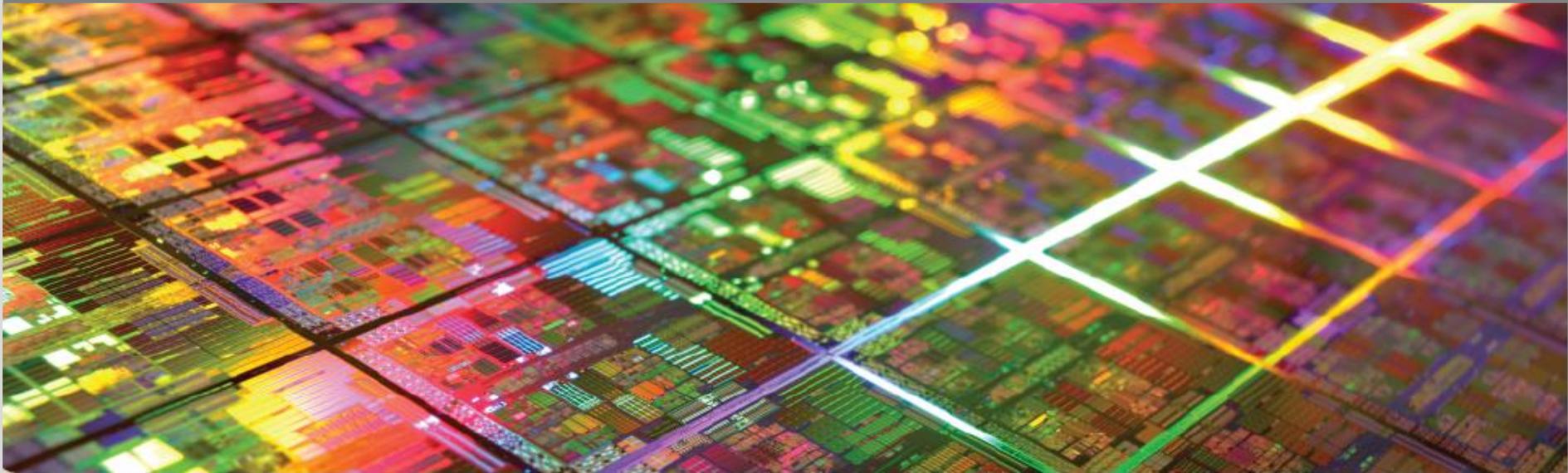


Rechnerstrukturen

Vorlesung im Sommersemester 2016

Prof. Dr. Wolfgang Karl

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



Organisatorisches

■ Klausurtermin:

- Voraussichtlich 24. August 2016, 11:00 Uhr
- Stoff: Vorlesung und Übung

Vorlesung Rechnerstrukturen

Kapitel 1: Grundlagen

- 1.1 Einführung, Begriffsklärung
- 1.2 Entwurf von Rechenanlagen – Entwurfsfragen
- 1.3 Einführung in den Entwurf eingebetteter Systeme
- 1.4 Energieeffizienter Entwurf – Grundlagen
- 1.5 Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Rechners

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Ziele

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

Bewertung der Leistungsfähigkeit

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)**, **Latenz**
 - Zeit zwischen dem Beginn und dem Ende eines Ereignisses, einer Aufgabe
- A ist n-mal schneller als B:

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

Bewertung der Leistungsfähigkeit

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.
- Spielt eine wichtige Rolle bei der Bewertung von Multicore

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Definitionen:

- **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

- **Beispiel: UNIX time Kommando:**
 - 90.7u, 12.9s, 2:39 65%
 - % CPU time an der Elapsed time: $(90.7s + 12.9s) / 159s = 0.65$

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Verfahren

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

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Einfache Hardwaremaße

■ 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

$$T_{\text{exe}} = IC \times CPI \times TC$$

T_{exe} : CPU-Zeit

IC: Anzahl der ausgeführten Befehle (instruction count)

CPI: Anzahl der Zyklen pro Instruction (cycles per instruction)

T_C : Zykluszeit (machine cycle time)

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Einfache Hardwaremaße

■ Gleichung für die Leistung der CPU

- Einführung der Maßzahl CPI (clock cycles per instruction): Mittlere Anzahl der Taktzyklen pro Befehl

$$CPI = T_{\text{exe}} / (IC \times TC)$$

- Direkte Abschätzung des CPI-Wertes schwierig wegen der Komplexität heutiger Prozessoren und der Cache-Hierarchie
 - Hängt vom Kontext ab, in der eine Instruktion ausgeführt wird
-
- Einführung der Maßzahl IPC (instructions per cycle):

$$IPC = 1 / CPI$$

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Einfache Hardwaremaße

■ Maßzahlen für die Operationsgeschwindigkeit

- **MIPS** (Millions of Instructions Per Second):

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

- **MFLOPS** (Millions of Floatingpointoperations Per Second):

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

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Einfache Hardwaremaße

■ Maßzahlen für die Operationsgeschwindigkeit

■ Probleme

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

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Einfache Hardwaremaße

■ 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!

Laufzeitmessung bestehender Programme

Benchmarks

- Bewertung der Leistungsfähigkeit aufgrund von Messungen mit Hilfe von einem Programm oder einer Programmsammlung
 - Programme liegen im Quellcode vor
 - Übersetzung notwendig
 - Messung der Ausführungszeiten
 - In die Bewertung fließt „Güte“ des Compiler und Betriebssoftware ein
 - Zugriff auf die Maschinen notwendig

