeiten
 - Beachte Multizyklus-Operationen
 - Pipeline-Stalls können durch Compiler-Optimierungen wie Loop-Unrolling und Software-Pipelining reduziert werden

Einführung

- **Wie arbeiten Vektorprozessoren?**
- Ein Beispiel: $Y = a * X + Y$,
- Idee der Vektor-Prozessoren: SIMD-Verarbeitung
 - Verarbeitung von Vektoren in einem Rechenwerk mit Pipeline-artig aufgebauten Funktionseinheiten
 - Bereitstellung von Vektoroperationen

Einführung

- Wie arbeiten Vektorprozessoren?
- Idee der Vektor-Prozessoren: SIMD-Verarbeitung



Beispielprogramm mit Vektoroperationen:

```

L.D      F0,a      ;load scalar a
LV       V1,Rx     ;load vector X
MULVS.D V2,V1,F0  ;vector-scalar multiply
LV       V3,Ry     ;load vector Y
ADDV.D  V4,V2,V3  ;add
SV       Ry,V4    ;store the result
  
```

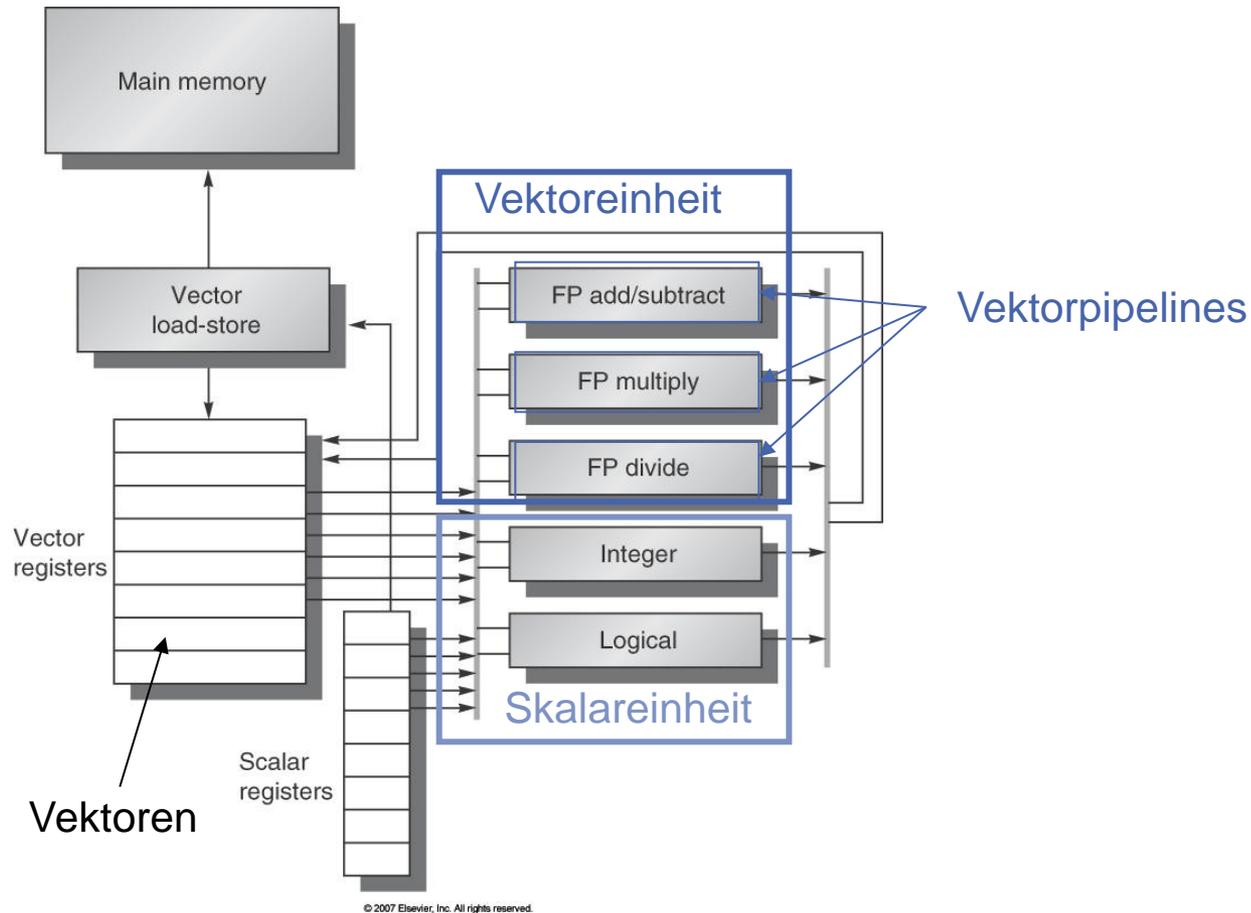
Einführung

■ Vektorprozessor:

