
Rechnerstrukturen

Vorlesung im Sommersemester 2007

Prof. Dr. Wolfgang Karl

Universität Karlsruhe (TH)

Fakultät für Informatik

Institut für Technische Informatik



Kapitel 1: Grundlagen

1.3 Einführung: Bewertung der Leistungsfähigkeit



- Ziele

- Auswahl der Rechenanlage
- Veränderung der Konfiguration einer bestehenden Anlage
- Entwurf von Anlagen

- Was heißt es: Ein Rechner ist schneller als ein anderer Rechner?

- Der Benutzer eines Arbeitsplatzrechners:

- „Ein Rechner A ist schneller als ein Rechner B, wenn ein Programm auf A weniger Zeit benötigt.“
- Reduzierung der Antwortzeit (response time) oder Ausführungszeit (execution time)
 - Zeit zwischen dem Beginn und dem Ende eines Ereignisses, einer Aufgabe
- A ist n -mal schneller als B:

$$\frac{\text{Ausführungszeit(B)}}{\text{Ausführungszeit(A)}} = n$$

- Was heißt es: Ein Rechner ist schneller als ein anderer Rechner?
 - Der Rechenzentrumsleiter:
 - „Ein Rechner A ist schneller als ein Rechner B, wenn A in einer Stunde mehr Aufträge (Jobs) erledigt.“
 - Erhöhung des Durchsatzes (throughput)
 - Anzahl der ausgeführten Aufgaben in einem gegebenen Zeitintervall
 - Durchsatz von A ist m -mal höher als der von B:
 - Die Anzahl der erledigten Aufgaben auf A ist m -mal die Anzahl der erledigten Aufgaben auf B.

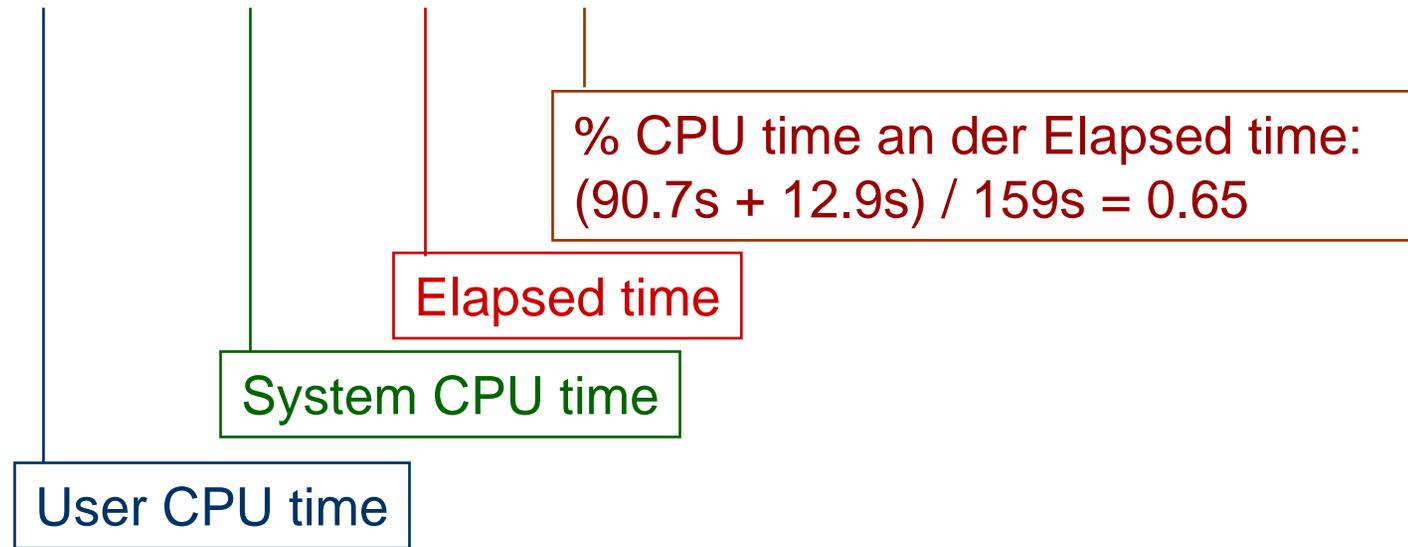
- **Ausführungszeit (execution time)**
 - Wall-clock time, response time, elapsed time
 - Latenzzeit für die Ausführung einer Aufgabe
 - Schließt den Speicher- und Plattenzugriff, Ein-/Ausgabe etc. mit ein.
 - CPU Time
 - Zeit, in der die CPU arbeitet
 - User CPU Time: Zeit, in der die CPU ein Programm ausführt
 - System CPU Time: Zeit, in der die CPU Betriebssystemaufgaben ausführt, die von einem Programm angefordert werden