Laufzeitmessung bestehender Programme

Benchmarks

■ Kernels

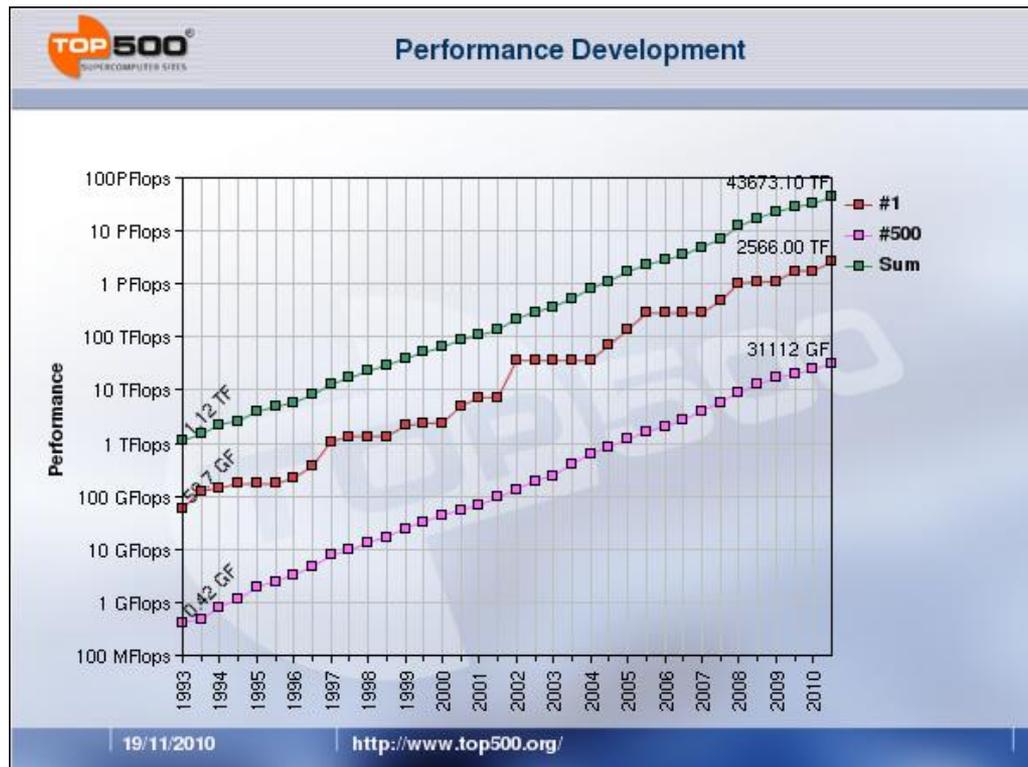
- Rechenintensive Teile realer Programme
 - Vorwiegend numerische Algorithmen
- Beispiele:
 - Lawrence Livermore Loops:
 - Zur Bewertung vektorisierender Compiler
 - BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms)
 - Wenig Aufwand, aber nur bedingt aussagekräftig
 - LINPACK Softwarepaket:
 - Lösung eines Systems linearer Gleichungen

Laufzeitmessung bestehender Programme

Benchmarks

■ Kernels

- LINPACK Softwarepaket:
 - TOP500 Liste (<http://www.top500.org>)



Laufzeitmessung bestehender Programme

Benchmarks

- **Einschub: TOP500 Liste** (<http://www.top500.org>)
 - Entwicklung der Rechenleistung:
<http://www.top500.org/statistics/perfdevel/>
 - Top 10 (November 2013)
 - <http://www.top500.org/lists/2013/11/>

Laufzeitmessung bestehender Programme

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

Laufzeitmessung bestehender 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

Laufzeitmessung bestehender Programme

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
- SPEC's Structure
 - *“SPEC is a non-profit corporation whose membership is open to any company or organization that is willing to support our goals (and pay our nominal dues). Originally just a bunch people from workstation vendors devising CPU metrics, SPEC has evolved into an umbrella organization encompassing three diverse groups.”*

Laufzeitmessung bestehender Programme

Standardisierte Benchmarks

■ SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)

■ Struktur:

■ Open Systems Group (OSG)

- CPU: SPECmarks CPU Benchmarks
- Java: Client- und Serverseitige Benchmarks: JVM98, JVM2008, JBB2000, JBB2005, jAppServer Java Enterprise Application Server benchmarks
- Mail: SPECmail2001, Consumer Internet Service Provider (ISP) mail server benchmark
- Power: SPECpower_ssj2008, der SPEC benchmark zur Evaluierung der Energieeffizienz für Server
- SIP: SPEC Benchmark zum Vergleich von Servern, die das Session Initiation Protokoll (SIP) verwenden
- SFS: SFS93 (LADDIS), SFS97, SFS97_R1, and SFS2008
- Virtualization: Entwicklung der ersten Generation eines SPEC Benchmarks zum Vergleich der Virtualisierungsleistung für Data Centers
- WEB: WEB96, WEB99, WEB99_SSL, and WEB2005, die web server benchmarks.

Laufzeitmessung bestehender Programme

Standardisierte Benchmarks

■ SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)

■ Struktur:

■ The High-Performance Group (HPG)

- Benchmark Suite, die HPC Anwendungen repräsentieren
- Zielarchitekturen: symmetrische Multiprozessorsysteme, Workstation Cluster, Parallelrechner mit verteiltem Speicher, Vektorrechner

■ The Graphics and Workstation Performance Group (GWPG):

- graphics and workstation performance benchmarks and reporting procedures
- SPECapc (Application Performance Characterization): CAD/CAM, Digital Content Creation, Visualisierungsanwendungen
- SPECgpc (Graphics Performance Characterization group): Benchmarks zur Leistungsbewertung von Graphicsystemen, die unter OpenGL oder anderen APIs laufen, SPECviewperf(r)

Laufzeitmessung bestehender Programme

Standardisierte Benchmarks

- **SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)**
 - SPEC CPU Benchmarks
 - 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 CPU 2006
 - 12 nichtnumerische Programme in C/C++ (CINT2006):
<http://www.spec.org/cpu2006/CINT2006/>
 - 14 numerische Programme in FORTRAN/C (CFP2006):
<http://www.spec.org/cpu2006/CFP2006/>
 - Referenzmaschine:
 - Historisches Sun System, eine "Ultra Enterprise 2 mit einem 296 MHz UltraSPARC II Prozessor

Laufzeitmessung bestehender Programme

Standardisierte Benchmarks

- **SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)**
- SPEC CPU 2006

	Geschwindigkeit	Durchsatz
Aggressive Optimierung	SPECint2006	SPECint_rate2006
	SPECfp2006	SPECfp_rate2006
Konservative Optimierung	SPECint_base2006	SPECint_rate_base2006
	SPECfp_base2006	SPECfp_rate_base2006

Laufzeitmessung bestehender Programme

Standardisierte Benchmarks

- **SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)**
- SPEC CPU 2006 Benchmark-Metrik Geschwindigkeit

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

für Benchmark x

- Endwerte: je ein geometrisches Mittel der SPECratio's über alle CINT2006 und CFP2006 Benchmarks
 - SPECint2006, SPECfp2006
 - Aggressive, individuelle Optimierungen erlaubt
 - SPECint_base2006, SPECfp_base2006
 - Nur mit konservativer Standardoptimierung
 - Identische Compileroptionen für alle Programme

Laufzeitmessung bestehender Programme

Standardisierte Benchmarks

- **SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)**
- SPEC CPU 2006 Benchmark-Metrik Geschwindigkeit
 - Geometrisches Mittel

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

Execution time ratio_i:
 Ausführungszeit des 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!