- Unter einem Vektorprozessor (Vektorrechner) versteht man einen Rechner mit pipelineartig aufgebautem/n Rechenwerk/en zur Verarbeitung von Arrays von Gleitpunktzahlen.
- Vektor = Array (Feld) von Gleitpunktzahlen
- Jeder Vektorrechner besitzt in seinem Rechenwerk einen Satz von Vektorpipelines. Dieses wird als Vektoreinheit bezeichnet.
- Im Gegensatz zur Vektorverarbeitung wird die Verknüpfung einzelner Operanden als Skalarverarbeitung bezeichnet.
- Ein Vektorrechner enthält neben der Vektoreinheit auch noch eine oder mehrere Skalareinheiten. Dort werden die skalaren Befehle ausgeführt, d.h. Befehle, die nicht auf ganze Vektoren angewendet werden sollen.
- Die Vektoreinheit und die Skalareinheit(en) können parallel zueinander arbeiten, d.h. Vektorbefehle und Skalarbefehle können parallel ausgeführt werden.

Einführung

■ Vektorprozessor:



Einführung

■ Vektorprozessor:

- Die Pipeline-Verarbeitung wird mit einem Vektorbefehl für zwei Felder von Gleitpunktzahlen durchgeführt.
- Die bei den Gleitpunkteinheiten skalarer Prozessoren nötigen Adressrechnungen entfallen.

Beispielprogramm mit Vektoroperationen:

```
L.D          F0,a      ;load scalar a
LV           V1,Rx     ;load vector X
MULVS.D     V2,V1,F0  ;vector-scalar multiply
LV           V3,Ry     ;load vector Y
ADDV.D      V4,V2,V3  ;add
SV           Ry,V4    ;store the result
```

Einführung

- Vektorprozessor:
- Vektorbefehle

Instruktion	Operanden	Funktion
ADDV.D ADDVS.D	V1,V2,V3 V1,V2,F0	Add elements of V2 and V3, then put each result in V1. Add F0 to each element of V2 , then put each result in V1.
SUBV.D SUBVS.D SUBSV.D	V1,V2,V3 V1,V2,F0 V1,F0,V2	Subtract elements of V3 from V2, then put each result in V1. Subtract F0 from elements of V2, then put each result in V1. Subtract elements of V2 from F0, then put each result in V1.
MULV.D MULVS.D	V1,V2,V3 V1,V2,F0	Multiply elements of V2 and V3, then put each result in V1. Multiply each element of V2 by F0, then put each result in V1.
DIVV.D DIVVS.D DIVSV.D	V1,V2,V3 V1,V2,F0 V1,F0,V2	Divide elements of V2 by V3, then put each result in V1. Divide elements of V2 by F0, then put each result in V1. Divide F0 by elements of V2, then put each result in V1.
LV	V1,R1	Load vector register V1 from memory starting at address R1.
SV	R1,V1	Store vector register V1 into memory starting at address R1.
LVWS	V1,(R1,R2)	Load V1 from address at R1 with stride in R2, i.e., $R1+i \times R2$.
SVWS	(R1,R2),V1	Store V1 from address at R1 with stride in R2, i.e., $R1+i \times R2$.
LVI	V1,(R1+V2)	Load V1 with vector whose elements are at $R1+V2(i)$, i.e., V2 is an index.

Einführung

- Vektorprozessor:
- Vektorbefehle

Instruktion	Operanden	Funktion
SVI	(R1+V2),V1	Store V1 to vector whose elements are at R1+V2(i), i.e., V2 is an index.
CVI	V1,R1	Create an index vector by storing the values 0, 1 × R1, 2 × R1,...,63 × R1 into V1.
S--V.D S--VS.D	V1,V2 V1,F0	Compare the elements (EQ, NE, GT, LT, GE, LE) in V1 and V2. If condition is true, put a 1 in the corresponding bit vector; otherwise put 0. Put resulting bit vector in vector-mask register (VM). The instruction S--VS.D performs the same compare but using a scalar value as one operand.
POP	R1,VM	Count the 1s in the vector-mask register and store count in R1.
CVM		Set the vector-mask register to all 1s.
MTC1 MFC1	VLR,R1 R1,VLR	Move contents of R1 to the vector-length register. Move the contents of the vector-length register to R1.
MVTM MVFM	VM,F0 F0,VM	Move contents of F0 to the vector-mask register. Move contents of vector-mask register to F0.

