

Zentralübung Rechnerstrukturen im SS2008

Quantifizierung von Kosten und Leistung

Dr. Rainer Buchty

`buchty@ira.uka.de`

Universität Karlsruhe (TH) – Forschungsuniversität
Institut für Technische Informatik (ITEC)
Lehrstuhl für Rechnerarchitektur

14. Mai 2009

- **Zielsetzungen**

- Einsatzgebiet, Anwendungsbereich, Leistung, Verfügbarkeit

- **Randbedingungen**

- Technologie, Größe, Geld, Energieverbrauch, Umwelt

- **Gestaltungsgrundsätze**

- Modularität, Sparsamkeit, Fehlertoleranz

- **Einsatzgebiet**

- Desktop Computing: PCs/Workstations
- Server: Rechen- und/oder datenintensive Anwendungen
- Eingebettete Systeme

- **Anforderungen**

- Software-Kompatibilität: Sprache, Code, OS, Standards

→ **Quantifizierung und Vergleich**

- **Technologische Entwicklungen**

- Integrationsdichte
- Chipfläche
- Transistoren pro Chip
- Geschwindigkeit

→ **Faktoren für Chip-Fertigungskosten**

- **Unterschiedliche Entwicklungsgeschwindigkeiten und Leistungszuwachs**

- Netzwerk, CPU, RAM/ROM, Festspeicher
- Problem der Leistungsmessung
- Wie unterschiedliche Systeme vergleichen?
- Wie einzelne Faktoren bestimmen?

→ **Leistungsmessung / Benchmarking**

- **Fertigung auf Wafern**

- Größe/Durchmesser des Wafers → Grundfläche

- **Heraustrennen der einzelnen Chip-Plättchen (Die)**

- Fläche/Form des Dies → Dies per Wafer

- **Endkunde erhält**

- **Chip im Gehäuse**

- Test des Dies
- Packaging: Einsetzen des Dies in Gehäuse (Bonding)
Bedrahtete Bauformen (thru-hole)
SMD-Bauformen (Pins, Balls)
- Finaler Test

- **Die für sog. *bond-out***

- Die wird vom Kunden in Schaltung/Platine direkt integriert)
- Kein Packaging
- End-Prüfung im Rahmen des Gerätetests

- **Kenngrößen des Wafers**

- $cost_{wafer}$: Fertigungskosten des rohen Wafers (Siliziumscheibe)
- d_{wafer} : Größe/Durchmesser, liefert Fläche a_{wafer}
- $yield_{wafer}$: Ausbeute ("gute" Wafer)

● Kenngrößen des Wafers

- $cost_{wafer}$: Fertigungskosten des rohen Wafers (Siliziumscheibe)
- d_{wafer} : Größe/Durchmesser, liefert Fläche a_{wafer}
- $yield_{wafer}$: Ausbeute ("gute" Wafer)

● Kenngrößen des Dies

- **Dies per Wafer** (dpw):

Die-Fläche a_{die} und Wafer-Area a_{wafer} korreliert

$$dpw = A - B = \frac{\pi * (d_{wafer} / 2)^2}{a_{die}} - \frac{\pi * d_{wafer}}{\sqrt{2} * a_{die}}$$

A: theoretisches Maximum

B: Verschnitt

- **Kenngrößen des Dies**

- **Ausbeute** (die yield)
- Fehlerquote (defects per unit area, $dpua$)
- Technologiekonstante (α , Maß für Komplexität bzw. Fertigungstechnologie)

$$yield_{die} = yield_{wafer} * (1 + \frac{dpua * a_{die}}{\alpha})^{-\alpha}$$

- Abschätzung des Die-Yields resultierend aus obiger Formel in Verbindung mit Dies-per-Wafer-Wert

$$yield_{die} = f(a_{die}^4)$$

- **Kenngrößen des Dies**

- **Ausbeute** (die yield)
- Fehlerquote (defects per unit area, $dpua$)
- Technologiekonstante (α , Maß für Komplexität bzw. Fertigungstechnologie)

$$yield_{die} = yield_{wafer} * \left(1 + \frac{dpua * a_{die}}{\alpha}\right)^{-\alpha}$$