- Ausführungszeit (execution time)

- CPU Time

- Beispiel: UNIX `time` Kommando:

90.7u, 12.9s, 2:39 65%



- Verfahren
 - Auswertung von Hardwaremaßen und Parametern
 - Laufzeitmessungen bestehender Programme
 - Messungen während des Betriebs von Anlagen
 - Modelltheoretische Verfahren

- Gleichung für die Leistung der CPU
 - Der Rechner läuft mit fester Taktrate, angegeben durch
 - Dauer eines Taktzyklus (z. B. 1ns)
 - Taktfrequenz (z. B. 1 GHz)
 - Die CPU-Zeit einer Programmausführung kann dargestellt werden mit

$$\begin{aligned} \text{CPU-Zeit} &= \text{Anzahl Taktzyklen für das Programm} * \text{Taktzyklusdauer} = \\ &= \frac{\text{Anzahl Taktzyklen für das Programm}}{\text{Taktfrequenz}} \end{aligned}$$

- Gleichung für die Leistung der CPU
 - Einführung der Maßzahl CPI (clock cycles per instruction)
 - Mittlere Anzahl der Taktzyklen pro Befehl
 - mit IC (instruction count), der Anzahl der ausgeführten Befehle eines Programms

$$\text{CPI} = \text{Anzahl Taktzyklen für das Programm} / \text{IC}$$

- Damit

$$\begin{aligned} \text{CPU-Zeit} &= \text{IC} \times \text{CPI} \times \text{Taktdauer} \\ &= \text{IC} \times \text{CPI} / \text{Taktfrequenz} \end{aligned}$$

- Gleichung für die Leistung der CPU
 - Konsequenz
 - CPU-Leistung ist bestimmt durch
 - Taktfrequenz
 - » Abhängig von der Halbleitertechnologie
 - CPI
 - » Abhängig von der Implementierung, ISA (Befehlssatzarchitektur), Programm
 - IC
 - » Abhängig von ISA, Compilertechnologie, Programm

- Maßzahlen für die Operationsgeschwindigkeit
 - Analog lässt sich für eine Programmausführung definieren:
 - MIPS: Millions of Instructions Per Second

$$\text{MIPS} = \frac{\text{Anzahl der ausgeführten Instruktionen}}{10^6 \times \text{Ausführungszeit}}$$

- MFLOPS: Millions of Floating Point Operations Per Second

$$\text{MFLOPS} = \frac{\text{Anzahl der ausgeführten Gleitkommaoperationen}}{10^6 \times \text{Ausführungszeit}}$$

- Probleme mit diesen Maßzahlen

- Abhängigkeit von ISA und ausgeführter Befehlssequenz

- Problem:

- Vergleich von Rechnern mit unterschiedlicher ISA
- Unterschiedliche MIPS/MFLOPS-Zahlen bei verschiedenen Programmen
- MIPS kann umgekehrt zur Leistung variieren
 - Beispiel: Gleitkommarechnung in Hardware bzw. mit Software-Routinen
- MIPS/MFLOPS Angaben von Herstellern oft nur best-case-Annahme: theoretische Maximalleistung

- **Zusammenfassung**

- Vergleich von Rechnern bezüglich ihrer Leistung ohne großen Aufwand
- Maßzahlen bewerten nur spezielle Aspekte
- Kritische Betrachtung der Leistungsangabe unbedingt notwendig!
- Angabe einer hypothetische Maximalleistung!