Einführung

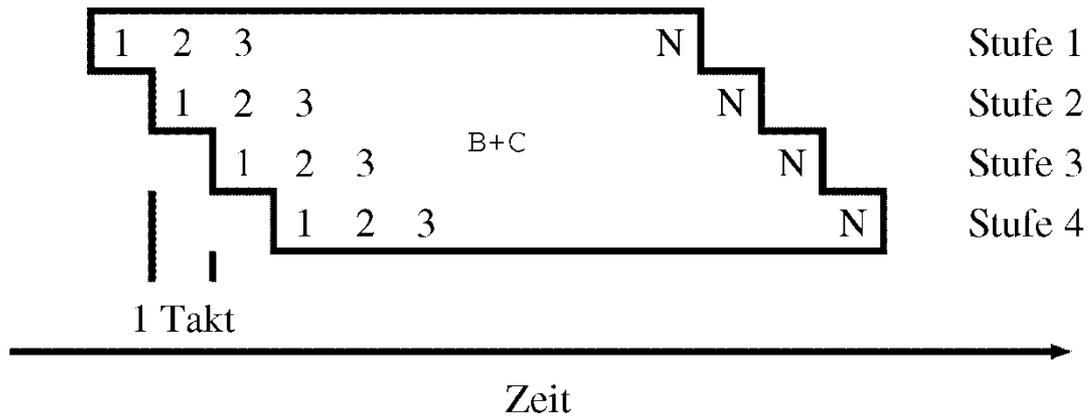
■ Vektorprozessor:

■ Pipelining

- Bei ununterbrochener Arbeit in der Pipeline kann man nach einer gewissen Einschwingzeit bzw. Füllzeit, die man braucht, um die Pipeline zu füllen, mit jedem Pipeline-Takt ein Ergebnis erwarten.
- Dabei ist die Taktdauer durch die Dauer der längsten Teilverarbeitungszeit zuzüglich der Stufentransferzeit gegeben.
- Beispiel Gleitkomma-Operationen:
 - Laden eines Paares von Gleitpunktzahlen aus Vektorregister
 - Vergleichen der Exponenten und Verschieben einer Mantisse
 - Addition der ausgerichteten Mantissen
 - Normalisieren des Ergebnisses und Schreiben in Zielregister

Einführung

- Vektorprozessor:
- Pipelining
 - Beispiel: $B[i] + C[i]$ mit $i = 1, 2, \dots, N$



Quelle: T. Ungerer: Parallelrechner und parallele Programmierung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1997

Einführung

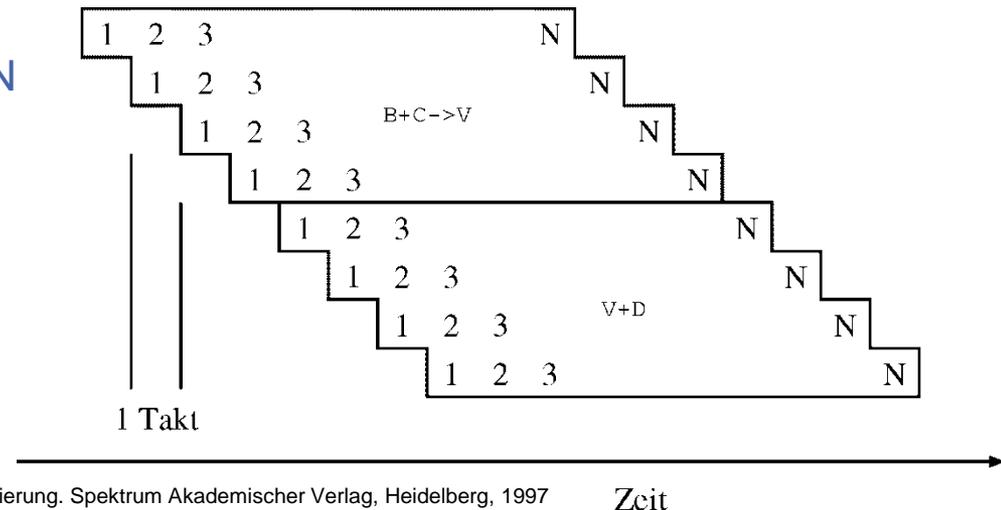
■ Vektorprozessor:

■ Verkettung

- Das Pipeline-Prinzip kann auch auf eine Folge von Vektoroperationen erweitert werden.
- Zu diesem Zweck werden die (spezialisierten) Pipelines miteinander verkettet,
- d.h. die Ergebnisse einer Pipeline werden sofort der nächsten Pipeline zur Verfügung gestellt.

■ Beispiel:

