

Projekt zur Vorlesung
Computer Systems Performance Analysis and
Benchmarking

Einfluss der Taktfrequenz von DDR
SDRAM und des Prozessors auf die
Speicherperformance eines Computers

Durchgeführt von:
Reto Keiser

Assistent:
Christian Kurmann

Wintersemester 2002/2003

Einführung

Heutzutage wird oft mit den hohen Taktfrequenzen für ein neues Computersystem geworben. Oft wird aber vergessen, dass dies nicht der einzige Faktor ist, welcher die Geschwindigkeit eines Systems ausmacht. Damit die Performance eines Systems möglichst optimal ist, müssen alle Komponenten zusammenspielen. Dabei kann ein schwaches Glied in der Kette das ganze System herunterbremsen.

In den letzten Jahren war die Taktfrequenz von Computersystemen kontinuierlich angestiegen. Während des gleichen Zeitraumes nahm die Taktfrequenz des Hauptspeichers in einem viel kleineren Masse zu. Aus diesem Grunde vergrösserte sich das Verhältnis zwischen der Taktfrequenz des Prozessors und des Hauptspeichers immer mehr.

Da aber die meisten Programme im Betrieb viele Daten benötigen, hängt die Leistung des Systems auch davon ab, wie schnell die Daten in den Prozessor und wieder zurück geschaufelt werden können.

Zwar kann der Cache die Kluft zwischen dem Durchsatz des Hauptspeichers und des Prozessors vor allem bei kleinen Datenmengen etwas auffüllen, die Speicherbandbreite bleibt aber ein limitierender Faktor.

Um den Einfluss der Taktfrequenz des Hauptspeichers und des Prozessors zu untersuchen, habe ich auf zwei Computersystemen die Speicherperformance mit Hilfe des Programms **ECT memperf** ausgemessen. Um die Daten vergleichen zu können, veränderte ich im Bios die Taktfrequenz des Hauptspeichers und den Teilfaktor der Prozessortaktfrequenz.

Beschreibung von ECT memperf

ECT memperf (Extended Copy Transfer Characterization) ist ein Tool zum Untersuchen von Speichersystemen von Computern. Dabei versucht es den maximalen Speicherdurchsatz eines Systems mit Datenblöcken verschiedener Grösse und verschiedener Zugriffsmuster zu messen.

Die getesteten Blockgrössen liegen standardmässig im Bereich von 512 Bytes bis 8MByte, wobei diese Werte auch verändert werden kann. Durch die Veränderung des Durchsatzes bei verschiedenen Blockgrössen zeigt sich der Einfluss des Caches auf die Systemleistung.

Zudem testet das Programm auch verschiedene Zugriffsmuster. Dabei gibt der Wert in der ersten Spalte der Ausgabe an, wie gross der Abstand jeweils zwischen zwei ausgelesenen 8 Byte Blöcken ist. Beträgt der Wert 1, so wird der ganze Speicher linear ausgelesen, beim Wert 2 wird jeweils ein 8 Byte Block übersprungen. Dieser wird dann in einem zweiten Durchgang gelesen, damit trotzdem der ganze Speicherbereich durchgearbeitet wird.

Dabei werden nicht nur Zweierpotenzen wie 16, 32 und 64 getestet sondern auch Werte knapp darunter wie 31 und 63, um Schwächen bei der Zuordnung des Caches auf die Schliche zu kommen.

Bei den Bereichen 512 Bytes und 1 KByte befinden sich einige Nullen am unteren Ende der Tabelle. Diese kommen zustande, da das Programm bereits nach einem Sprung von beispielsweise 192*8 Byte jenseits des Blocks landen würde und vorne beim nächsten noch nicht bearbeiteten Eintrag fortfahren würde, was aber dem linearen Auslesen entspräche und an dieser Position das Resultat verfälschen würde.

Die untersuchten Computersysteme:

System 1:

AMD Athlon Thunderbird 1.4Ghz,
128 kByte L1 Cache, 256 kByte L2 Cache
512 MByte DDR266 PC2100 CL2 (2 Module)

Im Betrieb wird die Taktfrequenz des Prozessors im Verhältnis 10.5 die 133 MHz auf den Speicherbus runtergeteilt. Da es sich um Double Data Ram handelt, kann der Speicher sowohl bei der Positiven als auch bei der negativen Flanke des Clocksignals Daten liefern. Der theoretische maximale Datendurchsatz beträgt demnach 2.1 Gigabyte pro Sekunde, wie der Ausdruck PC2100 schon aussagt.

Um einen Vergleich der Leistung des Systems bei verschiedenen Taktfrequenzen zu erhalten, änderte ich im Bios den CPU Clock ratio manuell auf 7.5 und mass die Performance auch bei 1 GHz, wobei sich die Taktfrequenz des Hauptspeichers nicht ändert.

System 2:

Intel Pentium 4 2.533GHz, FSB533
64 kByte L1 Cache, 512 kByte L2 Cache
256 Mbyte DDR333 PC 2700 CL2.5 (1 Modul)

Im Normalbetrieb läuft der Prozessor mit einer Taktfrequenz von 2.533GHz, und der Speicher mit 166 MHz. Auch hier handelt es sich um DDR, so dass bei beiden Signalflanken Daten gesendet werden können und so der theoretische maximale Datendurchsatz 2.7 Gigabyte pro Sekunde beträgt.

