



Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Technische Informatik
Prof. Dr. Wolfgang Karl

Klausur Rechnerstrukturen
Sommersemester 2010
Aufgabenteil

Aufgabe 1: Quantifizierung

10P

Kriterien zur Leistungsbewertung

3 P

In der Vorlesung haben Sie im Rahmen der Leistungsbewertung zwei Sichten auf ein Rechensystem kennengelernt. Nennen Sie diese und je zwei zu der jeweiligen Sicht gehörige Kriterien zur Leistungsbewertung.

Leistungsbewertung

3P

Ein Programm wird auf einem Prozessor mit einer Taktfrequenz von 500 MHz ausgeführt und weist die folgenden Kenngrößen bei der Ausführung auf:

Befehl	Anzahl in 10^3	Zyklenzahl
Integer-Arithmetik	2.250	2
Fließkomma-Arithmetik	250	6
Speicherzugriff	200	5
Kontrollflußtransfer	300	10

Da eine der Anwendungen des Prozessors die Kryptographie ist, wird Ihnen vorgeschlagen, die Fließkommaeinheit durch eine spezielle Einheit zur Beschleunigung kryptographischer Operationen zu ersetzen. Durch den Einsatz der Kryptoeinheit verringert sich die Anzahl der benötigten Zyklen für Integeroperationen auf 1.000.000. Allerdings müssen nun die Fließkommaoperationen durch Integeroperationen emuliert werden, wodurch sich zusätzliche 4.000.000 Zyklen für diese Operationen ergeben. Die Kryptoeinheit selbst benötigt für die speziellen Operationen 1.000.000 Zyklen (1 Zyklus pro Operation). Die restlichen Kenngrößen seien unverändert.

- Stellen Sie das System mit Fließkommaeinheit dem System mit Kryptoeinheit gegenüber, indem Sie die MIPS-Werte und die Ausführungszeiten berechnen. 2P
- Wie groß ist der für die spezielle Anwendung erzielte Speedup gegenüber dem ursprünglichen System? Welches System schlagen Sie vor und warum? 1P

Benchmarks zur Leistungsbewertung

4 P

In der Vorlesung wurde die SPEC-Benchmark-Suite vorgestellt.

- In welche zwei Gruppen werden die Benchmarks der SPEC CPU2006 Benchmark-Suite unterteilt und welche Leistungsaspekte werden jeweils bewertet? 1P
- Die Benchmarks werden zur Bewertung der Geschwindigkeit eines Rechensystems herangezogen. Welche zwei Optimierungsstufen gibt es und wozu dienen diese? 1P
- Wie lautet die Formel zum Errechnen des Gesamtwerts für eine der unter (c) gesuchten Gruppen von Benchmarks? Welchen Vorteil hat diese Vorgehensweise gegenüber dem Bilden des arithmetischen Mittels? 1P
- Bei einer weiteren Form der Benchmarks handelt es sich um sogenannte *Kernels*. Erklären Sie den Begriff und nennen Sie einen Vertreter, den Sie in der Vorlesung kennengelernt haben. 1P

Aufgabe 2: Fragen des Rechnerentwurfs

10P

Low-Power-Entwurf

3P

- a) Zur Ermittlung des Leistungsverbrauchs einer CMOS-Schaltung wird häufig die Formel

$$P_{\text{Gesamt}} = P_{\text{Switching}} + P_{\text{Static}} + P_{\text{Leakage}} + P_{\text{Shortcircuit}}$$

angewandt. Wie setzt sich der Anteil für die Schaltleistung ($P_{\text{Switching}}$) genauer zusammen? Erläutern Sie den Zusammenhang kurz.

- b) Zur Ermittlung der Schaltwahrscheinlichkeit einer Schaltung wird häufig ein statistisches Modell herangezogen. Geben Sie die allgemeine Formel zur Berechnung der Schaltwahrscheinlichkeit $\mathbb{P}_{\text{Schalt}}$ an und berechnen Sie diese für ein Oder-Gatter mit $\mathbb{P}_{\text{Eingang 1}}(1) = \frac{1}{4}$ und $\mathbb{P}_{\text{Eingang 2}}(1) = \frac{3}{4}$.