- $B[i] * C[i] + D[i]$ mit $i = 1, 2, \dots, N$

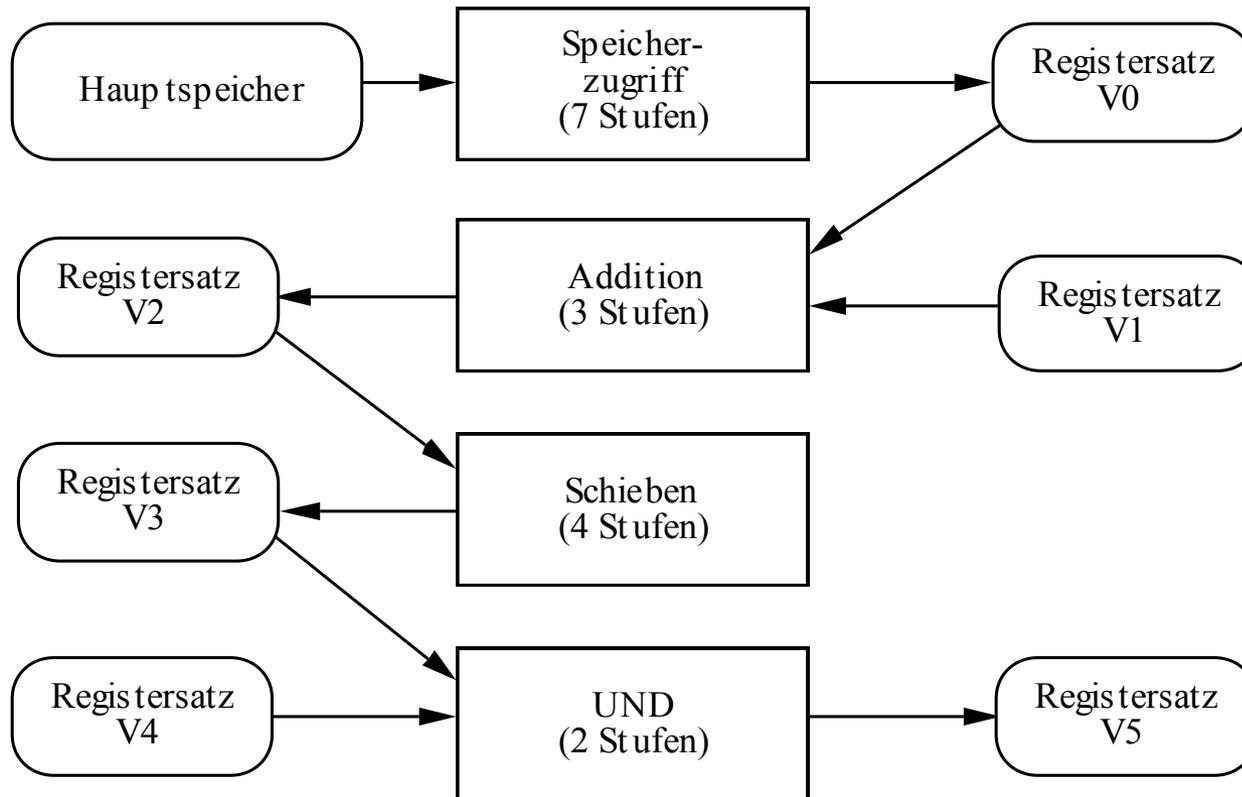


Quelle: T. Ungerer: Parallelrechner und parallele Programmierung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1997

Zeit

Einführung

- Vektorprozessor:
- Verkettung



Quelle: T. Ungerer: Parallelrechner und parallele Programmierung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1997

Einführung

- **Vektorprozessor:**
- Multifunktions- oder spezialisierte Pipelines
 - Zur Realisierung der arithmetisch-logischen Verknüpfung von Vektoren verwendet man entweder so genannte Multifunktions-Pipelines oder eine Anzahl von spezialisierten Pipelines.
- Multifunktions-Pipelines
 - Der Aufbau einer Multifunktions-Pipeline erfordert eine höhere Stufenzahl, als sie zur Durchführung einer Verknüpfungsoperation notwendig wäre. Für die gerade aktuelle Operation werden alle nicht benötigten Stufen der Pipeline übersprungen.
- Spezialisierte Pipelines
 - Durchführung von speziellen Funktionen benutzt.
 - Hardware und Steuerung sind relativ einfach.
 - Man benötigt mehrere unabhängige Pipelines, um alle wichtigen Verknüpfungen durchführen zu können.

Einführung

- **Parallelarbeit in einem Vektorrechner**
- Vektor-Pipeline-Parallelität:
 - durch die Stufenzahl der betrachteten Vektor-Pipeline gegeben
- Mehrere Vektor-Pipelines in einer Vektoreinheit:
 - Vorhandensein mehrerer, meist funktional verschiedener Vektor-Pipelines in einer Vektoreinheit, durch Verkettung hintereinander geschaltet
- Vervielfachung der Pipelines:
 - Vektor-Pipeline vervielfachen, so dass, bei Ausführung eines Vektorbefehl pro Takt nicht nur ein Paar von Operanden in eine Pipeline, sondern jeweils ein Operandenpaar in zwei oder mehr parallel arbeitende gleichartige Pipelines eingespeist werden.
- mehrere Vektoreinheiten,
 - die parallel zueinander nach Art eines speichergekoppelten Multiprozessors arbeiten.