Laufzeitmessung bestehender Programme

Standardisierte Benchmarks

- **SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)**
- SPEC CPU 2006 Benchmark-Metrik Durchsatz: SPECrate
 - Basiert auf der Ausführung der Benchmark Binaries, die nach den Regeln generiert worden sind, wie sie für die Geschwindigkeitsmetriken gelten
 - Wahl der Anzahl der Kopien (n_x) eines Benchmarks x , die gleichzeitig ausgeführt werden

$$\text{SPECrate}_x = n_x \times \text{Referenzfaktor von } x / \text{Ausführungszeit (in s)}$$

- Endwerte: je ein geometrisches Mittel der SPECrate's über alle CINT2006 bzw. CFP2006 Benchmarks
 - SPECint_rate2006, SPECfp_rate2006
 - SPECint_base2006, SPECfp_base2006
 - n_x kann frei gewählt werden, muss aber dokumentiert werden

Benchmarks

■ SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)

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.perlbnk	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

Benchmarks

■ SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)

Processor	AMD 1-core Opteron 854	Intel 1-core Xeon	AMD 2-core Opteron 8224SE	Intel 2-core Xeon 5160	AMD 4-core Opteron 8360SE	Intel 4-core Xeon X7350	Intel 4-core Core 2 Quad QX9650
Bit-width	32/64-bit	32/64-bit	32/64-bit	32/64-bit	32/64-bit	32/64-bit	32/64-bit
Cores/chip x Threads/core	1 x 1	1 x 2	2 x 1	2 x 1	4 x 1	4 x 1	4 x 1
Clock Rate	2.80GHz	3.80GHz	3.20GHz	3.03GHz	2.50GHz	2.93GHz	3.00GHz
Cache: L1-L2-L3 - I/D or Unified	64K/64K - 1M - N/A	12K/16K - 2M - N/A	2 x 64K/64K - 2 x 1M - NA	2 x 32K/32K - 4M - NA	4 x 64K/64K - 4 x 512K - 2M	4 x 32K/32K - 2 x 4M - NA	4 x 32K/32K - 2 x 6M - NA
Execution Rate/Core	3 instructions	3 instructions	3 instructions	1 complex + 3 simple	3 instructions	1 complex + 3 simple	1 complex + 3 simple
Pipeline Stages	12 int / 17 fp	31	12 int / 17 fp	14	12 int / 17 fp	14	14
Out of Order	72	126	72	96	72	96	96
Memory bus	6.4 GB/s	800 MHz	10.6 GB/s	1333 MHz	10.6 GB/s	1066 MT/s	1333 MHz
Package	uPGA 940	LGA-775	LGA-1207	LGA-771	LGA-1207	LGA-771	LGA-775
IC Process	90nm 9M	90nm 7M	90nm 9M	65nm 8M	65nm 8M	65nm 8M	45nm
Die Size	106mm ²	109mm ²	227mm ²	143mm ²	283mm ²	2 x 143mm ²	2 x 107mm ²
Transistors	120M	169M	233M	291M	463M	2 x 291M	2 x 410M
List Price (intro)	\$1,514	\$903	\$2,149	\$851	N/A	\$2,301	\$999
Power (Max)	93W	110W	120W	80W	120W	130W	130W
Availability	3Q05	3Q05	3Q07	3Q06	1Q08	3Q07	4Q07
Scalability	2-4 chips	1-2 chips	1-4 chips	1-2 chips	2-4 chips	1-4 chips	1 chip
SPECint/fp2006 [cores]	11.2/12.1 [2]	11.4/11.7 [2]	14.1/14.2 [8]	19.7*/18.3* [4]	N/A	21.7*/18.9* [16]	22.3*/21.4* [4]
SPECint/fp2006_rate [cores]	41.4/45.6 [4]	20.9/18.8 [2]	105/96.7 [8]	60.8/45.1 [4]	163/149 [16]	184*/108* [16]	69.0*/49.9 [4]

Quelle: MDR, Microprocessor Report, January 2008

Benchmarks

■ SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)

Processor	Intel Itanium 2 9050	Intel Itanium 9150M	IBM Power6	IBM Power5+	Fujitsu SPARC64 VI	Sun UltraSPARC IV+	Sun UltraSPARC T2
Bit-width	64-bit	64-bit	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	2 x 2	2 x 1	8 x 8
Clock Rate	1.60GHz	1.67GHz	4.70GHz	2.20GHz	2.40GHz	1.95GHz	1.40GHz
Cache: L1-L2-L3 I/D or Unified	2 x 16K/16K - 1M/256K - 12M(on)	2 x 16K/16K - 1M/256K - 12M(on)	2 x 64K/64K - 2 x 4M - 32M(off)	2 x 64K/32K - 1.92M - 36M(off)	2 x 128K/128K - 5M - NA	2 x 64K/64K - 2M - 32M(off)	8 x 8K/16K - 4M - NA
Execution Rate/Core	6 issue	6 issue	7 issue	5 issue	4 issue	4 issue	16 issue
Pipeline Stages	8 stages	8 stages	13 stages	15 stages	15 stages	14 stages	8 int / 12 fp
Out of Order	None	None	"Limited"	200	64	None	None
Memory B/W	8.5GB/s	10.6GB/s	75GB/s	12.8GB/s	8GB/s	4.8GB/s	42.7GB/s
Package	mPGA-700	mPGA-700	N/A	MCM-5370 pins	412 I/O pins	FC-LGA 1368	1831 pins
IC Process	90nm 7M	90nm 7M	65nm 10m	90nm 10m	90nm 10M	90nm 9M	65nm
Die Size	596mm ²	596mm ²	341mm ²	245mm ²	421mm ²	335mm ²	342mm ²
Transistors	1.72 billion	1.72 billion	790 million	276 million	540 million	295 million	503 million
List Price (intro)	\$3,692	\$3,692	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Power (Max)	104W	104W	~100W	100W	120W	90W	84W
Availability	3Q06	4Q07	2Q07	4Q05	2Q07	3Q06	3Q07
Scalability	1-64 chips	8-128 chips	2-32 chips	1-32 chips	4-64 chips	1-72 chips	1 chip
SPECint/fp2006 [cores]	14.5/17.3 [2]	N/A	17.8/18.7 [1]	10.5/12.9 [1]	9.7/11.1 [32]	N/A	N/A
SPECint/fp2006_rate [cores]	1534/1671 [128]	1832/N/A [128]	420/379 [16]	197/229 [16]	1111/1160 [128]	1120/N/A [144]	73.1/58.1

Quelle: MDR, Microprocessor Report, January 2008

Benchmarks

■ SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)