In diesem Falle ist es nicht so einfach möglich das CPU clock ratio zu ändern, weil dieser Wert von Intel im Prozessor festgelegt wurde. Aus diesem Grunde änderte ich hier die Taktfrequenz des Hauptspeichers von 166MHz auf 133MHz. Parallel dazu änderte sich die Frequenz des Prozessors auf 1.9GHz.

Analyse der Speicher Benchmarks des AMD Athlon Systems

Bei den kleinen working Sets bis 64 Kilobyte liegt der Durchsatz mit teilweise über 5 Gigabyte pro Sekunde deutlich über der Bandbreite des Hauptspeichers. Das liegt daran, dass in diesem Bereich der Cache voll zum Zuge kommt.

Erstaunlich ist aber, dass der Durchsatz bei wachsender Grösse des Arbeitsbereichs bis 64 K zunimmt. Dies macht sich am Deutlichsten dort bemerkbar, wo die Schrittweite des Zugriffsmusters anwächst. Ich vermute, dass sich hier bei den grossen Durchsätzen die Bürokratie von memperf bemerkbar macht. Je kleiner das working Set und je grösser die Schrittweite, desto häufiger verlässt die Testroutine die innerste Schleife was einen weiteren Zeitverlust bedeutet. Eine Schrittweite von 96 bei einem 1 Kilobyte working Set bedeutet beispielsweise, dass in der innersten Schleife maximal Zwei Werte ausgelesen werden, bevor die Schleife wieder verlassen wird, um dasselbe Muster um 1 verschoben zu wiederholen. Mit einer Dummyschleife, in welcher die Speichertransaktionen fehlen, könnte diesem Effekt vorgebeugt werden, da man weiss, wie viel ZUeit in den Schleifenstrukturen verloren geht. Man muss einfach aufpassen, dass diese Schleife vom Compiler nicht wegoptimiert wird.

Ab einer Grösse des working Sets von 128 Kilobyte brechen die Werte signifikant ein. Falls der die Schrittweite der Zugriffsmusters eine Zweierpotenz ist, scheint dieser Effekt speziell stark auszufallen. Dies hängt wahrscheinlich damit zusammen, wie der Speicher in den Cache gemappt wird. Dieser Effekt ist etwa bis zu einer Grösse des working Sets bis zu 1 Megabyte sichtbar, darüber geht die Grösse des Caches in vergleich zum working Set unter.

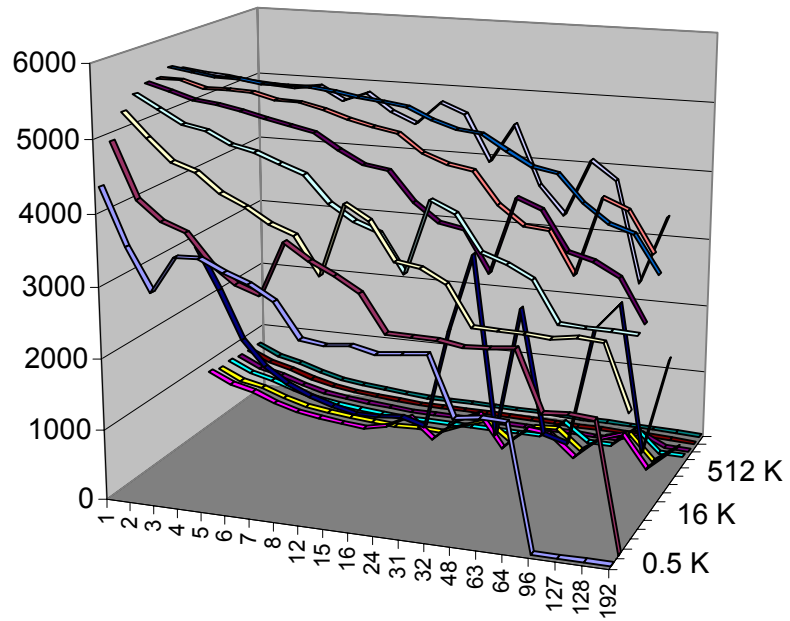
Wenn grosse Bereiche linear ausgelesen werden, kann DDR seine Stärken ausspielen, auch wenn es hier nicht so scheint, als dass der burst Mode unterstützt wird. Die Lesegeschwindigkeit liegt etwa um den Faktor drei unter dem theoretisch erreichbaren Wert. Nichtsdestotrotz sind Lesezugriffe bei kleinen Schrittweiten wesentlich schneller, als bei grösseren Sprüngen. Ich nehme an, das hängt damit zusammen, dass bei kleinen Schrittweiten in den Speichermodulen mehr Daten von einer Zeile in der Zugriffsmatrix gelesen werden können. Bei grösseren Schritten gleicht das Muster eher einem random Access und das Speichermodul muss vor dem Auslesen sowohl die Spalte als auch die Zeile neu initialisieren.