Schaltungsentwurf

7P

- c) Beim Schaltungsentwurf findet eine Verfeinerung in drei Bereichen statt. Um welche Verfeinerungen handelt es sich hier? Geben Sie eine kurze Erklärung oder ein Beispiel zu den einzelnen Verfeinerungen.
- d) Wesentliche Bestandteile einer VHDL-Beschreibung sind die Entity, Architecture, Configuration und der Prozess. Welche Funktion besitzen diese Teile jeweils?
- e) Gegeben ist folgende VHDL-Beschreibung eines Prozesses.

```

1  process (rst , clk) is
2  begin
3      if (rst='1') then
4          count <= 0;
5          flag <= '0';
6      elsif (clk'event and clk='1') then
7          count <= count + 1;
8          if (count(5 downto 0)=63) then
9              flag <= '1';
10         else
11             flag <= '0';
12         end if;
13     end if;
14 end process;
```

Beschreiben Sie das Verhalten der Schaltung verbal.

Wie ändert sich das Verhalten, wenn der `if`-Block aus Zeile 8–12 vor die Zuweisung von `count` in Zeile 7 verschoben wird? Begründen Sie.

Aufgabe 3: Prozessorarchitektur

10P

Pipelining und Leistungsbewertung

5P

- a) Geben Sie die Formeln für die Ausführungszeit T jeweils für den Fall mit einer k -stufigen Pipeline und ohne Pipeline bei n Befehlen an. Berechnen Sie den durch Pipelining erzielten Speedup S . 1,5P
- b) Eine Prozessorarchitektur A verfüge über eine 6-stufige Pipeline, auf der ein Benchmark mit 10.000.000 Befehlen ausgeführt werde, wobei 3% der Befehle einen Datenkonflikt verursachen, der jeweils mit 2 zusätzlichen Zyklen behoben wird, und 8% der Befehle Sprungbefehle sind, die zu einer Verzögerung von jeweils 3 Takten führen. Berechnen Sie die effektive Ausführungsdauer T in Takten sowie Sekunden für eine Taktrate von 2,6 GHz, den erzielten Speedup gegenüber sequentieller Ausführung und den CPI-Wert. 2,5P
- c) Eine weitere Prozessorarchitektur B arbeite den gleichen Benchmark mit einem CPI-Wert von 1,1 bei gleicher Anzahl von Instruktionen innerhalb von 7 ms ab. Welche Architektur wählen Sie aus, wenn Sie ein kostengünstiges Rechenzentrum ausstatten sollen mit einer der beiden Architekturen? Nehmen Sie an, dass die Anschaffungskosten für beide Architekturen gleich seien. Begründen Sie. 1P

Sprungvorhersage

3P

- d) Skizzieren Sie den Aufbau eines (1,1)-Korrelationsprädiktors mit globaler Indizierung. 1,5P
- e) Gegeben sei ein (1,1)-Korrelationsprädiktor mit Tabelleneinträgen, die jeweils mit *Not Taken* (NT) initialisiert seien; das globale Sprungverlaufsregister sei mit *Taken* (T) belegt. Vervollständigen Sie die auf dem Lösungsblatt befindliche Tabelle. Pro korrekter Zeile erhalten Sie 0,5P. 1,5P

Superskalartechnik**2P**

- f) Untenstehend finden Sie den Zustand der Registerstatustabelle und Reservation Stations zum Zeitpunkt $t = 4$ der Abarbeitung des in Listing 1 dargestellten Programmcodes. Geben Sie den Zustand der Reservation Stations und der Registerstatustabelle nach Ablauf eines weiteren Takts, d.h. $t = 5$, an unter Berücksichtigung des nachfolgenden Codefragments, wenn pro Takt ein Befehl in die Reservation Stations eingetragen werden kann.

Hinweis: Die Addition/Subtraktion benötige einen Taktzyklus, während Multiplikation eine Latenz von 4 Zyklen und Division eine Latenz von 9 Zyklen aufweisen.