Einführung

- **Parallelarbeit in einem Vektorrechner**
- Parallelitätsebenen in der Software
 - Vektor-Pipeline-Parallelität wird durch die Vektorisierung der innersten Schleife mittels eines vektorisierenden Compilers genutzt.
 - Mehrere Vektor-Pipelines in einer Vektoreinheit können durch Verkettung von Vektorbefehlen oder durch einen Vektor-Verbundbefehl (beispielsweise Vector-Multiply-Add) genutzt werden.
 - Bei der Vervielfachung der Pipelines (beispielsweise vier Vektoradditions-Pipelines, die mittels eines VADD-Befehls gleichzeitig aktiviert werden) geschieht die Vektorisierung wieder über die innerste Schleife
 - Das Vorhandensein mehrerer Vektoreinheiten wird durch ähnliche Parallelisierungsmechanismen wie für speichergekoppelte Multiprozessoren genutzt
 - Beispiel:
 - Aufteilung der Iterationen einer äußeren Schleife auf verschiedene Vektoreinheiten, welche die innere Schleife vektorisiert.

Einführung

- **Parallelarbeit in einem Vektorrechner**
- **Speicherverschränkung (Memory Interleaving)**
 - Technik, um die Zugriffsgeschwindigkeit auf den Hauptspeicher stärker an die Verarbeitungsgeschwindigkeit der CPU anzupassen.
- **Parallelisierung der Speicherzugriffe**
 - Speicher wird in n Speichermodule (oder Speicherbänke) M_0, \dots, M_{n-1} unterteilt und jede Speicherbank mit einer eigenen Adressierlogik versehen.
 - Verteilung auf n Speicherbänke nennt man n -fache Verschränkung.
 - Der Zugriff auf die Speicherplätze erfolgt zeitlich verschränkt.

Einführung

- **Parallelarbeit in einem Vektorrechner**
- **Speicherverschränkung (Memory Interleaving)**
 - **Verschränkungsregel**
 - Verteilung der Speicherplätze auf Speicherbänke Speicherplatz A_i wird in der Speicherbank M_j gespeichert, genau dann wenn $j=i \bmod n$
 - Zuteilung
 - der Adressen A_0, A_n, A_{2n}, \dots auf die Speicherbank M_0 ,
 - der Adressen $A_1, A_{n+1}, A_{2n+1}, \dots$ auf die Speicherbank M_1 ,
 - etc.
 - **n-fache Verschränkung:** nach einer gewissen Anlaufzeit werden in jedem Speicherzyklus n Speicherworte geliefert.

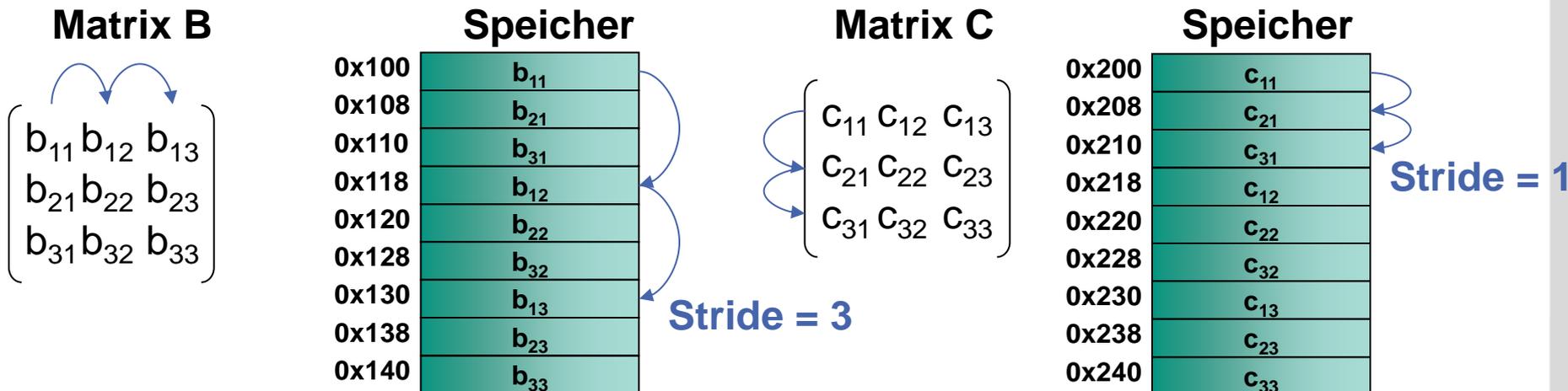
Vorlesung Rechnerstrukturen

- **Kapitel 4: Vektorverarbeitung**
- 4.1 Eigenschaften

Vektorrechner

■ Vektor Stride

- Problem: die Elemente eines Vektors liegen nicht in aufeinander folgenden Speicherzellen
- Beispiel: Matrix-Multiplikation (k=3)