Um zu visualisieren, in welchem Rahmen sich die Resultate beim Wechsel des Multiplikators verändert haben, berechnete ich jeweils das Verhältnis zwischen den zwei Szenarien. Da beim Athlon nur der Multiplikator und somit die Taktfrequenz des Prozessors jedoch nicht die Taktfrequenz des Speichers geändert wurde, würde man hier erwarten, dass sich der Speicherdurchsatz nicht signifikant ändert. Dies gilt natürlich nur, solange sich das Bottleneck beim Speicher und nicht beim Prozessor befindet.

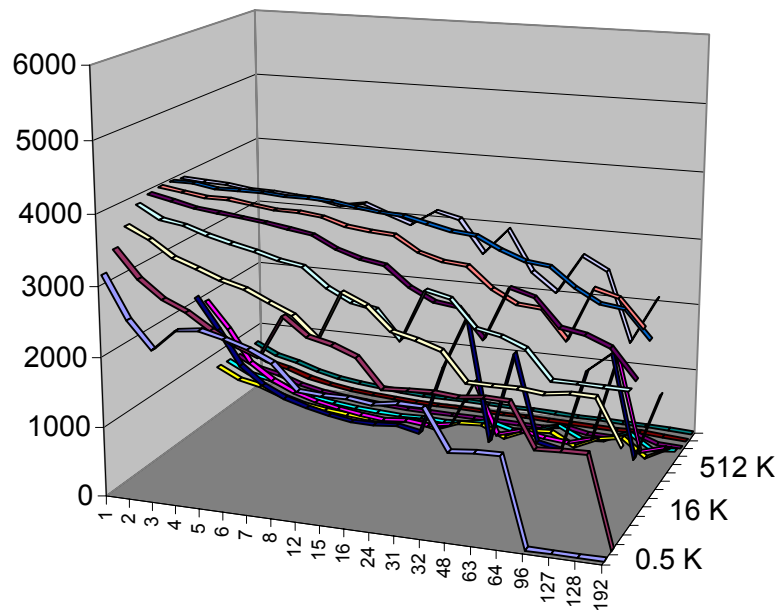
Diese Vermutung stimmt bei den grossen Speicherblöcken. Bei Blockgrössen von 1 bis 8 Megabyte liegt das Verhältnis im Bereich von 1. die Taktfrequenz scheint dort keinen Einfluss auf die Speicherperformance zu haben.

Bei den kleinen Speicherblöcken bis 128 Kilobyte liegt das Verhältnis relativ genau bei 1.4, also dem Verhältnis der Taktfrequenzen dieser zwei Testszenarien. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dort das ganze working Set in den Cache passt. Die Taktfrequenz dieser Caches ist an die Taktfrequenz des Prozessors gebunden und ändert sich im gleichen Verhältnis. Deshalb bleibt das Verhältnis auch dann relativ genau erhalten, wenn sich der Durchsatz abhängig vom Zugriffsmuster verändert.

Load sum: Athlon 1.4 GHz (MByte/s)



Load sum: Athlon 1 GHz (MByte/s)



Bei einer Grösse des working Sets von 256 Kilobyte liegen die Resultate auf der Grenze und verhalten sich speziell. In diesem Falle ist der Speicherdurchsatz des langsamer getakteten Computers zum Teil wesentlich schneller, als bei höherem Takt. Dieser Effekt tritt bei den meisten Zugriffsmustern auf, aber es gibt auch Ausnahmen, wo der höher getaktete Prozessor vorteile hat. Der Trend, bei welchen Zugriffsmustern dieser Effekt genau auftritt, hat keine offensichtliche Logik, vermutlich ist es hardwarebedingt, da die Grösse der Caches mit der des working Sets übereinstimmt und so bestimmte Randeffekte auftreten.

Beim Schreiben der Speicherzellen treten in etwa die gleichen Effekte auf, wie beim Lesen. Hier scheint aber der Cache einen grösseren Einfluss zu haben. Bei kleinen working Sets werden bis über 6 Gigabyte pro Sekunde geschrieben; dieser Wert fällt aber sehr stark ab, wenn grössere Bereiche bearbeitet werden. Es scheint also so, dass der Cache als Zwischenpuffer arbeitet und die werte bei kleinen Sets dort mehrfach aktualisiert werden, bevor sie einmal ins Speichermodul geschrieben werden. Reicht der Cache nicht mehr aus, muss der Prozessor jeweils warten, bis der Schreibvorgang beendet ist.

Analyse der Speicher Benchmarks des Intel Pentium 4 Systems

Der Intel Pentium 4 in der neueren Bauweise hat einen 512 Kilobyte grossen L2 Cache, welcher die Speicherbandbreite bis zu einer Grösse des working Sets von 256 Kilobyte auf einem konstant hohen Niveau hält. Der L1 Cache von 64 Kilobyte hat keinen signifikanten Einfluss auf die Speicherperformance.

Bei diesen kleinen working Sets werden Leseraten von über 6.5 Gigabyte pro Sekunde erreicht. Dieser Wert nimmt bei kleiner werdendem working Set und anwachsender Schrittweite im Zugriffsmuster langsam ab, was auf einen höheren Aufwand für die Generierung der Schleifen im Analysetool hindeutet, wie ich es schon bei der Analyse des ersten Systems angesprochen habe.