	Takt	Programmcode
	1	mul R1, R3, R5
	2	sub R2, R4, R3
	3	div R6, R1, R4
→	4	add R4, R2, R3
	5	sub R3, R1, R5

Listing 1

(Format: Opcode Ziel, Quelle1, Quelle2)

Registerstatustabelle:

Register	1	2	3	4	5	6
Wert	-	(R4)-(R3)	(R3)	-	(R5)	-
Gültig?	0	1	1	0	1	0
Reservation Station (RS#)	3	0	0	2	0	4

Reservation Stations:

RS#	Leer	In FU	Opcode	Ziel	Quelle1	Gültig1	RS1	Quelle2	Gültig2	RS2
1 Addierer	1	1	sub	2	(R4)	1	0	(R3)	1	0
2 Addierer	0	0	add	4	(R4)-(R3)	1	0	(R3)	1	0
3 Multiplizierer	0	1	mul	1	(R3)	1	0	(R5)	1	0
4 Dividierer	0	0	div	6		0	3	(R4)	1	0

Aufgabe 4: Parallelverarbeitung

10P

Verbindungsstrukturen

4P

- a) In der Vorlesung haben Sie das IBM BlueGene/P-System „JUGENE“ des Forschungszentrums Jülich kennengelernt. 2P

Als eines von 5 Verbindungsnetzen besitzt dieses System ein 3D-Torus-Netzwerk. Gehen Sie von einem idealisierten 3D-Torus mit gleichen Kantenlängen und $N = n^3$ Knoten aus:

- Wie groß ist bei diesem Netzwerktyp der Verbindungsgrad, der Diameter und die minimale Bisektionsbreite?
- Wie ist die Skalierbarkeit, wenn bei einer Erweiterung die gleichen Kantenlängen des 3D-Torus nicht beibehalten werden müssen?

- b) Wieso verfügt das JUGENE-System zusätzlich über das sogenannte „Collective Network“? 1P

- c) Welcher bekannten Permutation entspricht das Grundmuster der einzelnen Stufen eines Omega-Netzwerks? 1P

Quantitative Maßzahlen

3P

- d) Die Ausführungszeit eines parallelen Programms auf einem dediziert zugeordneten Parallelrechner setzt sich aus drei Teilen zusammen. Geben Sie hierfür die Formel an und benennen Sie die Teile. 1P

- e) Ein Programm wird auf einer großen Anzahl Prozessoren ausgeführt. Es zeigt sich jedoch nicht die gewünschte Beschleunigung. Wodurch wird die erreichbare Beschleunigung beschränkt? Leiten Sie zur Erklärung mit Hilfe von Amdahls Gesetz eine einfache Formel her. 2P

Vektorverarbeitung

3P

- f) Was versteht man in der Vektorverarbeitung unter einem Vektor? 1P

- g) In Vektorrechnern werden verschiedene Methoden eingesetzt, um Parallelität auf unterschiedlichen Ebenen auszunutzen. Geben Sie für die angegebenen Beispiele die jeweils passende Methode an: 2P

1. Vektorisierung der innersten Schleife mittels eines vektorisierenden Compilers
2. Verkettung von Vektorbefehlen oder Vektor-Verbundbefehle (z.B. Vector-Multiply-Add)
3. Parallele Ausführung eines einzelnen Vektorbefehls mit verschiedenen Teilen der Vektordaten
4. Parallelisierungsmechanismen ähnlich denen für speichergekoppelte Multiprozessoren (z.B. Aufteilung der Iterationen einer äußeren Schleife)

Aufgabe 5: Speicherhierarchie

10P

Cache-Leistung

3P

Gegeben sei ein Mikroprozessorsystem mit einer Taktfrequenz von $f = 2$ GHz, einem Level-1 Instruktionen-Cache, einem Level-1 Daten-Cache und einem Hauptspeicher. Die Zugriffszeit der beiden Caches beträgt $t_{L1} = 2$ ns, die des Hauptspeichers $t_{Mem} = 100$ ns. Der Cache verwendet das Copy-Back-Verfahren. Bei der Ausführung einer einfachen Anwendung erfolgten 10.000 Zugriffe auf den Instruktionen-Cache und 5.000 Zugriffe auf den Datencache.

- Welche Vorteile hat die Aufteilung des L1-Caches in einen Instruktionen- und einen Daten-Cache gegenüber einem einzelnen, uniformen L1-Cache, wenn man die Befehlsabarbeitung mit einer RISC-Pipeline zugrundelegt? 1P
- Welche effektive Hitrate ergibt sich für die Level-1-Caches aus Sicht des Hauptspeichers? Berechnen Sie hierfür zunächst die Anzahl der Hauptspeicherzugriffe unter der Annahme, dass die Hit-Rate des Instruktionen-Caches $r_{L1I} = 90\%$ und des Daten-Caches $r_{L1D} = 60\%$ beträgt. 1P
- Geben Sie eine allgemeine Formel zur Berechnung t_a der mittleren Zugriffszeit in einem Speichersystem mit einer einstufigen Cache-Hierarchie an. 0.5P
- Berechnen Sie die mittlere Zugriffszeit des Systems. 0.5P