- Abschätzung des Die-Yields resultierend aus obiger Formel in Verbindung mit Dies-per-Wafer-Wert

$$yield_{die} = f(a_{die}^4)$$

- **Fertigungskosten** pro Die

$$cost_{die} = \frac{cost_{wafer}}{dpw * yield_{die}}$$

● Test und Assemblierung

- Kosten
 - Die-Test: $cost_{die-test}$
 - Packaging: $cost_{packaging}$
- Packaging-Kosten beinhalten zusätzliche Test-Kosten (IC-Test, Endkontrolle)
- Endausbeute: $yield_{final}$

- **Test und Assemblierung**

- Kosten

- Die-Test: $cost_{die-test}$

- Packaging: $cost_{packaging}$

- Packaging-Kosten beinhalten zusätzliche Test-Kosten (IC-Test, Endkontrolle)

- Endausbeute: $yield_{final}$

- **Gesamtkosten** pro integriertem Schaltkreis (IC):

$$cost_{IC} = \frac{cost_{die} + cost_{die-test} + cost_{packaging}}{yield_{final}}$$

Rechenbeispiel

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/cm^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{die} = 2cm^2$.

Rechenbeispiel

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/\text{cm}^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{\text{die}} = 2\text{cm}^2$.

- 1 Berechnen Sie für beide Wafergrößen die erzielbare Anzahl von Dies pro Wafer.

Rechenbeispiel

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/cm^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{die} = 2cm^2$.

- 1 Berechnen Sie für beide Wafergrößen die erzielbare Anzahl von Dies pro Wafer.

$$dpw = \frac{\pi * (d_{wafer} * \frac{1}{2})^2}{a_{die}} - \frac{\pi * d_{wafer}}{\sqrt{2 * a_{die}}}$$

Rechenbeispiel

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/cm^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{die} = 2cm^2$.

- 1 Berechnen Sie für beide Wafergrößen die erzielbare Anzahl von Dies pro Wafer.

$$dpw = \frac{\pi * (d_{wafer} * \frac{1}{2})^2}{a_{die}} - \frac{\pi * d_{wafer}}{\sqrt{2 * a_{die}}}$$

$$dpw_{200} = \frac{\pi * (20cm * \frac{1}{2})^2}{2cm^2} - \frac{\pi * 20cm}{\sqrt{2 * 2cm^2}}$$

Rechenbeispiel

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/\text{cm}^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{\text{die}} = 2\text{cm}^2$.

- 1 Berechnen Sie für beide Wafergrößen die erzielbare Anzahl von Dies pro Wafer.

$$dpw = \frac{\pi * (d_{\text{wafer}} * \frac{1}{2})^2}{a_{\text{die}}} - \frac{\pi * d_{\text{wafer}}}{\sqrt{2 * a_{\text{die}}}}$$

$$\begin{aligned} dpw_{200} &= \frac{\pi * (20\text{cm} * \frac{1}{2})^2}{2\text{cm}^2} - \frac{\pi * 20\text{cm}}{\sqrt{2 * 2\text{cm}^2}} \\ &= \pi * \left(\frac{10^2}{2} - \frac{20}{\sqrt{4}} \right) = \pi * \frac{100 - 20}{2} = 40\pi (\approx 125.66) \end{aligned}$$

Rechenbeispiel

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/\text{cm}^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{\text{die}} = 2\text{cm}^2$.

- 1 Berechnen Sie für beide Wafergrößen die erzielbare Anzahl von Dies pro Wafer.

$$dpw = \frac{\pi * (d_{\text{wafer}} * \frac{1}{2})^2}{a_{\text{die}}} - \frac{\pi * d_{\text{wafer}}}{\sqrt{2 * a_{\text{die}}}}$$

$$\begin{aligned} dpw_{200} &= \frac{\pi * (20\text{cm} * \frac{1}{2})^2}{2\text{cm}^2} - \frac{\pi * 20\text{cm}}{\sqrt{2 * 2\text{cm}^2}} \\ &= \pi * \left(\frac{10^2}{2} - \frac{20}{\sqrt{4}} \right) = \pi * \frac{100 - 20}{2} = 40\pi (\approx 125.66) \end{aligned}$$

$$dpw_{300} = \frac{\pi * (30\text{cm} * \frac{1}{2})^2}{2\text{cm}^2} - \frac{\pi * 30\text{cm}}{\sqrt{2 * 2\text{cm}^2}}$$

Rechenbeispiel

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/\text{cm}^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{\text{die}} = 2\text{cm}^2$.