Processor	Intel 2-core Xeon X5270 ¹	AMD 2-core Opteron 8224SE	Intel 4-core Xeon W5590	AMD 4-core Opteron 8393SE ²	Intel 4-core Xeon X5570 ³	AMD 6-core Opteron 8439SE	Intel 6-core Xeon X7460 ⁴
Bit-Width	32/64-bit	32/64-bit	32/64-bit	32/64-bit	32/64-bit	32/64-bit	32/64-bit
Cores/Chp x Threads/core	2 x 1	2 x 1	4 x 2	4 x 1	4 x 2	6 x 1	6 x 1
Clock Rate	3.50GHz	3.20GHz	3.33GHz	3.10GHz	2.93GHz	2.80GHz	2.67GHz
Cache: L1-L2-L3 - I/D or Unified	2 x 32K/32K - 6M - NA	2 x 64K/64K - 2 x 1M - NA	4 x 32K/32K - 4 x 256K - 8M	4 x 64K/64K - 4 x 512K - 6M	4 x 32K/32K - 4 x 256K - 8M	6 x 64K/64K - 6 x 512K - 6M	6 x 32K/32K - 3 x 3M - 16M
Execution Rate/Core	1 cmplx + 3 simple	3 Instructions	1 cmplx + 3 simple	3 Instructions	1 cmplx + 3 simple	3 Instructions	1 cmplx + 3 simple
Pipeline Stages	14	12Int / 17fp	16	12Int / 17fp	16	12Int / 17fp	14
Out of Order	96	72	128	72	128	72	96
Memory Bus	1333MHz	10.6GB/s	16GB/s	8GB/s	16GB/s	17GB/s	1064MHz
Package	LGA-771	LGA-1207	LGA-1366	LGA-1207	LGA-1366	LGA-1207	LGA-771
IC Process / Metal Layers	45nm / 10M	90nm / 10M	45nm / 10M	45nm / 10M	45nm / 10M	45nm / 10M	45nm / 10M
Die Size	107mm ²	227mm ²	263mm ²	258mm ²	263mm ²	346mm ²	503mm ²
Transistors	410M	233M	731M	758M	731M	904M	1900M
List Price (Intro)	\$1,172	\$2,149	\$1,600	\$2,649	\$1,386	\$2,649	\$2,729
Power (Max)	80W	120W	130W	137W (TDP)	95W	137W (TDP)	130W
Availability	3Q08	3Q07	3Q09	2Q09	1Q09	3Q09	4Q08
Scalability	1-2 chips	1-4 chips	1-2 chips	1-8 chips	1-2 chips ³	1-8 chips	1-4 chips
SPECint/fp2006 [cores]	26.5/25.5 [4]	14.1/14.2 [8]	34.2 ⁴ /40.4 ⁴ [8]	19.7/23.6 [8]	32.1 ⁴ /45.0 [8]	18.3/23.3 [12]	22.0/22.3 [24]
SPECint/fp2006_rate [cores]	85.3/57.7 [4]	105/96.7 [8]	255/204 [8]	232/204 ² [16]	240/197 [8]	629/473 [48]	274 ⁴ /142 [24]
x86 Codename	Wolfdale	Santa Rosa	Gainestown	Shanghai	Gainestown	Istanbul	Dunnington
Microarchitecture	Core	K8	Nehalem	K10	Nehalem	K10	Core

Quelle: MDR, Microprocessor Report, January 2010

Benchmarks

■ SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)

Processor	Intel Itanium 2 9050	Intel Itanium 9150M ⁵	IBM POWER5+	IBM POWER6+ ⁶	Fujitsu SPARC64 VI	Fujitsu SPARC64 VII	Sun UltraSPARC T2+ ⁷
Bit-Width	64-bit	64-bit	64-bit	64-bit	64-bit	64-bit	64-bit
Cores/Chlp x Threads/core	2 x 2	2 x 2	2 x 2	2 x 2	2 x 2	4 x 2	8 x 8
Clock Rate	1.60GHz	1.67GHz	2.20GHz	5.00GHz	2.40GHz	2.52GHz	1.60GHz
Cache: L1-L2-L3 - I/D or Unified	2 x 16K/16K - 1M/256K - 12M(on)	2 x 16K/16K - 1M/256K - 12M(on)	2 x 64K/32K - 1.92M - 3.6M(off)	2 x 64K/64K - 2 x 4M - 32M(off)	2 x 128K/128K - 6M - N/A	4 x 64K/64K - 6M - N/A	8 x 16K/8K - 4M - NA
Execution Rate/Core	6 Issue	6 Issue	5 Issue	7 Issue	4 Issue	4 Issue	16 Issue
Pipeline Stages	8	8	15	13	15	15	8int / 12fp
Out of Order	None	None	200	"Unlimited"	64	64	None
Memory Bus	8.5GB/s	10.6GB/s	12.8GB/s	75GB/s	8GB/s	8GB/s	42.7GB/s
Package	mPGA-700	mPGA-700	MCM-5370 pins	N/A	412 I/O pins	412 I/O pins	1831 pins
IC Process / Metal Layers	90nm / 7M	90nm / 7M	90nm / 10M	65nm / 10M	90nm / 10M	65nm / 11M	65nm / 8M
Die Size	596mm ²	596mm ²	245mm ²	341mm ²	421mm ²	400mm ²	342mm ²
Transistors	1.72B	1.72B	276M	790M	540M	600M	503M
List Price (Intro)	\$3,692	\$3,692	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Power (Max)	104W	104W	100W	>100W	120W	135W	95W ⁷
Availability	3Q06	4Q07	4Q05	4Q08 ⁶	2Q07	3Q08	3Q09
Scalability	1-64 chips	8-128 chips	1-32 chips	2-32 chips	4-64 chips	4-64 chips	1-4 chips
SPECint/fp2006 [cores]	14.5/17.3 [2]	N/A	10.5/12.9 [1]	15.8/20.1 [1]	9.7/21.7 [32]	11.5/13.0 [1]	N/A
SPECint/fp2006_rate [cores]	1534/1671 [128]	2893/N/A [256]	197/229 [16]	1866/1822 [64]	1111/1160 [128]	2088/1861 [256]	338/254 [32]
Development Status	Inactive	active	Inactive	active	Inactive	active	active

All SPEC scores are base. ^aScore measured in single-thread mode.

NOTES:

¹Higher-numbered X5272 at lower 3.40GHz frequency has a faster 1600MHz front-side bus and posts a slightly higher score (26.6) on the CINT2006 benchmark. Among Intel's dual-core processors, the 2.93GHz E7220 scales to 4 chips and consequently boasts the highest SPECrate INT/FP numbers (139/89.4).

²Posted 8-chip [32-core] SPEC intrate score of 338, but no official 8-chip SPEC fprate score.