Cache-Kohärenzprotokoll

7P

- Auf welchem Konzept basiert das MESI-Kohärenzprotokoll und was ist hierfür die technische Grundvoraussetzung? 1P
- Eine Cachezeile eines Caches in einem Mehrkernrechner sei als E markiert. Als Kohärenzprotokoll komme MESI zu Einsatz. Welche Ereignisse führen zu einem Zustandswechsel? Nennen Sie diese Ereignisse und geben Sie jeweils den neuen Zustand an. 2P

Ein Dreiprozessorsystem sei speichergekoppelt. Die Caches haben je eine Größe von zwei Cachezeilen, welche je genau ein Speicherwort aufnehmen können. Die Füllung der Caches erfolgt von der niedrigsten Cachezeile aufwärts, sofern noch freie Zeilen zur Verfügung stehen, andernfalls wird gemäß LRU-Strategie verdrängt. Als Cache-Kohärenzprotokoll komme das MESI-Protokoll zum Einsatz.

- Vervollständigen Sie die auf dem Lösungsblatt angegebene Tabelle: Geben Sie jeweils Inhalt der Cache-Zeile und MESI-Zustand an. 4P

Aufgabe 6: Fehlertoleranz

10P

- a) Fehler werden unterschieden nach Dauer und Ort. Wie lässt sich die Fehlerdauer genauer spezifizieren? 1P
- b) Das Systemausfallverhalten lässt sich in drei Kategorien einteilen. Welche sind dies und wie sind sie zu charakterisieren? 3P

Ein Flugzeug bestehe aus zwei Bedieneinheiten B_1 und B_2 , zwei Triebwerken T_1 und T_2 , einem Seitenleitwerk S und einem Höhenruder H . Zum Betrieb des Flugzeugs sind eine beliebige Bedieneinheit, ein beliebiges Triebwerk sowie das Seitenleitwerk und das Höhenruder notwendig.

- c) Zeichnen Sie das Zuverlässigkeitsblockdiagramm des Flugzeugs. 1P
- d) Stellen Sie die Systemfunktion SF des Flugzeugs auf. 1P
- e) Stellen Sie die Formel zur Berechnung der Funktionswahrscheinlichkeit für das Flugzeug ($\varphi(SF)$) basierend auf den Funktionswahrscheinlichkeiten $\varphi(B)$ für eine einzelne Bedieneinheit, $\varphi(T)$ für ein Triebwerk, $\varphi(S)$ für das Seitenleitwerk sowie $\varphi(H)$ für das Höhenruder auf. 1P

Ein weiteres Flugzeug verfüge über drei Triebwerke (T_1 bis T_3). Für den sicheren Betrieb des Flugzeuges sind zwei von drei Triebwerken notwendig.

- f) Welche Form der dynamischen Redundanz wird hier verwendet und was ermöglicht sie? 1P
- g) Zeichnen Sie für das neue Flugzeug das Zuverlässigkeitsblockdiagramm des Triebwerk-Subsystems. 1P
- h) Geben Sie eine allgemeine Formel zur Berechnung der Funktionswahrscheinlichkeit eines n -aus- m -Systems an. 1P



Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Technische Informatik
Prof. Dr. Wolfgang Karl

Klausur Rechnerstrukturen

Sommersemester 2010

Lösungsteil

Name: _____

Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

Tragen Sie bitte auf jedem Blatt Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer ein. Bitte tragen Sie alle Lösungen und Rechenwege an den vorgesehen Stellen ein und geben Sie keine zusätzlichen Blätter ab, ohne dies dem Aufsichtspersonal mitzuteilen.

Hinweis: Bei Rechenaufgaben ist die Angabe des Rechenwegs zwingend erforderlich. Ergebnisse ohne Rechenweg werden **nicht** gewertet.

Zum Bestehen der Klausur sind mindestens 20 Punkte erforderlich.

- Ich wünsche **keine** Notenveröffentlichung per Aushang (Matrikelnummer und Note) am schwarzen Brett
(Bei Ankreuzen kann die Note erst in der Klausureinsicht erfragt werden.)