- 1 Berechnen Sie für beide Wafergrößen die erzielbare Anzahl von Dies pro Wafer.

$$dpw = \frac{\pi * (d_{\text{wafer}} * \frac{1}{2})^2}{a_{\text{die}}} - \frac{\pi * d_{\text{wafer}}}{\sqrt{2 * a_{\text{die}}}}$$

$$\begin{aligned} dpw_{200} &= \frac{\pi * (20\text{cm} * \frac{1}{2})^2}{2\text{cm}^2} - \frac{\pi * 20\text{cm}}{\sqrt{2 * 2\text{cm}^2}} \\ &= \pi * \left(\frac{10^2}{2} - \frac{20}{\sqrt{4}} \right) = \pi * \frac{100 - 20}{2} = 40\pi (\approx 125.66) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dpw_{300} &= \frac{\pi * (30\text{cm} * \frac{1}{2})^2}{2\text{cm}^2} - \frac{\pi * 30\text{cm}}{\sqrt{2 * 2\text{cm}^2}} \\ &= \pi * \left(\frac{15^2}{2} - \frac{30}{\sqrt{4}} \right) = \pi * \frac{225 - 30}{2} = \frac{195}{2}\pi = 97.5\pi (\approx 306.31) \end{aligned}$$

Rechenbeispiel

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/cm^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{die} = 2cm^2$.

- 1 Berechnen Sie für beide Wafergrößen die erzielbare Anzahl von Dies pro Wafer.

$$dpw_{200} = 40\pi (\approx 125.66)$$

$$dpw_{300} = 97.5\pi (\approx 306.31)$$

Rechenbeispiel

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/\text{cm}^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{\text{die}} = 2\text{cm}^2$.

- 1 Berechnen Sie für beide Wafergrößen die erzielbare Anzahl von Dies pro Wafer.

$$dpw_{200} = 40\pi (\approx 125.66)$$

$$dpw_{300} = 97.5\pi (\approx 306.31)$$

→ **Steigerung der (theoretischen) Ausbeute um einen Faktor von fast 2.5 bei annähernd gleichen Fertigungskosten**

Rechenbeispiel (forts.)

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/\text{cm}^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{\text{die}} = 2\text{cm}^2$.

- 2 Errechnen Sie den Die-Yield für die gegebenen Parameter.

Rechenbeispiel (forts.)

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/\text{cm}^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{\text{die}} = 2\text{cm}^2$.

- 2 Errechnen Sie den Die-Yield für die gegebenen Parameter.

$$yield_{\text{die}} = yield_{\text{wafer}} * \left(1 + \frac{dpu_{\text{a}} * a_{\text{die}}}{\alpha}\right)^{-\alpha}$$

Rechenbeispiel (forts.)

Eine Wafer-Fertigungsanlage soll von 200mm- auf 300mm- Wafer umgestellt werden. Der Fertigungsprozess wird hierbei nicht verändert, der zugehörige Technologiefaktor α sei 1, die Fehlerquote (*defects per unit area*) betrage $0.5/cm^2$ und die Wafer-Ausbeute (*yield*) betrage 75%. Der zu fertigende Die habe eine Fläche von $a_{die} = 2cm^2$.

- 2 Errechnen Sie den Die-Yield für die gegebenen Parameter.

$$yield_{die} = yield_{wafer} * (1 + \frac{dpu_{a} * a_{die}}{\alpha})^{-\alpha}$$

$$yield_{die} = 0.75 * (1 + \frac{0.5 * 2}{1})^{-1} = \frac{3}{4} * \frac{1}{2} = \frac{3}{8}$$

Rechenbeispiel (forts.)

- ③ Errechnen Sie die Kosten pro Die für 200mm und 300mm-Technologie unter der Annahme, die Wafer-Kosten seien pro Millimeter Durchmesser mit 1 Euro zu veranschlagen.

Rechenbeispiel (forts.)

- ③ Errechnen Sie die Kosten pro Die für 200mm und 300mm-Technologie unter der Annahme, die Wafer-Kosten seien pro Millimeter Durchmesser mit 1 Euro zu veranschlagen.

$$cost_{die} = \frac{cost_{wafer}}{dpw * yield_{die}}$$

Rechenbeispiel (forts.)