³Although 2 chips is the design limit for an MP board, the X5570 is used in "virtual SMP" systems based on scalable blade architectures that, in principle, can go as high as 32K chips. Highest posted SPEC intrate/fprate score is for 32 chips [128 cores]: 3147/2553.

⁴Unisys ES7000 Model 7600R has a posted 96-core [16 chip] CINT2006rate number of 999 (but no other SPEC measures).

⁵Dual-core Itanium 2 9040 at 1.60GHz in SGI Altix 4700 Bandwidth System has posted 512 chip [1024 core] CFP2006 INRate/FPRate scores of 9031/10583.

⁶POWER6+ at 5.0GHz officially introduced in April 2009, but began shipping in 4Q08.

⁷Wattage at 1.40GHz, no published update with 3Q09 upgrade to 1.6GHz frequency.

Quelle: MDR, Microprocessor Report, January 2010

Literatur

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

Beobachtung des Laufzeitverhaltens

Messung während des Betriebs von Anlagen

■ Monitore

- Aufzeichnungselemente, die zum Zweck der Rechnerbewertung die Verkehrsverhältnisse während des normalen Betriebs beobachten und untersuchen.
- Hardware-Monitore
 - Unabhängige physikalische Geräte
 - Keine Beeinflussung
- Software-Monitore
 - Einbau in das Betriebssystem
 - Beeinträchtigung der normalen Betriebsverhältnisse

Beobachtung des Laufzeitverhaltens

Messung während des Betriebs von Anlagen

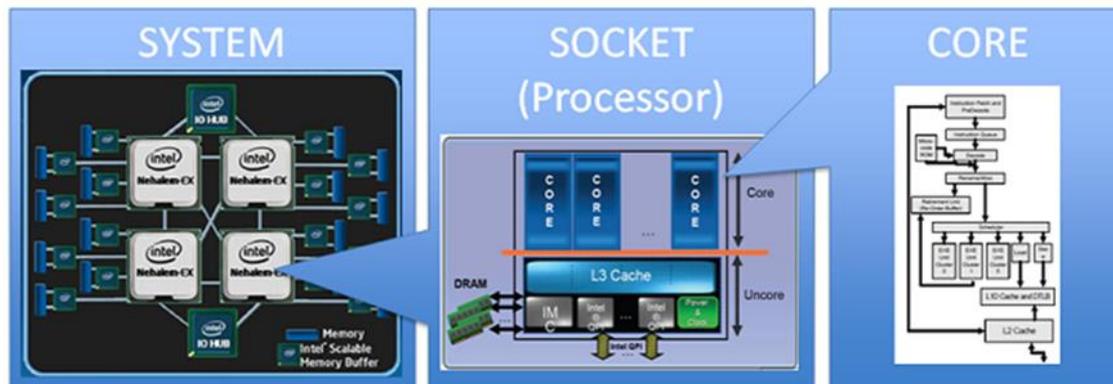
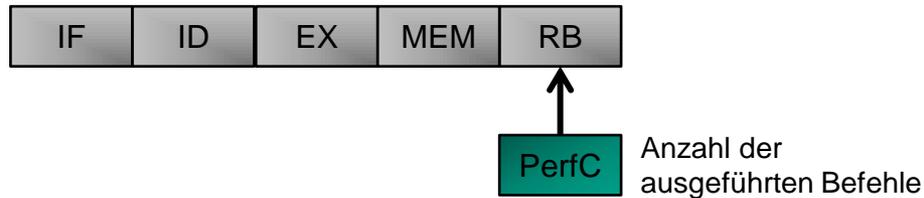
■ Monitore

- Aufzeichnungstechniken:
 - Kontinuierlich oder sporadisch
 - Gesamtdatenaufzeichnung (Tracing)
 - Realzeitauswertung
 - Unabhängiger Auswertungslauf (Post Processing)

Beobachtung des Laufzeitverhaltens

■ Beispiel: Performance Counter

- Spezialregister, Zähler in Mikroprozessoren
 - Zählen interne Ereignisse, z. B. CPU, Cache



Quelle: <https://software.intel.com/en-us/articles/intel-performance-counter-monitor>

Beobachtung des Laufzeitverhaltens

■ Beispiel: Performance Counter

- Werkzeuge zum Auslesen der Performance Counter
- Beispiel: Intel® Performance Counter Monitor
 - Herstellerspezifisch: für Intel CPUs
 - Bietet eine Reihe von C++ Routinen an, mit denen
 - Die Zähler ausgelesen werden können
 - eine Reihe von Informationen für prozessorinterner Ereignisse für den Benutzer aufbereitet werden können