- **Benchmarks**

- Bewertung der Leistungsfähigkeit aufgrund von Messungen

- Programm oder Programmsammlung im Quellcode
- Übersetzung notwendig
- Messung der Ausführungszeiten
- In die Bewertung fließt „Güte“ des Compiler und Betriebssoftware ein
- Zugriff auf die Maschinen notwendig

- „Spiele“-Benchmarks
 - 10- 100 Zeilen Code
 - Beispiele:
 - Sieb des Erathostenes
 - Puzzle
 - Queens
 - Quicksort
- „Echte“ Benutzerprogramme
 - Verwendung typischer Benutzer- oder Systemprogramme
 - Oft bei Kauf von Großrechnern

- **Synthetische Benchmarks**
 - Charakteristisch für bestimmte Anwendungsklasse
 - Abbilden der Häufigkeit von Befehlen und Operanden aus einer Menge von Programmen
 - „Simuliert“ typisches Anwenderprogramm

- Synthetische Benchmarks

- Whetstone (~1970)

- In FORTRAN

- Überwiegend Gleitkommaoperationen

- *„This program is the result of extensive research to determine the instruction mix of a typical Fortran program. The results of this program on different machines should give a good indication of which the machine performs better under a typical load of Fortran programs. The statement is purposely arranged to defeat optimizations by the compiler.“* (H.J. Curnow and B.A. Wichmann, Comments on the Whetstone Benchmark, 1976)



- Synthetische Benchmarks

- Dhrystone (~1984)

- In C geschrieben
- Auswahl der Anweisungen aufgrund statistischer Analysen über die Verwendung von Sprachkonstrukten in Programmen
- Keine Bedeutung mehr im Bereich Arbeitsplatzrechner, aber noch Einsatz im Bereich eingebetteter Systeme: problematisch!
- „*Dhrystone does not use floating point. Typical programs don't...*“ (Rick Richardson, Clarification of Dhrystone, 1988)



- **Kernels**

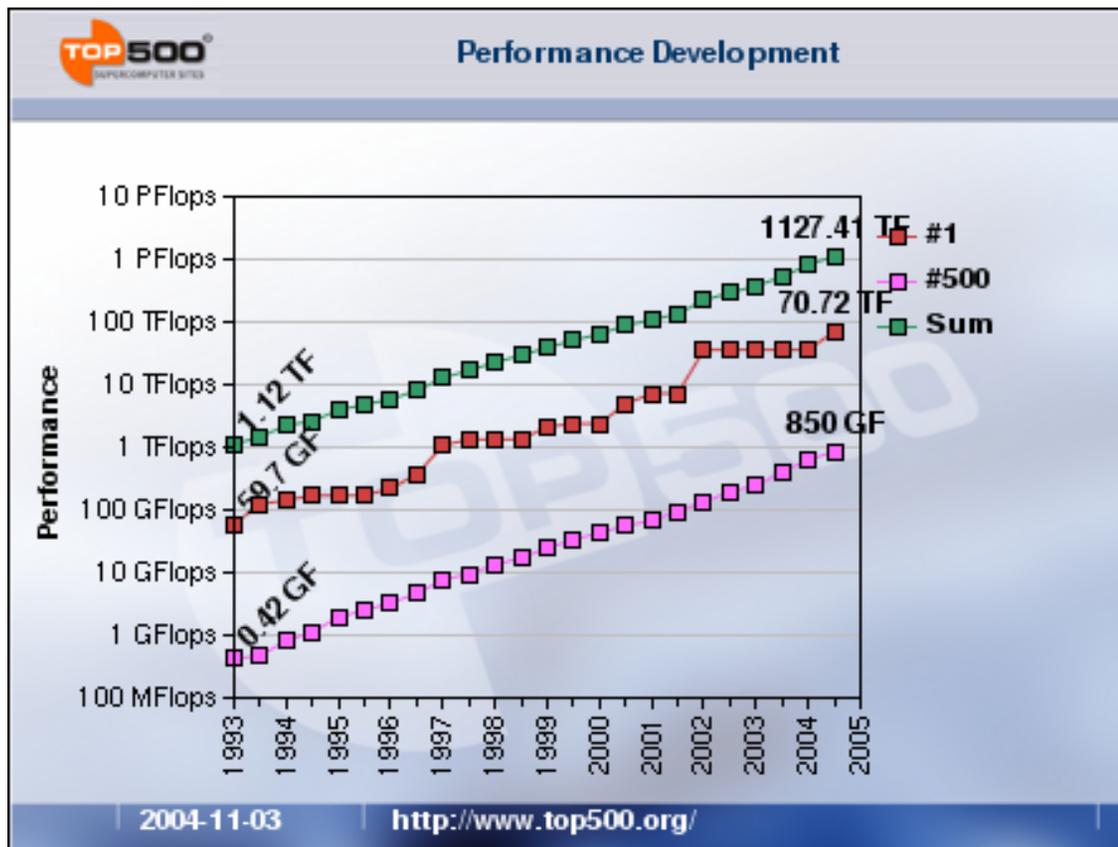
- Rechenintensive Teile realer Programme
- Vorwiegend numerische Algorithmen
- Beispiele:
 - Lawrence Livermore Loops:
 - Zur Bewertung vektorisierender Compiler
 - LINPACK Softwarepaket:
 - Lösung eines Systems linearer Gleichungen
 - Verwendet für die TOP500 Liste (<http://www.top500.org>)
 - BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms)
- Wenig Aufwand, aber nur bedingt aussagekräftig