- ③ Errechnen Sie die Kosten pro Die für 200mm und 300mm-Technologie unter der Annahme, die Wafer-Kosten seien pro Millimeter Durchmesser mit 1 Euro zu veranschlagen.

$$cost_{die} = \frac{cost_{wafer}}{dpw * yield_{die}}$$

$$Berechnet: dpw_{200} = 40\pi, dpw_{300} = \frac{195}{2}\pi, yield_{die} = \frac{3}{8}$$

Rechenbeispiel (forts.)

- ③ Errechnen Sie die Kosten pro Die für 200mm und 300mm-Technologie unter der Annahme, die Wafer-Kosten seien pro Millimeter Durchmesser mit 1 Euro zu veranschlagen.

$$cost_{die} = \frac{cost_{wafer}}{dpw * yield_{die}}$$

$$Berechnet: dpw_{200} = 40\pi, dpw_{300} = \frac{195}{2}\pi, yield_{die} = \frac{3}{8}$$

$$cost_{200} = 1 * \frac{200}{40\pi * \frac{3}{8}} = \frac{200}{15\pi} = 4,24$$

$$cost_{300} = 1 * \frac{300}{\frac{195}{2}\pi * \frac{3}{8}} \approx 2,61$$

Rechenbeispiel (forts.)

- ③ Errechnen Sie die Kosten pro Die für 200mm und 300mm-Technologie unter der Annahme, die Wafer-Kosten seien pro Millimeter Durchmesser mit 1 Euro zu veranschlagen.

$$cost_{die} = \frac{cost_{wafer}}{dpw * yield_{die}}$$

$$Berechnet: dpw_{200} = 40\pi, dpw_{300} = \frac{195}{2}\pi, yield_{die} = \frac{3}{8}$$

$$cost_{200} = 1 * \frac{200}{40\pi * \frac{3}{8}} = \frac{200}{15\pi} = 4,24$$

$$cost_{300} = 1 * \frac{300}{\frac{195}{2}\pi * \frac{3}{8}} \approx 2,61$$

Dies per Wafer: Faktor 2.43 ↔ Kosten pro Die: Faktor 1.63

Rechenbeispiel (forts.)

- 4 Berechnen Sie basierend auf den errechneten Werten der vorherigen Aufgabenteile die durch die Umstellung auf 300mm-Wafer erzielte Kostenreduzierung pro IC. Die Kosten für das Packaging pro IC betragen 75 Cent, der Kostenanteil für Testen des einzelnen Dies sei 1 Euro und die Gesamtausbeute sei 75%.

- 4 Berechnen Sie basierend auf den errechneten Werten der vorherigen Aufgabenteile die durch die Umstellung auf 300mm-Wafer erzielte Kostenreduzierung pro IC. Die Kosten für das Packaging pro IC betragen 75 Cent, der Kostenanteil für Testen des einzelnen Dies sei 1 Euro und die Gesamtausbeute sei 75%.

$$cost_{ic} = \frac{cost_{die} + cost_{test} + cost_{pkg}}{yield_{final}}$$

Rechenbeispiel (forts.)

- 4 Berechnen Sie basierend auf den errechneten Werten der vorherigen Aufgabenteile die durch die Umstellung auf 300mm-Wafer erzielte Kostenreduzierung pro IC. Die Kosten für das Packaging pro IC betragen 75 Cent, der Kostenanteil für Testen des einzelnen Dies sei 1 Euro und die Gesamtausbeute sei 75%.

$$cost_{ic} = \frac{cost_{die} + cost_{test} + cost_{pkg}}{yield_{final}}$$

$$cost_{ic200} = \frac{4.24 + 1 + 0.75}{\frac{3}{4}} = \frac{5.99 * 4}{3} = 7.99$$

$$cost_{ic300} = \frac{2.61 + 1 + 0.75}{\frac{3}{4}} = \frac{4.36 * 4}{3} = 5.81$$

Rechenbeispiel (forts.)