Beobachtung des Laufzeitverhaltens

■ Beispiel: Performance Counter

- Werkzeuge zum Auslesen der Performance Counter
- Beispiel: Intel® Performance Counter Monitor

```

[CA] - Far 2.8.1420 x86 Administrator
IPC : instructions per CPU cycle (0..4 on Nehalem and Westmere)
FREQ : relation to nominal CPU frequency-current CPU frequency/nominal frequency (includes Intel<br>
> Turbo Boost Technology)
L3MISS: L3 cache misses
L2MISS: L2 cache misses (including other core's L2 cache *hits*)
L3HIT : L3 cache hit ratio (0.00-1.00)
L2HIT : L2 cache hit ratio (0.00-1.00)
L3CLK : ratio of CPU cycles lost due to L3 cache misses (0.00-1.00), in some cases could be >1.0 due
to a higher memory latency
L2CLK : ratio of CPU cycles lost due to missing L2 cache but still hitting L3 cache (0.00-1.00)
READ : bytes read from memory controller (in GBytes)
WRITE : bytes written to memory controller (in GBytes)

Core (SKT) | IPC | FREQ | L3MISS | L2MISS | L3HIT | L2HIT | L3CLK | L2CLK | READ | WRITE
0 0 0.09 0.60 551 K 569 K 0.03 0.04 2.10 0.02 N/A N/A
1 0 0.00 0.60 6 163 0.96 0.43 0.00 0.00 N/A N/A
2 0 0.34 0.60 691 42 K 0.98 0.10 0.01 0.12 N/A N/A
3 0 0.01 0.60 10 6134 1.00 0.01 0.00 0.02 N/A N/A
4 0 0.15 0.60 97 K 120 K 0.19 0.04 0.04 0.04 N/A N/A
5 0 0.01 0.60 23 6435 1.00 0.03 0.00 0.01 N/A N/A
6 0 0.06 0.60 4056 37 K 0.07 0.00 0.05 0.07 N/A N/A
7 0 0.01 0.60 55 10 K 0.99 0.00 0.00 0.02 N/A N/A
8 0 0.19 0.60 02 K 124 K 0.34 0.03 0.01 0.09 N/A N/A
9 0 0.01 0.60 462 4725 0.74 0.00 0.00 0.00 N/A N/A
10 0 0.01 0.60 17 953 0.98 0.00 0.00 0.00 N/A N/A
11 0 0.29 0.60 12 K 64 K 0.01 0.07 0.15 0.14 N/A N/A
12 1 0.05 0.60 1012 27 K 0.93 0.01 0.01 0.04 N/A N/A
13 1 0.01 0.60 55 11 K 1.00 0.00 0.00 0.02 N/A N/A
14 1 0.55 0.60 4491 40 K 0.91 0.25 0.02 0.04 N/A N/A
15 1 0.01 0.60 46 15 K 1.00 0.00 0.00 0.01 N/A N/A
16 1 0.02 0.60 271 22 K 0.99 0.00 0.00 0.02 N/A N/A
17 1 0.01 0.60 32 23 K 1.00 0.00 0.00 0.02 N/A N/A
18 1 0.03 0.60 009 35 K 0.98 0.02 0.00 0.03 N/A N/A
19 1 0.02 0.60 392 25 K 0.98 0.01 0.00 0.02 N/A N/A
20 1 0.03 0.60 2009 42 K 0.93 0.00 0.01 0.03 N/A N/A
21 1 0.01 0.60 07 20 K 1.00 0.00 0.00 0.02 N/A N/A
22 1 0.12 0.60 12 K 99 K 0.80 0.13 0.04 0.07 N/A N/A
23 1 0.01 0.60 142 23 K 0.99 0.00 0.00 0.02 N/A N/A

SKT 0 0.00 0.60 750 K 904 K 0.24 0.04 0.51 0.04 0.01 0.00
SKT 1 0.00 0.60 23 K 396 K 0.94 0.00 0.01 0.03 0.00 0.00

TOTAL * 0.00 0.60 773 K 1305 K 0.44 0.05 0.19 0.03 0.01 0.00

PHYSICAL CORE IPC: 0.16 -> corresponds to 4.00 x core utilization

Intel(r) QPI traffic estimation in bytes (traffic coming to CPU/socket through QPI links):

QPI0 QPI1
SKT 0 1997 K 1989 K
SKT 1 1760 K 13 K

Total QPI traffic: 5761 K QPI traffic/Memory controller traffic: 0.34
°C
C:\>
  
```

Metriken:

Core: Ausgeführte Befehle, Ausführungszeit in Takten, Cache Treffer und Fehlzugriffe,

Uncore: Anzahl der gelesenen Bytes vom Speicher-Controller, Anzahl der geschriebenen Bytes in den Speicher-Controller, Datenverkehr über QPI Verbindungskanäle

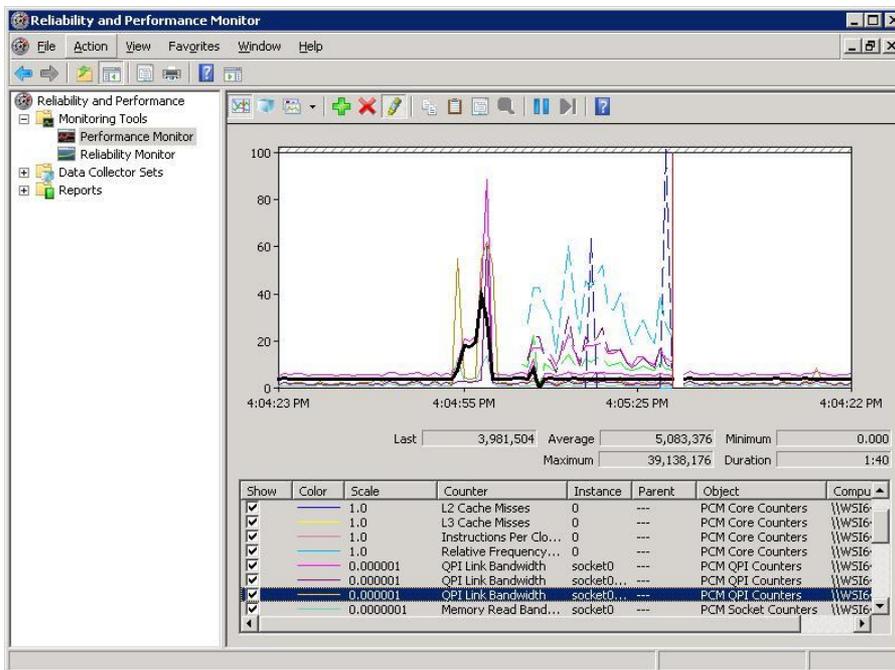
Quelle: <https://software.intel.com/en-us/articles/intel-performance-counter-monitor>

Beobachtung des Laufzeitverhaltens

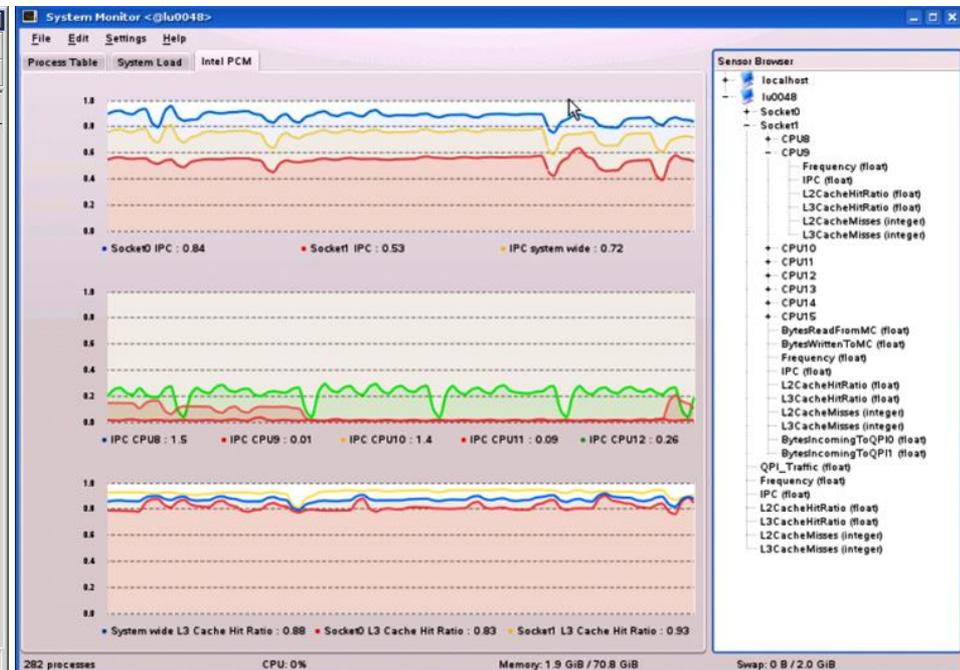
■ Beispiel: Performance Counter

- Werkzeuge zum Auslesen der Performance Counter
- Beispiel: Intel® Performance Counter Monitor