- **Kernels**

- LINPACK Softwarepaket:

- Verwendet für die TOP500 Liste



- **Standardisierte Benchmarks**
 - Ziel: Vergleichbarkeit von Rechnern (inkl. Betriebssystem und Compiler)
 - Anforderungen:
 - Gute Portierbarkeit
 - Repräsentativ für typische Nutzung der Rechner
 - Sammlung von Benchmark-Programmen (Benchmark Suites)
 - Ausgeglichene Bewertung durch die unterschiedlichen Eigenschaften der Programme

- Standardisierte Benchmarks
 - Standardisierungsorganisationen
 - TPC (Transaction Processing Performance Council)
 - Mitte der 80'er Jahre, <http://www.tpc.org>
 - Zusammenschluss von Datenbank- und Rechnerherstellern
 - Ziel: Bewertung von Datenbanksystemen

- **Standardisierte Benchmarks**
 - Standardisierungsorganisationen
 - EEMBC (Embedded Microprocessor Benchmark Consortium)
 - <http://www.eembc.org>
 - Anwendungen aus dem Bereich Eingebettete Systeme
 - Automotive/Industrial (Automatisierungstechnik)
 - » 6 Microbenchmarks (arithmetische Operationen, Pointer, Speicherleistung, Matrizenarithmetik, Tabellensuche, Bitmanipulation), 5 Steuerungsprogramme aus dem Automobilbereich, 5 Filter und FFT-Benchmarks
 - Consumer (Unterhaltungselektronik)
 - » 5 Multimedia-Benchmarks (JPEG compress/decompress, Filtering, RGB Conversions)
 - Networking (Netzwerk)
 - » Kürzeste-Wege-Berechnung, IP Routing, Paketfluss-Operationen
 - Office Automation
 - » Graphik- und Text-Benchmarks, (Bézier-Kurvenberechnung, Dithering, Bildrotation, Textverarbeitung)
 - Telecommunication
 - » Filtering und DSP-Anwendungen



- Standardisierte Benchmarks
 - Standardisierungsorganisationen
 - SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)
 - Gegründet 1988, <http://www.spec.org>
 - Zusammenschluss von mehr als 40 Firmen (Rechnerhersteller)
 - Festlegung von Richtlinien für eine gemeinsame Rechnerbewertung

- **Verschiedene Untergruppen in SPEC**
 - Open Systems Group (OSG)
 - SPEC CPU 2000: Prozessorleistung
 - SPEC JVM98: Vergleich von Java Virtual Machine Client Plattformen
 - SPEC MAIL2001: Mail Server Benchmark
 - SPEC SFS 2.0: System: File Server
 - SPEC WEB99: Test für WWW Server

- **Verschiedene Untergruppen in SPEC**
 - High Performance Group (HPG)
 - SPEC_{hpc96}: Industrielle große Anwendungen
 - Graphics Performance Characterization Group (GPC)
 - Zusammenschluss mit SPEC_{copc}: OpenGL Leistungsbewertung