- 4 Berechnen Sie basierend auf den errechneten Werten der vorherigen Aufgabenteile die durch die Umstellung auf 300mm-Wafer erzielte Kostenreduzierung pro IC. Die Kosten für das Packaging pro IC betragen 75 Cent, der Kostenanteil für Testen des einzelnen Dies sei 1 Euro und die Gesamtausbeute sei 75%.

$$cost_{ic} = \frac{cost_{die} + cost_{test} + cost_{pkg}}{yield_{final}}$$

$$cost_{ic200} = \frac{4.24 + 1 + 0.75}{\frac{3}{4}} = \frac{5.99 * 4}{3} = 7.99$$

$$cost_{ic300} = \frac{2.61 + 1 + 0.75}{\frac{3}{4}} = \frac{4.36 * 4}{3} = 5.81$$

Einsparung: $7.99 - 5.81 = 2.18$

Kostensenkung um $(1 - \frac{5.81}{7.99}) * 100\% = 100 - 72.7 = 27.3\%$

- **Herstellungskosten leicht zu quantifizieren, daher auch leicht zu berechnen**
- **Quantifizierung der Leistungsfähigkeit?**
 - Was ist Leistungsfähigkeit?
 - Was bedeutet “schneller”?
 - Wie vergleichen?
- **Entscheidung bei Entwurf, Auswahl, und Veränderung von Rechenanlagen**
 - Objektive Quantifizierung
 - Erfassen des gesamten Systems, nicht nur von Teilaspekten

- **Anwendersicht:** Reduzierung von
 - Antwortzeit (response time)
 - Latenzzeit
 - CPU Time (User, System)
 - Ausführungszeit (execution time)
- **Betriebssicht:** Erhöhung von
 - Anzahl durchgeführter Jobs
 - Durchsatz
 - Energieeffizienz (Betriebskosten)

→ **Auswertung benötigt Bewertungsverfahren**

● Auswertung von HW-Eigenschaften

- Einfacher Vergleich
- Bewertung sehr spezieller Aspekte (Takt)
- Angabe einer hypothetischen Maximalleistung (MIPS)
- Meist nicht/selten aussagekräftig
- Alltagsbeispiel: GHz-Manie → QuantiSpeed

● Mixe

- Theoretische Berechnung einer mittleren Operationszeit T aus den Operationszeiten und Auftrethäufigkeiten von n Befehlen
- $T = \sum_{i=1}^n p_i * t_i$ mit $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ wobei $p_i \leq 1$

● Kernprogramme

- Typische Anwenderprogramme, für den zu bewertenden Rechner geschrieben
- Berechnung der Ausführungszeit anhand der Ausführungszeiten der Befehle

● Benchmarks

- Programmsammlungen im Quellcode
- Übersetzung & Messung der Ausführungszeiten
- Problem: Einfluss von OS und Compiler
- Synthetische Benchmarks (Whetstone, Dhrystone), Quasi-Simulation von Anwenderprogrammen
- Kernels (LINPACK)
- Standardisierte Benchmarks (SPEC, TPC, EEMBC...)

● Ziele

- Stellt fairen Vergleich sicher
- Ermöglicht Angabe einer Maximalleistung

● Beispiel: SPEC-Benchmark

- Integer vs. Fließkomma: SPECint / SPECfp
- Geschwindigkeit vs. Durchsatz (rate)
- Optimierung: Konservativ (base) vs. aggressiv
- $SPECratio_x = \frac{t_{refx}}{t_{exec}}$

- **Monitore**

- Gezielte Abfrage und Akkumulation von HW-Ereignissen
- Software-Monitore
- Werkzeug zur Optimierung, weniger zur Klassifizierung
- Nachteil: Beeinträchtigung des Systemverhaltens

- **Analytische Methoden**

- Deterministisch (feste Werte)
- Stochastisch (statische Verteilung)
- Operationell (gemessen in festem Zeitintervall)

- **Simulationen**

- Modellbildung
- Deterministische, stochastische oder aufzeichnungsgesteuerte Simulation