Berechnung: $b_{11} * c_{11} + b_{12} * c_{21} + b_{13} * c_{31} \dots$

Vektorrechner

■ Vektor Stride

- Abstand zwischen Elementen, die in einem Register abgelegt werden müssen
- Beispiel:
 - bei spaltenweiser Ablage der Daten im Speicher ist die der Stride für die Matrix C gleich 1 (oder 1 Doppelwort) und für die Matrix B gleich 3 (oder 3 Doppelwörter)
- Vektorprozessoren mit Vektorregister können Strides größer 1 verarbeiten:
 - Vektorlade- und Vektrospeicherbefehle mit „Stride-Capability“
 - Zugriff auf nicht sequentielle Speicherzellen und Umformen in dichte Struktur

Vektorrechner

■ Vektor Stride

■ Problem:

- Stride-Wert ist erst zur Laufzeit bekannt oder kann sich ändern

■ Lösung

- Ablegen des Stride-Wertes in ein Allzweckregister
- Vektorspeicherzugriffsbefehle greifen auf den Wert zu

■ Problem:

- Zugriff auf eine Speicherbank erfolgt häufiger als es die Zugriffszeit der Bank erlaubt
- Anhalten des Zugriffs, wenn:

■ In heutigen Vektorrechnern:

- Verteilen der Zugriffe von jedem Prozessor über mehrere Hundert von Speicherbänken

Vektorrechner

■ Bedingt ausgeführte Anweisungen

■ Problem:

- Programme mit if-Anweisungen in Schleifen können nicht vektorisiert werden:
- Kontrollflussabhängigkeiten!
- Beispiel:

```
do 100 i=1, 64
    if (A(i).ne. 0) then
        A(i) = A(i) -B(i)
    endif
100 continue
```

■ Lösung

- Bedingt ausgeführte Anweisungen
- Umwandlung von Kontrollflussabhängigkeiten in Datenabhängigkeiten

Vektorrechner

- **Bedingt ausgeführte Anweisungen**
- Vektor-Maskierungssteuerung
 - verwendet einen Boole'schen Vektor der Länge der festgelegten MVL (maximale Vektorlänge), um die Ausführung eines Vektorbefehls zu steuern, in ähnlicher Weise wie bedingt ausgeführte Befehle eine Boole'sche Bedingung verwenden, um zu bestimmen, ob eine Instruktion ein gültiges Ergebnis liefert oder nicht
- Vektor-Mask-Register
 - jede ausgeführte Vektorinstruktion arbeitet nur auf den Vektorelementen, deren Einträge eine 1 haben. Die Einträge im Zielvektorregister, die eine 0 im entsprechenden Feld des VM Registers haben, werden nicht verändert

Vektorrechner

- **Bedingt ausgeführte Anweisungen**
- **Vektor-Maskierungssteuerung**
 - **Beispiel:**

```
LV      V1,Ra      ;load vector A into V1
LV      V2,Rb      ;load vector B
L.D     F0,#0      ;load FP zero into F0
SNEVS.D V1,F0      ;sets VM(i) to 1 if V1(i) != F0
SUBV.D  V1,V1,V2   ;subtract under vector mask
CVM     ;set the vector mask to all 1s
SV      Ra,V1     ;store the result in A
```

Vektorrechner

■ Dünn besetzte Matrizen

- Elemente eines Vektors werden in einer komprimierten Form im Speicher abgelegt
- Beispiel:

```
do 100 i = 1,n
100      A(K(i)) = A(K(i)) + C(M(i))
```

- implementiert die Summe der dünn besetzten Felder A und C mit Hilfe der Indexvektoren K und M. K und M zeigen jeweils die Elemente von A und C an, die nicht 0 sind.
- Alternative Darstellung ist die Verwendung von Bit-Vektoren

Vektorrechner

- **Dünn besetzte Matrizen**
- SCATTER-GATHER Operationen mit Index-Vektoren
 - unterstützen den Transport zwischen der gepackten Darstellung und der normalen Darstellung dünn-besetzter Matrizen
- GATHER-Operation
 - verwendet Index-Vektor und holt den Vektor, dessen Elemente an den Adressen liegen, die durch Addition einer Basisadresse und den Offsets im Index-Register berechnet werden
 - Nicht gepackte Darstellung im Vektorregister
- SCATTER-Operation
 - Speichern der gepackten Darstellung

Vektorrechner

- Dünn besetzte Matrizen
- SCATTER-GATHER Operationen mit Index-Vektoren

```

LV   Vk, Rk           ;load K
LVI  Va, (Ra+Vk)      ;load A(K(I))
LV   Vm, Rm           ;load M
LVI  Vc, (Rc+Vm)      ;load C(M(I))
ADDV.D Va, Va, Vc     ;add them
SVI  (Ra+Vk), Va      ;store A(K(I))
  
```

- Problem für vektorisierenden Compiler: konservative Annahmen wegen Speicherreferenzen
 - Verwendung einer Software-Hash Tabelle
 - erkennt, wenn zwei Elemente innerhalb einer Iteration auf dieselbe Adresse zeigen