- **SPEC CPU 2000**
 - 12 nichtnumerische Programme in C/C++ (CINT2000)
 - 14 numerische Programme in FORTRAN/C (CFP2000)
 - Strenge, genau festgelegte Regeln
 - Ab CPU95: vollautomatische Messung und Protokollierung
 - Regelmäßige Aktualisierungen (CPU92, CPU95, CPU2000)
 - Laufzeiten werden zu kurz
 - Caches werden größer: größere Datensätze
 - Mehr Praxisnähe: Programme mit schlechterer Datenlokalität

- SPEC CINT2000**

Benchmark	Referenzzeit	Bemerkung
164.gzip	1400	Datenkompression
175.vpr	1400	FPGA Layout und Routing
176.gcc	1100	C Compiler
181.mcf	1800	Lineare Optimierung, KFZ-Scheduling
186.crafty	1000	Schachprogramm
197.parser	1800	Sprachverarbeitung, Parser für Englisch
252.eon	1300	Ray Tracing
253.perlbmk	1800	Perl
256.gap	1100	Gruppentheorie, Interpreter
255.vortex	1900	Datenbank, objektorientiert
256.bzip2	1500	Datenkompression
300.twolf	3000	IC Platzierung und Routing

Referenzzeit bezieht sich auf Sun Ultra10 (300MHz, 256MB)



- SPEC CFP2000

Benchmark	Referenzzeit	Bemerkung
168.wupwize	1600	Quantenphysik
171.swim	3100	Gleichungslösung, Flachwasser-Modellierung
172.mgrid	1800	3D-Mehrgitterverfahren
173.applu	2100	Lösung parabolischer u. elliptischer part. DG
177.mesa	1400	3D Graphikbibliothek
178.galgel	2900	Strömungsmechanik
179.art	2600	Bildererkennung, neuronales Netzwerk Simulation

- SPEC CFP2000

Benchmark	Referenzzeit	Bemerkung
183.equake	1300	Seismografische Wellenausbreitung, Finite Elemente Simulation
187.facerec	1900	Bildverarbeitung, Gesichtserkennung
188.amp	2200	Chemie, Molekulardynamik-Sim.
189.lucas	2000	Zahlentheorie, Mersenne-Primzahltest
191.fma3d	2100	Finite Elemente: Crash-Simulation
200.sixtrack	1100	Teilchenbeschleunigermodell
300.apsi	2600	Sim. Schadstoffausbreitung

- Mögliche Kategorien

	Geschwindigkeit	Durchsatz
Aggressive Optimierung	SPECint2000	SPECint_rate2000
	SPECfp2000	SPECfp_rate2000
Konservative Optimierung	SPECint_base2000	SPECint_rate_base2000
	SPECfp_base2000	SPECfp_rate_base2000

- SPEC CPU Benchmark-Metrik: Geschwindigkeit

$$\text{SPECratio} = \frac{\text{Referenzzeit}_x}{\text{Laufzeit}_x \text{ auf Testsystem}} \quad \text{Benchmark } x$$

- Endwerte: je ein geometrisches Mittel der SPECratio's über alle CINT2000 und CFP2000 Benchmarks
 - SPECint2000, SPECfp2000
 - Aggressive, individuelle Optimierungen erlaubt
 - SPECint_base2000, SPECfp_base2000
 - Nur mit konservativer Standardoptimierung
 - Identische Compileroptionen für alle Programme

- SPEC CPU Benchmark-Metrik
 - Warum geometrisches Mittel:

$$\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \text{Execution time ratio}_i}$$

mit *Execution time ratio*_{*i*}:
Ausführungszeit der Programms *i*
einer Last von *n* Programmen,
normalisiert bezüglich der
Referenzmaschine

- Eigenschaft des geometrischen Mittels:

$$\frac{\text{geometrisches Mittel } (X_i)}{\text{geometrisches Mittel } (Y_i)} = \text{geometrisches Mittel} \left(\frac{X_i}{Y_i} \right)$$

- Geometrisches Mittel ist konsistent, unabhängig von Referenzmaschine!