Bei einer Grösse des working Sets ab 512 Kilobyte bricht der Speicherdurchsatz deutlich ein und pendelt sich bei grossen Schrittweiten auf etwa 160 Megabyte pro Sekunde ein. Sind die Schrittweiten kleiner, zeigt sich dies in einer Erhöhung des Durchsatzes, da dort die Matrix des Moduls Reihe für Reihe ausgelesen werden kann.

Auch wenn der Durchsatz bei 512 Kilobyte praktisch in einem Schritt auf die Werte von working Sets vom mehr als 1 Megabyte einbricht, scheinen Zugriffsmuster der Form $3 \cdot 2^n$ deutliche Vorteile zu haben. Die Schrittweite 127 kann sich sogar bis zu einer Grösse des working Sets von 1 Megabyte auf einem hohen Niveau halten.

Bemerkenswert ist, dass die Speicherperformance beim linearen Lesen im Vergleich zum Athlon System wesentlich besser ausfällt und bei 2.533GHz bei working Sets ab 512 Kilobyte knapp mehr als 2 Gigabytes pro Sekunde erreicht werden, wenn man bedenkt, dass das theoretische Maximum bei 2.7 Gigabyte liegt. Hier scheint wirklich ein burst mode unterstützt worden sein.

Um die Veränderung der Speicherperformance zu visualisieren habe ich auch bei diesem System das Verhältnis des Speicherdurchsatzes zwischen den zwei Taktfrequenzen des Hauptspeichers berechnet. Bei einer Veränderung der Frequenz von 166 MHz auf 133 MHz würde man hier ein Verhältnis von 1.25 erwarten. Dieser Wert wird bei grossen working Sets ab 512 Kilobyte auch ziemlich gut erreicht; Ausreisser gibt es nur bei den oben angesprochenen Schrittweiten von 48, 96, 127 und 192.

Erstaunlicherweise liegt die Speicherperformance bei kleinen Arbeitsbereichen im Bereich von 1; manchmal ist das eine System etwas schneller, manchmal das andere. Auch wenn sich das Verhältnis der Taktfrequenz zwischen dem Prozessor und dem Bus nicht ändert, würde ich trotzdem erwarten, dass sich der Durchsatz dort etwas verändert. Schliesslich finden die meisten Transfers zwischen dem Prozessor und dem Cache statt. Möglicherweise hat dies mit der Zugriffszeit des Caches zu tun, die sich bei hohen Taktraten des Prozessors nicht weiter verbessern kann. In diesem Falle muss dann der Prozessor auf die Daten warten und der Vorteil der höheren Taktfrequenz geht verloren.

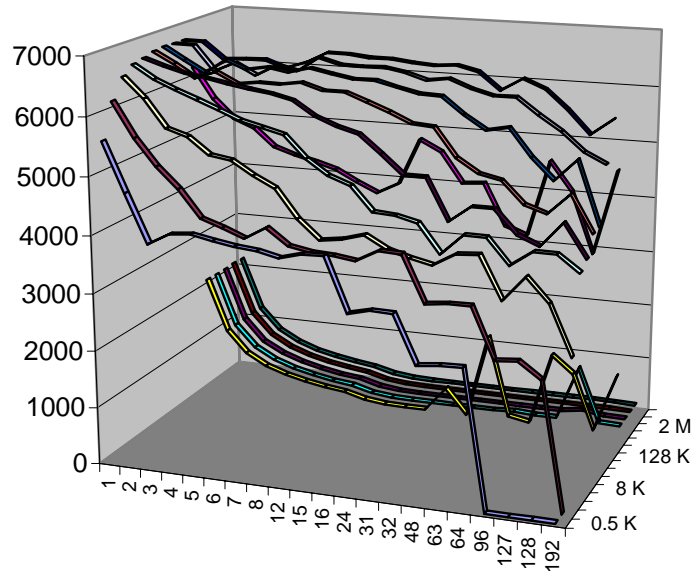
Im Gegensatz zu Athlon System zeigt sich beim Pentium 4 kein unerwartetes Verhalten, wenn man mit der Grösse des Arbeitsbereiches die Grenzen des L2 Cache erreicht. In diesem Falle fällt dann einfach der Durchsatz auf ein Niveau, wie bei grossen working Sets, aber es kam nie vor, dass der Computer mit einer schnelleren Konfiguration einen signifikant kleineren Durchsatz hatte.

Wenn Daten im System geschrieben werden müssen, steht der Pentium 4 nicht so gut da. Selbst wenn die Daten noch in den Cache passen, ist die Schreibperformance teilweise