Windows* Perfmon



KDE Utility ksysguard



Quelle: <https://software.intel.com/en-us/articles/intel-performance-counter-monitor>

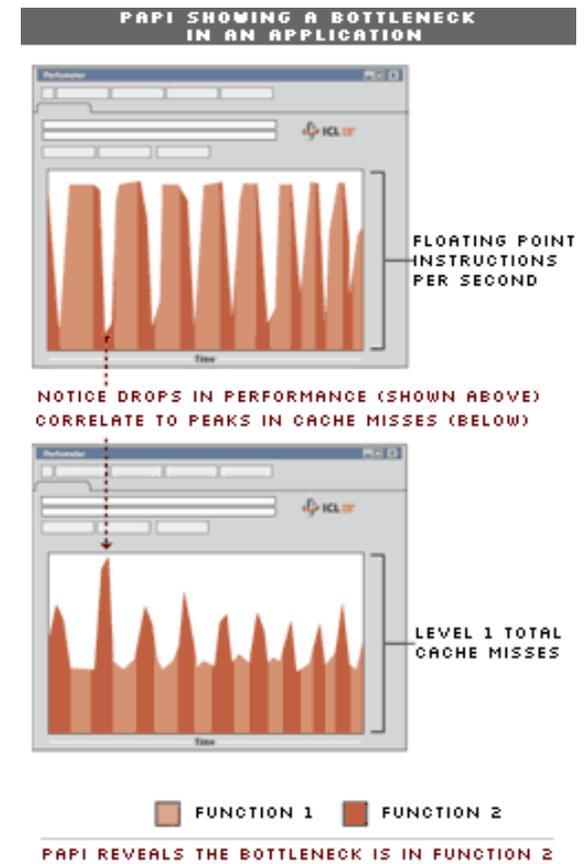
Beobachtung des Laufzeitverhaltens

■ Beispiel: Performance Counter

■ Werkzeuge zum Auslesen der Performance Counter

■ Beispiel: PAPI

- API für den Zugriff auf Performance Counter
- Herstellerunabhängig
- Grundlage für eine Reihe von Werkzeugen für die Leistungsanalyse und Bewertung für Multiprozessoren



Quelle: <http://icl.cs.utk.edu/papi/overview/index.html>

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

- Unabhängig von der Existenz eines Rechners

■ Modellbildung

- Annahmen über die Struktur und Betrieb eines Rechners und über die Prozesse
- Darstellung der für die Analyse relevanten Merkmale des Systems:
 - Systemkomponenten
 - Datenverkehr zwischen den Systemkomponenten
- Abstrahierung komplexer Systeme
 - Nur die interessierenden Größen werden erfasst
- Ziel:
 - Aufdecken von Beziehungen zwischen Systemparametern
 - Ermitteln von Leistungsgrößen (Auslastung von Prozessoren und Kanälen, mittlere Antwortzeiten, Warteschlangenlängen, ...)

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

■ Analytische Methoden

- versuchen auf mathematischem Weg, Beziehungen zwischen relevanten Leistungskenngrößen und fundamentalen Systemparametern herzuleiten
- oft nur minimaler Aufwand, aber dafür weniger aussagekräftig

- Warteschlangenmodelle
 - Leistungsanalyse von Rechensystemen
- Petrinetze
 - theoretische Untersuchungen
- Diagnosegraphen
 - Zuverlässigkeitsanalysen
- Netzwerkflussmodelle
 - Kapazitätsüberlegungen

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

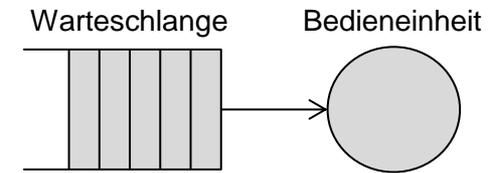
■ Analytische Methoden

■ Beispiel Warteschlangenmodelle

■ Gesetz von Little: $k = \lambda * t$ bzw. $Q = \lambda * w$

- k : mittlere Anzahl der Aufträge
- λ : Durchsatz (mittlere Anzahl von Aufträgen, die pro Zeiteinheit bedient werden)
- t : Antwortzeit (Verweilzeit, Gesamtheit der Zeit, die ein Auftrag im Wartesystem verbringt)
- Q : mittlere Warteschlangenlänge
- w : Wartezeit (Zeit, die angibt, die ein System im Wartesystem verbringt)

- Voraussetzung: statistisches Gleichgewicht:
 - Die Rate, mit der die Aufträge ankommen ist gleich der Rate, mit der die Aufträge abgehen



Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

■ Simulation

- Steigende Komplexität der Computer Systeme aufgrund der steigenden Anzahl von Komponenten und wachsender Funktionalität
- Zentrales Werkzeug für den Rechnerarchitekt
 - Evaluation neuer Ideen
 - Exploration des Entwurfsraums
- Bezüglich Hardware-Prototypen und analytischen Modellen:
 - Kompromiss bezgl. Genauigkeit, Kosten, Flexibilität, Komplexität
- Quantifizierung einer Metrik bei der Ausführung einer Arbeitslast (Workload)
 - Rechenleistung, Leistungsaufnahme, Zuverlässigkeit
- Workload Characterization:
 - Verstehen der Gründe für das beobachtete Verhalten
 - Verstehen des Zusammenspiels zwischen der Arbeitslast und dem Zielsystem

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

■ Simulation

■ Simulatoren:

- Ein Simulator modelliert die wesentlichen Eigenschaften oder das Verhalten einer Zielmaschine
- Verschiedene Ebenen bezüglich der Details und der Genauigkeit

■ Benchmarks:

- Bewertung einer oder mehrerer Komponenten einer Zielmaschine
- Vergleich von verschiedenen Architekturen oder Architekturmerkmalen

■ Entwurf und Einsatz von Simulatoren:

- Kompromiss zwischen hoher Simulationsgenauigkeit, hoher Simulationsgeschwindigkeit, und niedrigen Entwicklungsaufwand