- SPEC CPU Benchmark-Metrik: Durchsatz

$$\text{SPECrate}_x = \frac{\text{Sekunden pro Stunde}}{\text{Laufzeit}_x \text{ von } n_x \text{ Kopien auf Testsystem}} \times \frac{\text{Referenzzeit}_x}{\text{längste Laufzeit}}$$

– Endwerte: je ein geometrisches Mittel der SPECrate's über alle CINT2000 bzw. CFP2000 Benchmarks

- SPECint_rate2000, SPECfp_rate2000
- SPECint_base2000, SPECfp_base2000
- n_x kann frei gewählt werden, muss aber dokumentiert werden

Beispiel SPEC CPU2000

Processor	Alpha 21364	AMD Athlon XP	HP PA-8700	IBM Power 4+	Intel Itanium 2	Intel XeonMP	Intel Xeon	MIPS R14000	Sun UltraSPARC III
System or Motherboard	Alpha GS1280/7	ASUS A7N8X	HP9000 C3750	pSeries 650 6M2	HP RX2600	Dell PwrEdg 6650	Dell Prec. 350	SGI 3200	Sun Blade 2050
Clock Rate	1.15GHz	2.17GHz	870MHz	1.45GHz	1.0GHz	2.0GHz	3.06GHz	600MHz	1.05GHz
External Cache	None	None	None	16MB	None	None	None	8MB	8MB
164.gzip	583	1,026	588	673	583	758	1,138	322	433
175.vpr	822	653	688	902	704	625	606	572	460
176.gcc	859	755	906	914	1,014	1,100	1,236	445	577
181.mcf	712	420	494	1,391	834	599	773	783	659
186.crafty	982	1,292	751	884	781	712	1,179	502	558
197.parser	514	905	495	381	660	778	1,025	409	488
252.eon	958	1,483	592	1,150	1,004	920	1,387	507	527
253.perlbmk	768	1,306	619	712	815	952	1,381	367	540
254.gap	636	1,059	339	936	680	722	1,417	308	372
255.vortex	1,094	1,608	1,196	1,428	1,193	1,118	1,658	679	738
256.bzip2	824	840	534	965	759	712	856	493	629
300.twolf	1,018	887	911	1,198	880	1,009	900	645	570
SPECint_base2000	795	960	642	909	810	816	1,085	483	537
168.wupside	883	1,131	446	1,532	1,003	816	1,406	434	659
171.swim	3,590	1,006	931	1,417	3,205	848	1,837	529	980
172.mgrid	708	799	621	850	1,720	449	1,047	379	487
173.applu	1,518	654	702	979	2,033	496	1,168	381	310
177.mesa	928	1,103	694	737	642	814	1,165	425	543
178.galgel	2,105	738	1,603	3,186	2,505	1,200	1,536	1,398	1,713
179.art	2,014	495	670	1,864	4,226	1,147	716	1,436	9,389
183.equake	519	730	413	2,098	1,871	449	1,291	347	645
187.facerec	1,105	1,008	430	1,515	1,152	762	1,315	647	958
188.amp	735	587	553	923	788	729	644	573	509
189.lucas	1,522	853	448	1,306	1,206	682	1,522	442	371
191.fma3d	1,019	850	404	898	747	551	1,089	306	400
200.sixtrack	469	538	471	621	894	376	564	298	366
301.aspi	1,242	705	696	966	678	695	833	406	471
SPECfp_base2000	1,124	776	600	1,221	1,356	677	1,092	499	701