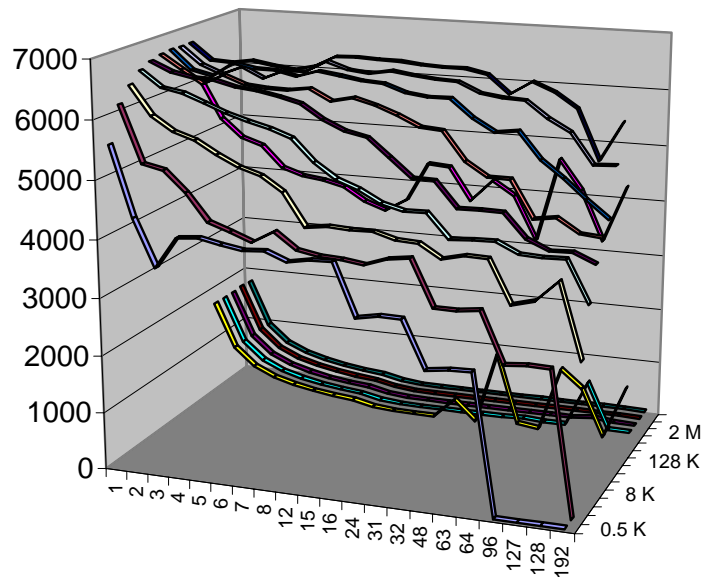
deutlich unter den Leseperformanzen. Je nach Grösse des Arbeitsbereiches zeigen sich die Schwächen bei anderen Zugriffsmustern. Ist beispielsweise bei einem working Set von 512 Bytes ein Einbruch bei einer Schrittweite von 5 bis 8 zu verzeichnen, liegt dieser Einbruch bei einem working Set von 2 Kilobyte bei einer Schrittweite von 7 bis 32. Je grösser der Arbeitsbereich (bis 256 Kilobyte) wird, desto mehr nivelliert sich dieser Effekt aus.

Bei Grössen von 512 Kilobyte und mehr, treten wieder die gleichen Effekte auf, wie beim Lesen, ausser dass die Werte um einen Faktor von 2 bis 3 unter der Leseperformance liegen. Dabei geht das lineare Schreiben etwa dreimal langsamer vonstatten wie das Lesen; bei grösseren Schrittweiten verkleinert sich das Verhältnis auf den Faktor 2, da die Allokation der Speicherstelle immer noch gleich lange benötigt wie beim Lesen, und so der langsamere Schreibvorgang weniger ins Gewicht fällt.

Load sum: Pentium 4 2.533 GHz; DDR333



Load sum: Pentium 4 1.9 GHz; DDR266



Tabellen

Test Load Sum (Mbyte/s) AMD Athlon 1.4 GHz; DDR266

	0.5 K	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K	32 K	64 K	128 K	256 K	512 K	1 M	2 M	4 M	8 M
1	4344	4887	5213	5393	5487	5487	5585	5512	2834	832	769	788	755	748	742
2	3554	4116	4887	5213	5393	5487	5536	5463	2210	671	615	634	599	592	587
3	2961	3849	4582	5025	5296	5388	5486	5438	1491	594	550	551	518	510	509
4	3475	3724	4468	4965	5257	5393	5487	5393	1117	459	425	436	409	399	398
5	3491	3320	4210	4793	5193	5385	5438	5368	895	357	332	341	322	316	315
6	3332	3079	4051	4721	5108	5296	5434	5345	746	303	283	288	275	270	269
7	3207	2961	3849	4591	5035	5291	5438	5392	640	263	245	251	239	235	234
8	3008	3724	3724	4468	4965	5213	5393	5213	559	231	215	221	212	209	208
12	2528	3491	3207	4105	4757	5108	5342	5342	559	301	186	194	185	181	181
15	2485	3332	4210	3895	4582	5025	5300	5105	596	489	202	191	182	176	174
16	2522	3128	4010	3768	4533	4965	5257	4965	496	193	180	185	177	174	174
24	2444	2618	3491	3241	4133	4721	5108	5274	1955	497	320	187	176	167	163
31	2484	2612	3443	4268	3882	4595	5000	5144	3098	663	436	182	167	159	151
32	2522	2607	3258	4116	3814	4533	4965	4517	494	186	174	178	156	152	152
48	1700	2550	2715	3620	3258	4105	4757	5046	2392	507	426	179	148	141	135
63	1749	2566	2701	3499	4306	3849	4565	4240	591	477	442	423	151	127	121
64	1738	2607	2696	3328	4170	3814	4501	3862	493	173	159	164	130	125	123
96	0	1777	2666	2766	3643	3241	4133	4633	2192	485	403	161	125	114	107
127	0	1804	2722	2746	3547	4310	3879	4386	2590	600	500	452	257	117	102
128	0	1777	2696	2744	3363	4170	3768	3022	488	139	128	131	100	94	92
192	0	0	1805	2728	2779	3620	3258	3947	1878	447	380	129	86	77	71