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

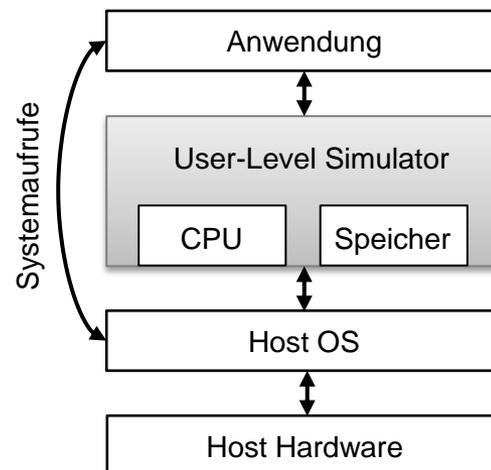
■ Simulatoren: Taxonomie

■ User-Level Simulatoren

- Simulation der Mikroarchitektur eines Prozessors
- Keine Berücksichtigung von Systemressourcen

■ Beispiele:

- SimpleScalar, Asim, MINT, RSIM: Rechenleistung (z. B. IPC)
- Watch (als Erweiterung von SimpleScalar): Power



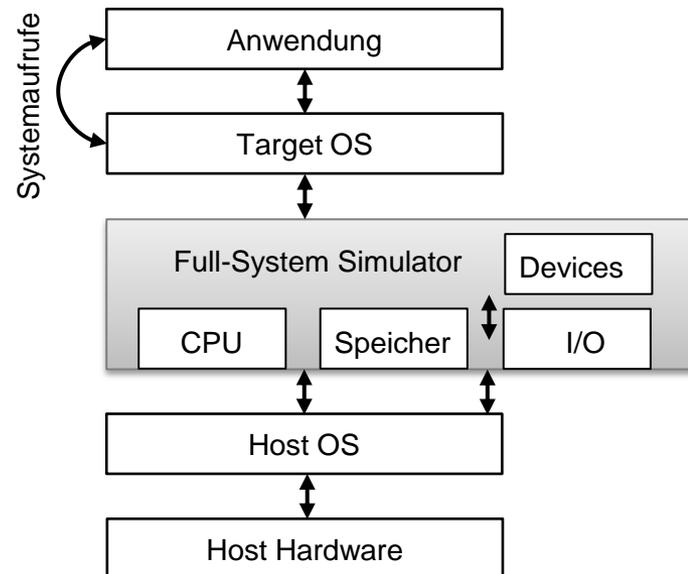
Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

■ Simulatoren: Taxonomie

■ Full-System Simulatoren

- Modellieren ein vollständiges Computersystem, einschließlich CPU, I/O, Disk, Netzwerk
- Booten und Ausführung von Betriebssystemen
- Beobachten der Interaktion von Workload und System



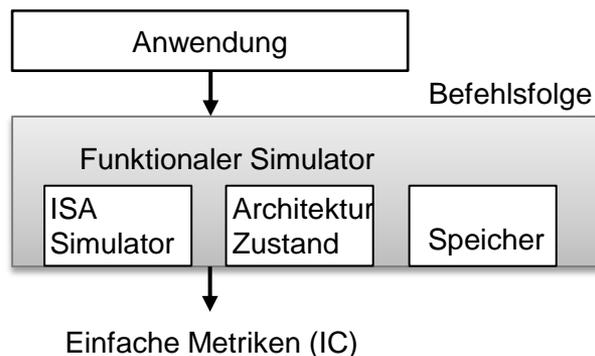
Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

■ Simulatoren: Taxonomie

■ Funktionale Simulatoren (Functional Simulators)

- Modelliert nur die Funktionalität (ohne Berücksichtigung der Mikroarchitektur eines Prozessors)
- Emulation der Befehlsatzarchitektur
- Bildet oft den Ausgangspunkt einer komplexeren Simulationsumgebung

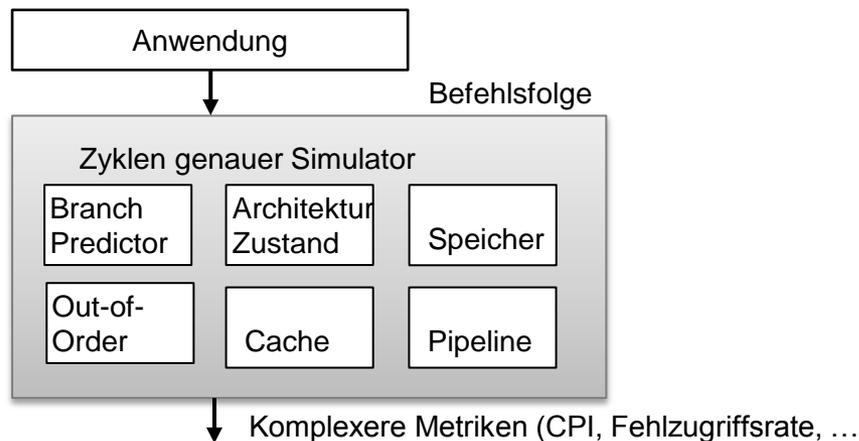


Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

■ Simulatoren: Taxonomie

- Zyklen genaue Simulatoren (Cycle-accurate Simulators)
 - Erfassen die Details der Mikroarchitekturblöcke
 - Emulation der Funktionalität der Mikroarchitekturblöcke sowie des Zeitverhaltens
 - Mikroarchitekturblöcke sind parametrisierbar:
 - Beispiel Cache: Assoziativität, Cachezeilenlänge, Größe



Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

■ **Simulatoren: Taxonomie**

- Ein Prozessorsimulator simuliert die Ausführung der Befehle eines Benchmarks auf einem Zielprozessor
- Wie erhält man die Befehle:
 - Spurgetriebene Simulatoren (trace-driven simulation)
 - Ausführungsgetriebene Simulatoren (execution driven simulation)

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

■ Simulatoren: Taxonomie

■ Trace-driven Simulation

- Ausführung des Benchmarks auf einem ISA-kompatiblen Prozessor, oder einem Simulator, aber nicht notwendigerweise auf dem selben Prozessor wie dem Zielprozessor
- Während der Ausführung des Benchmarks werden die ausgeführten Befehle auf eine Spurdatei (Trace) geschrieben bzw. protokolliert
- Nach der Aufzeichnung dient die Spurdatei als Eingabe für einen Zyklus genauen Simulator
- Jede Instruktion wird simuliert auf der Basis des Mikroarchitekturmodells

- Viele Varianten:
 - Beispiel: Speicherverhalten: nur Speicheroperationen werden aufgezeichnet

Bewertung der Leistungsfähigkeit

Modelltheoretische Verfahren

■ **Simulatoren: Taxonomie**

■ Execution-driven Simulation

- Die ausführbare Datei des Benchmark dient als Eingabe für den Simulator
- Simulator muss das Zeitverhalten sowie die Funktionalität genau reproduzieren

- Aufwendige Entwicklung
- Genauigkeit und Flexibilität besser als bei Spurgetriebenen Simulatoren