Quelle: MDR, Microprocessor Report, April 28, 2003



Beispiel SPEC CPU2000

Processor	AMD Opteron 2220	AMD Opteron 8220	Fujitsu SPARC64 V+	Sun UltraSPARC IV+	Sun UltraSPARC T1	HP PA-8900
Bit-width	32/64-bit	32/64-bit	64-bit	64-bit	64-bit	64-bit
Cores/chip x Threads/core	2 x 1	2 x 1	1 x 1	2 x 1	8 x 4	2 x 1
Clock Rate	2.8GHz	2.8GHz	2.16GHz	1.8GHz	1.2 GHz	1.1GHz
Cache: L1-L2-L3 - I/D or Unified	2 x 64K/64K - 2 x 1M - N/A	2 x 64K/64K - 2 x 1M - N/A	128K/128K 4M - N/A	2 x 64K/64K - 2M - 32M(off)	8 x 16K/8K - 3M - N/A	2 x 1.5M - 2 x 32M(off) - N/A
Execution Rate/Core	3 x86 instr	3 x86 instr	4 issue	4 issue	1 issue	4 issue
Pipeline Stages	12/17 stages	12/17 stages	15 stages	14 stages	6 stages	7/9 stages
Out of Order	72ROPs	72ROPs	64 instr	None	None	56 instr
Memory B/W	8.5GB/s	8.5GB/s	4.3GBs	4.8GB/s	25.6GB/s	6.4GB/s
Package	LGA-1207	LGA-1207	LGA-908	FC-LGA 1368	1933 pins	LGA-544
IC Process	90nm 9M SOI	90nm 9M SOI	90nm 10M	90nm 9M	90nm 9M	130nm 7M
Die Size	230mm ²	230mm ²	294mm ²	335mm ²	378mm ²	304mm ²
Transistors	227 million	227 million	400 million	295 million	279 million	300 million
List Price (intro)	\$786	\$2,149	N/A	N/A	N/A	N/A
Power (Max)	95W(MTP)	119W(MTP)	65W	90W	70W	103W
Availability	3Q06	3Q06	2Q05	3Q06	4Q05	2Q05
Configuration	1-2 chips	1-8 chips	1-128 chips	1-72 chips	single chip	1-64 chips
SPEC_int2000(base)	1,829	1,611	1,501	1,200*	N/A	945*
SPEC_fp2000(base)	2,146	1,975	2,094	1,800*	N/A	935*
Architecture Status	Active	Active	Active	Active	Active	EOL

Quelle: MDR, Microprocessor Report, December 26, 2006



Beispiel SPEC CPU2000

Processor	Intel Xeon 5160	Intel Xeon 7140M	Intel Itanium 2 9050	IBM Power5+	MIPS R16000	Alpha 21364 EV-78+
Bit-width	32/64-bit	32/64-bit	64-bit	64-bit	64-bit	64-bit
Cores/chip x Threads/core	2 x 2	2 x 2	2 x 2	2 x 2	1 x 1	1 x 1
Clock Rate	3.0GHz	3.4GHz	1.60GHz	2.3GHz	800MHz	1.30GHz
Cache: L1-L2-L3 I/D or Unified	2 x 32K/32K - 4M - N/A	2 x 12K/16K - 1M - 16M(on)	2 x 16K/16K - 1M/256K - 12M(on)	2 x 64K/32K - 1.92M - 36M(off)	32K/32K - 16M(off) - N/A	64K/64K - 1.75M - N/A
Execution Rate/Core	4 uOPs	4 uOPs	6 issue	5 issue	4 issue	4 issue
Pipeline Stages	14 stages	31 stages	8 stages	12/17 stages	6 stages	7/9 stages
Out of Order	96 uOPs	126 uOPs	None	200 instr	48 instr	80 instr
Memory B/W	20.8GB/s	8.5GB/s	8.5GB/s	12.8GB/s	1.6GB/s	12GB/s
Package	LGA-771	LGA-775	mPGA-700	MCM-5370 pins	FCBGA-1153	FC-LGA-1443
IC Process	65nm 8M	65nm 8M	90nm 7M	90nm 10m	110nm 7M	180nm 7M
Die Size	143mm ²	435mm ²	596mm ²	245mm ²	110mm ²	397mm ²
Transistors	291 million	1.3 billion	1.72 billion	276 million	7.2 million	135 million
List Price (intro)	\$851	\$1,980	\$3,692	N/A	N/A	N/A
Power (Max)	80W	150W	104W	100W	17W	155W
Availability	2Q06	1Q06	3Q06	4Q05	1Q03	3Q04
Configuration	1-2 chips	1-8 chips	1-128 chips	1-32 chips	1-512 chips	2-64 chips
SPEC_int2000(base)	3,089	1,742	1,474	1,820	640*	904
SPEC_fp2000(base)	2,823	2,004	3,020	3,369	660*	1,279
Architecture Status	Active	Active	Active	Active	EOL	EOL

Quelle: MDR, Microprocessor Report, December 26, 2006



- Hennessy/Patterson: A Quantative Approach:
Kap. 1.5 – 1.9