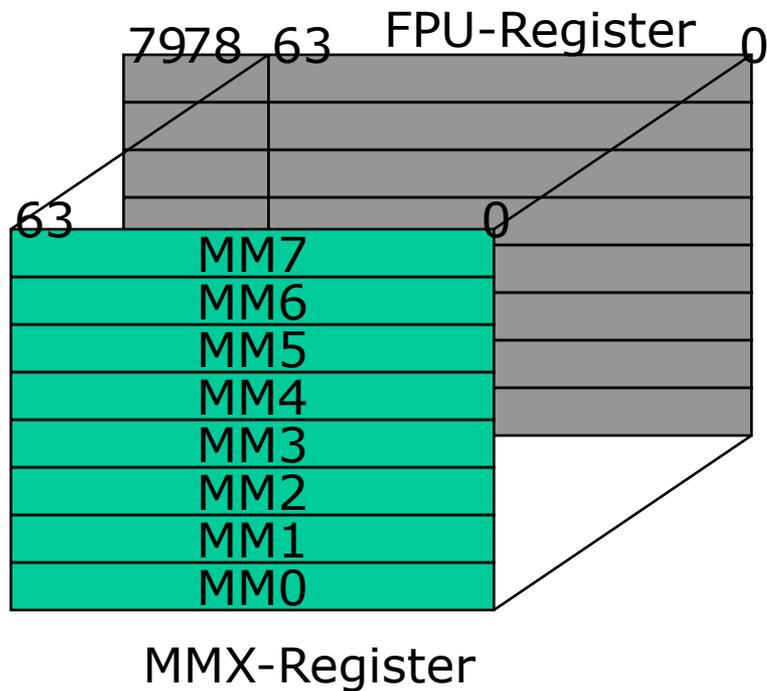
Vorlesung Rechnerstrukturen

- **Kapitel 4: Vektorverarbeitung**
- 4.3 SIMD-Verarbeitung in Mikroprozessoren

SIMD-Verarbeitung

■ Beispiel Intel MMX-Technologie

- MMX-Register, abgebildet auf FPU-Register

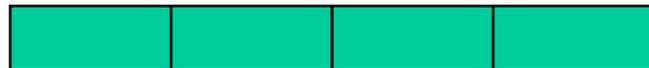


SIMD-Verarbeitung

- **Beispiel Intel MMX-Technologie**
 - MMX-Datentypen und Formate



Packed Byte Integers



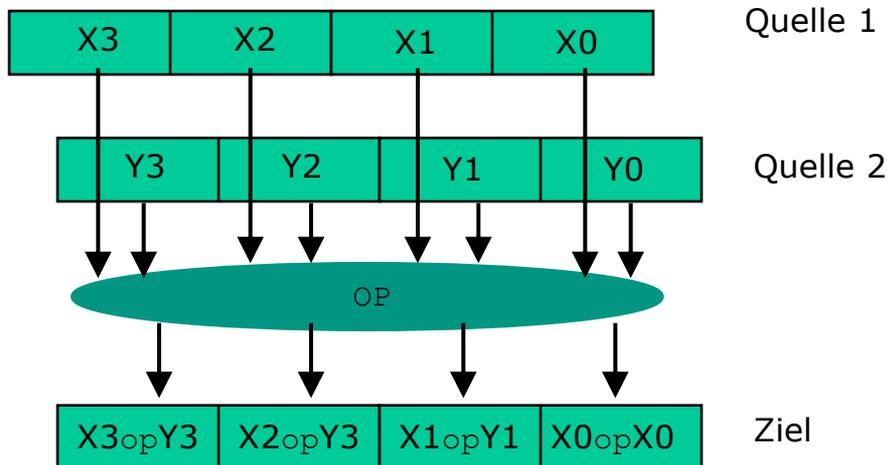
Packed Word Integers



Packed Doubleword Integers

SIMD-Verarbeitung

- Beispiel Intel MMX-Technologie
 - SIMD-Verarbeitung



SIMD-Verarbeitung

■ Beispiel Intel MMX-Technologie

- SIMD-Verarbeitung
- PCMPGTW-Befehl auf Wortoperanden (Vergleich größer als)