Test Load Sum (Mbyte/s) AMD Athlon 1 GHz; DDR266

	0.5 K	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K	32 K	64 K	128 K	256 K	512 K	1 M	2 M	4 M	8 M
1	3128	3400	3637	3862	3934	3959	3959	3934	2049	1898	757	744	729	727	727
2	2522	3008	3475	3680	3862	3910	3959	3910	1578	1494	593	582	568	562	565
3	2138	2749	3245	3623	3788	3858	3909	3897	1065	1008	526	519	493	488	488
4	2444	2607	3128	3514	3746	3862	3910	3850	799	767	404	399	377	375	375
5	2485	2386	2996	3424	3709	3809	3909	3837	639	615	317	314	303	301	299
6	2404	2199	2905	3350	3665	3765	3882	3814	533	510	270	267	254	254	254
7	2298	2080	2749	3252	3609	3761	3885	3790	457	440	233	229	222	221	220
8	2142	2696	2607	3192	3554	3724	3862	3724	399	387	203	203	196	195	194
12	1788	2444	2298	2932	3387	3623	3811	3788	399	352	207	184	172	170	169
15	1766	2365	2996	2757	3280	3581	3768	3657	424	381	266	196	170	167	164
16	1777	2234	2844	2696	3225	3554	3746	3544	354	343	174	173	164	163	162
24	1725	1833	2528	2298	2946	3350	3665	3765	1396	409	311	200	164	156	154
31	1782	1848	2444	3030	2778	3255	3592	3676	2170	1101	331	266	155	147	144
32	1777	1862	2334	2951	2732	3225	3554	3225	353	338	170	168	146	143	143
48	1209	1833	1929	2572	2324	2932	3387	3592	1709	438	324	196	142	133	130
63	1242	1877	1924	2503	3079	2749	3257	3021	423	376	345	332	186	125	116
64	1251	1862	1931	2370	2979	2720	3225	2768	353	337	160	158	121	116	115
96	0	1248	1892	1968	2595	2315	2961	3315	1566	443	318	179	119	109	104
127	0	1272	1940	1964	2533	3073	2771	3135	1858	1704	380	346	214	116	97
128	0	1282	1931	1955	2397	2979	2720	2168	349	338	127	125	95	90	88
192	0	0	1289	1955	1981	2595	2333	2812	1340	436	312	154	81	71	67

Verhältnis der Speicherperformance zwischen einem mit 1.4 GHz und einem mit 1 GHz getakteten Athlon

	0.5 K	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K	32 K	64 K	128 K	256 K	512 K	1 M	2 M	4 M	8 M
1	1.39	1.44	1.43	1.40	1.39	1.39	1.41	1.40	1.38	0.44	1.02	1.06	1.04	1.03	1.02
2	1.41	1.37	1.41	1.42	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	0.45	1.04	1.09	1.05	1.05	1.04
3	1.38	1.40	1.41	1.39	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	0.59	1.05	1.06	1.05	1.05	1.04
4	1.42	1.43	1.43	1.41	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	0.60	1.05	1.09	1.08	1.07	1.06
5	1.40	1.39	1.41	1.40	1.40	1.41	1.39	1.40	1.40	0.58	1.05	1.09	1.06	1.05	1.05
6	1.39	1.40	1.39	1.41	1.39	1.41	1.40	1.40	1.40	0.59	1.05	1.08	1.08	1.07	1.06
7	1.40	1.42	1.40	1.41	1.40	1.41	1.40	1.42	1.40	0.60	1.05	1.10	1.08	1.06	1.06
8	1.40	1.38	1.43	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	0.60	1.06	1.09	1.08	1.07	1.07
12	1.41	1.43	1.40	1.40	1.40	1.41	1.40	1.41	1.40	0.85	0.90	1.05	1.07	1.06	1.07
15	1.41	1.41	1.41	1.41	1.40	1.40	1.41	1.40	1.40	1.28	0.76	0.98	1.07	1.06	1.06
16	1.42	1.40	1.41	1.40	1.41	1.40	1.40	1.40	1.40	0.56	1.03	1.07	1.07	1.07	1.07
24	1.42	1.43	1.38	1.41	1.40	1.41	1.39	1.40	1.40	1.21	1.03	0.93	1.08	1.07	1.06
31	1.39	1.41	1.41	1.41	1.40	1.41	1.39	1.40	1.43	0.60	1.32	0.68	1.08	1.08	1.05
32	1.42	1.40	1.40	1.39	1.40	1.41	1.40	1.40	1.40	0.55	1.02	1.06	1.06	1.06	1.07
48	1.41	1.39	1.41	1.41	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.16	1.31	0.92	1.04	1.06	1.03
63	1.41	1.37	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.27	1.28	1.28	0.81	1.02	1.04
64	1.39	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	0.51	0.99	1.03	1.08	1.08	1.06
96		1.42	1.41	1.41	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.10	1.27	0.90	1.06	1.05	1.03
127		1.42	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.39	0.35	1.31	1.31	1.20	1.00	1.06
128		1.39	1.40	1.40	1.40	1.40	1.39	1.39	1.40	0.41	1.01	1.04	1.06	1.05	1.04
192			1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.03	1.22	0.84	1.06	1.08	1.06