Erreichte Punkte (wird vom Institut ausgefüllt):

Aufgabe	1	2	3	4	5	6
Punkte	/10	/10	/10	/10	/10	/10
Summe:						/60

Lösung 1: Quantifizierung**10P****Kriterien zur Leistungsbewertung****3 P**

Sichten:

Leistungsbewertung**3 P**

a) Nebenrechnung:

2P

$$t_{fpu} =$$

$$t_{crypto} =$$

$$MIPS_{fpu} =$$

$$MIPS_{crypto} =$$

b)

1P

$$Speedup_{crypto} =$$

Begründung:

Name:

Matrikelnummer:

3/16

Benchmarks zur Leistungsbewertung

4 P

c)

1P

d)

1P

e) Formel:

1P

Erklärung:

f) Erklärung:

1P

Beispiel:

Lösung 2: Fragen des Rechnerentwurfs*10P***Low-Power-Entwurf****3P**a) $P_{\text{Switching}} =$ *1,5P*

Erläuterung:

b) Formel:

1,5P

Berechnung:

Schaltungsentwurf**7P**

c) Verfeinerungen

3P

•

•

•

d) Bestandteile von VHDL

2P

• Entity:

• Architecture:

• Configuration:

• Process:

e) VHDL-Beschreibung

2P

- Verhalten:

- Änderung:

Lösung 3: Prozessorarchitektur*10P***Pipelining und Leistungsbewertung****5P**

a) Formeln:

1,5P

b)

2,5P

- Ausführungsauern:

- Speedup:

- CPI-Wert:

c)

1P

Name:

Matrikelnummer:

8/16

Sprungvorhersage

3P

d) Skizze:

1,5P

e) Sprungverlaufstabelle:

1,5P

Verlauf	Prädiktor	Vorhersage	Sprung	Aktualisierter Verlauf	Akt. Prädiktor
			T		
			NT		
			T		

Name:

Matrikelnummer:

9/16

Superskalartechnik**2P**

f) Registerstatustabelle:

Register	1	2	3	4	5	6
Wert						
Gültig?						
Reservation Station (RS#)						

Reservation Stations:

RS#	Leer	In FU	Opcode	Ziel	Quelle1	Gültig1	RS1	Quelle2	Gültig2	RS2
1 Addierer										
2 Addierer										
3 Multiplizierer	0	1	mul	1	(R3)	1	0	(R5)	1	0
4 Dividierer	0	0	div	6		0	3	(R4)	1	0

Lösung 4: Parallelverarbeitung**10P****Verbindungsstrukturen****4P**

- a)
 - Verbindungsgrad:
 - Diameter:
 - Minimale Bisektionsbreite:
 - Skalierbarkeit:

2P

b)

1P

c)

*1P***Quantitative Maßzahlen****3P**

d)

$$T =$$

1P

e) Antwort:

2P

Amdahls Gesetz:

Herleitung und einfache Formel:

Vektorverarbeitung**3P**

f)

1P

g) 1.

2P

2.

3.

4.

Lösung 5: Speicherhierarchie**10P****Cache-Leistung****4P**

a) Antwort:

1P

b) Hitrate:

1P

c) Formel:

0.5P

d) Mittlere Zugriffszeit:

0.5P

Name:

Matrikelnummer:

13/16

Cache-Kohärenzprotokoll

7P

e) Antwort:

1P

f) Antwort:

2P

g) Tabelle:

4P

Prozessor	Aktion	Prozessor 1		Prozessor 2		Prozessor 3	
		Line 1	Line 2	Line 1	Line 2	Line 1	Line 2
	init	-	-	-	-	-	-
1	rd 1	1/E					
3	rd 2					2/E	
3	rd 4						4/E
2	rd 2			2/S		2/S	
1	wr 3						
2	rd 3						
3	wr 2						
2	wr 2						
3	rd 1						
1	rd 1						
2	rd 4						
1	wr 2						

Lösung 6: Fehlertoleranz**10P**

a) Antwort:

1P

b) Antwort:

3P

c) Zuverlässigkeitsblockdiagramm:

1P

d) Systemfunktion:

1P

e) Funktionswahrscheinlichkeit:

1P

Name:

Matrikelnummer:

16/16

f) Antwort:

1P

g) Zuverlässigkeitsblockdiagramm:

1P

h) Funktionswahrscheinlichkeit:

1P