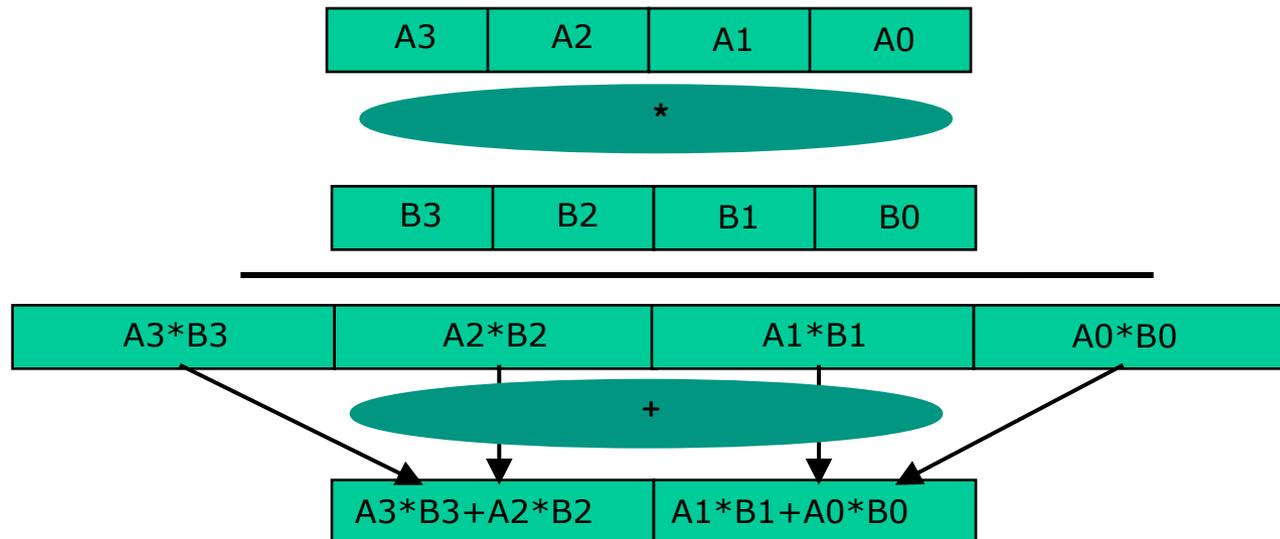


SIMD-Verarbeitung

■ Beispiel Intel MMX-Technologie

■ SIMD-Verarbeitung

- **PMADDWD**-Befehl auf Wortoperanden, Ergebnis im Doppelwort (Multiply and add)



SIMD-Verarbeitung

■ Beispiel Intel MMX-Technologie

■ Saturation Arithmetik

- Algorithmen in der graphischen Datenverarbeitung vermeiden Überlauf und Unterlauf bei der Addition und Subtraktion von nicht vorzeichenbehafteten Pixeln
- Übergang zum größten oder kleinsten darstellbaren Wert

$$\begin{array}{r} 10101010 \\ + 11001100 \\ \hline 11111111 \end{array}$$

- Keine Überprüfung, ob Über- oder Unterlauf des Zahlenbereichs, keine Ausnahmeverarbeitung

SIMD-Verarbeitung

■ Beispiel Intel MMX-Technologie

- Beispiel: Chroma keying („bluebox“ Technik)
 - Überlagerung des Bildes einer Frau auf ein Bild mit einer Blume mit Hilfe eines blauen Hintergrundes
 - x: Bild der Frau auf dem blauen Hintergrund
 - y: Blumenbild
 - new_image: neues Bild



```

for (i=0; i<image_size; i++) {
    if (x[i]==blue) new_image[i]=y[i]
        else      new_image[i]=x[i]
}
  
```

SIMD-Verarbeitung

■ Beispiel Intel MMX-Technologie

■ Beispiel: Chroma keying („bluebox“ Technik)

■ MMX Befehlsfolge

```

movq    mm3, mem1    #load 8 pixels from woman's image (addr. mem1)
movq    mm4, mem2    #load 8 pixels from flower's image (addr. mem2)
pcmpeqb mm1, mm3     #gen. Selection bit mask into mm1 (orig. „blue“)
pand    mm4, mm1     #AND; use the bit mask for cond. select into mm4.
pandn   mm1, mm3     #(NOT mm1) AND mm3; -- into mm1
por     mm4, mm1     #OR; result into mm4
  
```

pcmpeqb mm1, mm3

mm1	blue	blue	blue	blue	blue	blue	blue	blue
mm3	x7!=blue	x6!=blue	x5=blue	x4=blue	x3!=blue	x2!=blue	x1=blue	x0=blue
mm1	0x0000	0x0000	0xFFFF	0xFFFF	0x0000	0x0000	0xFFFF	0xFFFF



pand mm4, mm1

mm4	y7	y6	y5	y4	y3	y2	y1	y0
mm1	0x0000	0x0000	0xFFFF	0xFFFF	0x0000	0x0000	0xFFFF	0xFFFF
mm4	0x0000	0x0000	y5	y4	0x0000	0x0000	y1	y0

pandn mm1, mm3

mm1	0x0000	0x0000	0xFFFF	0xFFFF	0x0000	0x0000	0xFFFF	0xFFFF
mm3	x7	x6	x5	x4	x3	x2	x1	x0
mm1	x7	x6	0x0000	0x0000	x3	x2	0x0000	0x0000

por mm4, mm1

mm1	x7	x6	y5	y4	x3	x2	y1	y0
-----	----	----	----	----	----	----	----	----