Test Const store (Mbyte/s)
AMD Athlon 1.4 GHz; DDR266

	0.5 K	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K	32 K	64 K	128 K	256 K	512 K	1 M	2 M	4 M	8 M
1	4739	5213	5792	6133	6256	6256	6256	6194	3585	1796	677	549	527	518	516
2	4010	4600	5393	5792	6133	6256	6319	6256	2220	1212	383	316	313	311	313
3	3755	4051	5025	5665	6009	6127	6254	6254	1491	916	187	150	157	159	159
4	3637	4344	4887	5585	5958	6015	6256	6103	1118	681	141	116	124	125	126
5	3410	4019	4451	5372	5879	6006	6192	6192	895	543	112	91	97	98	99
6	3258	3849	4276	5193	5717	6009	6188	6132	746	446	103	78	81	82	82
7	3207	3665	4161	4955	5625	6003	6132	6132	639	386	91	69	71	72	72
8	3067	3724	4739	4965	5585	5902	6073	5846	559	334	80	61	62	63	63
12	2820	3332	4051	4399	5193	5770	6009	6068	560	275	74	53	51	52	52
15	2766	3055	4100	4210	5108	5665	5956	6102	596	449	129	57	49	50	50
16	2793	3128	4010	4887	5005	5585	5902	5393	496	284	68	53	56	57	58
24	2256	2932	3491	4105	4495	5193	5717	5868	2088	437	227	86	55	55	56
31	2296	2806	3224	4095	4735	5040	5630	5787	3698	851	358	179	51	49	50
32	2334	2793	3258	4062	4887	5045	5536	4775	494	262	67	53	59	60	61
48	1751	2256	3055	3533	4133	4462	5193	5665	2599	476	287	91	59	61	63
63	1770	2333	2905	3276	4133	4887	4964	5278	595	477	386	373	228	60	55
64	1777	2370	2896	3258	4116	4887	5005	4075	489	243	65	52	59	62	64
96	0	1777	2394	3055	3576	4161	4495	4965	2525	464	276	83	57	61	62
127	0	1804	2425	2956	3302	4083	4926	5026	3196	1027	358	338	182	135	43
128	0	1777	2444	2923	3292	4116	4926	3089	486	183	65	53	37	34	33
192	0	0	1833	2444	3087	3576	4161	4511	2156	440	266	80	51	51	51

Test Load Sum (Mbyte/s)
Intel Pentium 4 2.533 GHz; DDR333

	0.5 K	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K	32 K	64 K	128 K	256 K	512 K	1 M	2 M	4 M	8 M
1	5585	6173	6516	6655	6703	6751	6775	6763	6769	6227	2182	2175	2174	2188	2168
2	4739	5585	6173	6427	6585	6562	6562	6763	6763	5678	1239	1231	1234	1248	1229
3	3914	5132	5699	6273	6487	6334	6360	6328	6477	5346	850	845	844	857	842
4	4116	4788	5585	6133	6427	6471	6608	6494	6505	5200	644	641	640	649	638
5	4150	4322	5311	5992	6358	6288	6470	6307	6515	4888	516	513	513	519	511
6	4073	4199	5248	5842	6294	6334	6533	6503	6387	4767	428	426	425	430	423
7	4016	4051	5020	5746	6243	6328	6470	6426	6509	4678	362	361	361	366	359
8	3976	4265	4837	5653	6153	6383	6562	6679	6703	4572	318	316	316	320	315
12	3893	3999	4357	5278	5916	6273	6487	6579	6701	4377	218	218	218	221	217
15	3999	3927	4029	5025	5770	6273	6426	6572	6659	4208	176	176	175	178	175
16	4010	3910	4080	4887	5670	6133	6427	6585	6661	4407	165	165	165	167	164
24	3087	3858	4189	4484	5370	5992	6337	6521	6619	5221	165	165	164	167	164
31	3178	4058	3987	4456	5040	5823	6250	6410	6590	5030	610	164	164	167	163
32	3170	4045	3878	4364	5045	5792	6235	6460	6626	4505	165	165	164	167	164
48	2346	3258	3792	3875	4326	5309	5953	6315	6538	4540	1658	164	164	166	163
63	2393	3299	4016	4237	4607	5075	5720	6223	6244	3821	232	192	164	166	166
64	2406	3304	4045	4227	4611	4991	5792	6225	6466	3682	165	164	164	166	164
96	0	2444	3320	3792	4209	4618	5324	5953	6315	5016	1453	164	164	166	163
127	0	2476	3754	4066	4048	4498	4965	5712	5996	4522	1147	1133	222	163	170
128	0	2213	3351	4062	4479	4862	5347	5393	5602	3465	162	162	162	164	161
192	0	0	2496	3784	3910	4229	4257	5211	5892	4941	1196	152	151	153	150

Test Load Sum (Mbyte/s)
Intel Pentium 4 1.9 GHz; DDR266

	0.5 K	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K	32 K	64 K	128 K	256 K	512 K	1 M	2 M	4 M	8 M
1	5585	6173	6427	6608	6703	6751	6775	6763	6769	6037	1808	1803	1804	1817	1799
2	4385	5213	5939	6340	6539	6516	6449	6471	6488	5385	999	997	996	1008	992
3	3580	5132	5699	6273	6465	6292	6360	6328	6465	5067	682	680	680	688	675
4	4116	4788	5585	6133	6449	6471	6608	6483	6522	4948	515	513	513	520	510
5	4150	4322	5372	5992	6358	6331	6537	6307	6464	4576	414	412	411	417	410
6	4073	4199	5189	5879	6315	6292	6533	6459	6415	4463	341	341	340	345	338
7	4016	4051	5075	5781	6243	6285	6448	6470	6498	4408	290	289	289	292	288
8	4045	4265	4837	5653	6153	6340	6562	6667	6685	4319	255	254	253	256	252
12	3893	3999	4276	5278	5916	6149	6510	6544	6695	4094	174	174	174	176	173
15	3963	3927	4327	5025	5752	6231	6448	6503	6677	3965	141	140	140	142	139
16	3976	3910	4304	4887	5670	6133	6427	6573	6673	4184	132	132	131	133	131
24	3087	3858	4312	4689	5370	5992	6294	6521	6631	4853	132	131	131	133	131
31	3156	3987	4208	4591	5054	5823	6250	6476	6613	4823	487	131	131	133	131
32	3149	4045	4189	4600	5045	5792	6256	6460	6620	4269	132	131	131	133	131
48	2346	3258	3963	4189	4607	5309	5953	6294	6544	4654	1429	131	131	133	130
63	2393	3252	4051	4218	4618	5075	5738	6244	6233	4410	186	154	131	133	132
64	2406	3304	4045	4227	4611	5072	5792	6225	6471	3670	132	131	131	133	131
96	0	2444	3320	4054	4209	4441	5339	5953	6315	5110	1277	131	131	132	130
127	0	2476	3423	4030	4039	4498	5060	5747	6068	4604	968	952	177	131	136
128	0	2469	3784	4045	4053	4265	4739	5235	5224	3761	130	130	130	131	129
192	0	0	2513	3335	3893	4229	4441	5256	5897	4722	1064	121	121	122	120

Verhältnis der Speicherperformance zwischen einem mit 2.533 GHz; DDR333 und einem mit 1.9 GHz; DDR266 getakteten Pentium 4

	0.5 K	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K	32 K	64 K	128 K	256 K	512 K	1 M	2 M	4 M	8 M
1	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.03	1.21	1.21	1.21	1.20	1.21
2	1.08	1.07	1.04	1.01	1.01	1.01	1.02	1.05	1.04	1.05	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
3	1.09	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.06	1.25	1.24	1.24	1.24	1.25
4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
5	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.01	1.07	1.25	1.25	1.25	1.24	1.25
6	1.00	1.00	1.01	0.99	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	1.07	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
7	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.01	1.00	0.99	1.00	1.06	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
8	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.06	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
12	1.00	1.00	1.02	1.00	1.00	1.02	1.00	1.01	1.00	1.07	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
15	1.01	1.00	0.93	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	1.06	1.25	1.26	1.25	1.25	1.25
16	1.01	1.00	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
24	1.00	1.00	0.97	0.96	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.08	1.25	1.25	1.26	1.25	1.26
31	1.01	1.02	0.95	0.97	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.04	1.25	1.25	1.25	1.26	1.25
32	1.01	1.00	0.93	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.06	1.25	1.25	1.25	1.26	1.25
48	1.00	1.00	0.96	0.93	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	1.16	1.25	1.25	1.25	1.25
63	1.00	1.01	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.87	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
64	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
96		1.00	1.00	0.94	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	0.98	1.14	1.25	1.25	1.26	1.25
127		1.00	1.10	1.01	1.00	1.00	0.98	0.99	0.99	0.98	1.18	1.19	1.25	1.25	1.25
128		0.90	0.89	1.00	1.11	1.14	1.13	1.03	1.07	0.92	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
192			0.99	1.13	1.00	1.00	0.96	0.99	1.00	1.05	1.12	1.25	1.24	1.25	1.25

Test Const store (Mbyte/s)
Intel Pentium 4 2.533 GHz; DDR333

	0.5 K	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K	32 K	64 K	128 K	256 K	512 K	1 M	2 M	4 M	8 M
1	4344	4600	4837	4965	5018	5072	5072	5072	5072	4875	799	663	657	665	658
2	3375	3910	4189	4324	4405	4468	4501	4495	4506	4180	400	330	328	333	328
3	2685	3121	3268	3411	3390	3485	3500	3517	3524	3309	265	220	219	222	218
4	2172	2496	2681	2784	2831	2870	2887	2892	2897	2743	200	165	164	166	164
5	1848	2083	2269	2366	2397	2427	2446	2456	2457	2315	160	132	131	133	131
6	1549	1593	1661	1678	1754	1762	1784	1778	1737	1633	133	110	109	111	109
7	1339	1490	1509	1535	1558	1563	1579	1583	1574	1509	114	95	94	95	94
8	1182	1268	1282	1300	1303	1309	1309	1310	1310	1263	100	83	82	83	82
12	2167	1257	1290	1333	1338	1347	1350	1352	1395	1311	95	95	94	96	94
15	2528	1202	1291	1315	1324	1335	1338	1341	1342	1310	93	93	93	94	93
16	2536	1191	1285	1323	1315	1318	1323	1324	1324	1295	88	88	88	89	87
24	2686	2444	1260	1308	1314	1318	1323	1324	1324	1318	68	74	82	89	85
31	2722	2612	1206	1288	1310	1318	1322	1324	1324	1319	216	70	71	71	71
32	2712	2793	1206	1284	1301	1323	1322	1324	1324	1297	88	88	88	89	88
48	1923	2793	2557	1260	1304	1318	1317	1323	1324	1318	474	88	88	89	87
63	1949	2851	2580	1189	1284	1299	1307	1346	1345	1341	97	90	82	82	81
64	1955	2760	2696	1222	1278	1316	1350	1345	1357	1319	89	89	89	90	88
96	0	1977	2861	2471	1243	1310	1317	1318	1322	1317	510	90	90	91	89
127	0	1675	2516	2551	1165	1222	1249	1262	1273	1321	643	621	97	77	81
128	0	2005	2809	2607	1183	1291	1346	1366	1374	1338	90	90	90	91	89
192	0	0	2011	2873	2499	1225	1407	1335	1348	1339	587	89	89	90	88