- **Prozessortakt** gibt lediglich den Arbeitstakt (min/typ/max) des Prozessors an.
 - Kein Maß für Leistungsfähigkeit, da keine Aussage über Effizienz, Güte des Befehlssatzes etc.
 - Beispiele: Pentium4 vs. Pentium-M, 6502 vs. Z80
- **CPI** ist ein Maß für die Effizienz einer Architektur.
 - Unterschied zwischen maximalen CPI unter Idealbedingungen und realen, programmabhängig gemessenen CPI
 - Zur Leistungsbewertung als **alleinige** Maßzahl nicht ausreichend: Effizienz $\neq$ Geschwindigkeit!
- **MIPS** auf den ersten Blick ideal, weil zwei Maßzahlen (Takt, CPI) zusammengeführt werden.
 - Aufgrund des CPI-Einflusses jedoch ebenfalls vom ausgeführten Programm
 - Nur unter gleichen Bedingungen (Sourcecode, Compiler, OS) direkt vergleichbar.

- **CPI** (Zyklen pro Instruktion)

$$CPI = \frac{c}{i}$$

- **MIPS** (Million Instructions per Second)

$$MIPS = \frac{f}{CPI * 10^6}$$

- **Taktrate** (Frequenz)

$$f = \frac{c}{t} = \frac{i * CPI}{t} \text{ [Hz]}$$

- **CPU-Zeit**

$$t_{cpu} = c * t$$

Beachten Sie auch mögliche Umformungen!

Rechenbeispiel CPI/MIPS

Prozessor A arbeitet ein Problem in 2ms ab. Er hat eine CPI von $7/5$ und benötigt 3.500.000 Instruktionen für die Formulierung der Problemstellung.

Prozessor B arbeitet dieses Problem ebenfalls in 2ms ab. Er hat eine CPI von $3/2$ und benötigt 1.500.000 Instruktionen für die Formulierung der Problemstellung.

- **Welcher Prozessor ist für dieses Problem zu wählen und warum?**

Rechenbeispiel CPI/MIPS

Prozessor A arbeitet ein Problem in 2ms ab. Er hat eine CPI von 7/5 und benötigt 3.500.000 Instruktionen für die Formulierung der Problemstellung.

Prozessor B arbeitet dieses Problem ebenfalls in 2ms ab. Er hat eine CPI von 3/2 und benötigt 1.500.000 Instruktionen für die Formulierung der Problemstellung.

- **Welcher Prozessor ist für dieses Problem zu wählen und warum?**

$$f = \frac{i * CPI}{t}, MIPS = \frac{f}{CPI * 10^6}$$

Rechenbeispiel CPI/MIPS

Prozessor A arbeitet ein Problem in 2ms ab. Er hat eine CPI von 7/5 und benötigt 3.500.000 Instruktionen für die Formulierung der Problemstellung.

Prozessor B arbeitet dieses Problem ebenfalls in 2ms ab. Er hat eine CPI von 3/2 und benötigt 1.500.000 Instruktionen für die Formulierung der Problemstellung.

- **Welcher Prozessor ist für dieses Problem zu wählen und warum?**

$$f = \frac{i * CPI}{t}, MIPS = \frac{f}{CPI * 10^6}$$

$$f_A = \frac{3.5 * 10^6 * \frac{7}{5}}{2 * 10^{-3}} = 2450 MHz$$

$$MIPS_A = \frac{f_A}{CPI_A * 10^6} = \frac{2.45 * 10^9}{\frac{7}{5} * 10^6} = 1750 MIPS$$

Rechenbeispiel CPI/MIPS

Prozessor A arbeitet ein Problem in 2ms ab. Er hat eine CPI von 7/5 und benötigt 3.500.000 Instruktionen für die Formulierung der Problemstellung.

Prozessor B arbeitet dieses Problem ebenfalls in 2ms ab. Er hat eine CPI von 3/2 und benötigt 1.500.000 Instruktionen für die Formulierung der Problemstellung.

- **Welcher Prozessor ist für dieses Problem zu wählen und warum?**

$$f = \frac{i * CPI}{t}, MIPS = \frac{f}{CPI * 10^6}$$

$$f_A = \frac{3.5 * 10^6 * \frac{7}{5}}{2 * 10^{-3}} = 2450 MHz$$

$$MIPS_A = \frac{f_A}{CPI_A * 10^6} = \frac{2.45 * 10^9}{\frac{7}{5} * 10^6} = 1750 MIPS$$

$$f_B = \frac{1.5 * 10^6 * \frac{3}{2}}{2 * 10^{-3}} = 1125 MHz$$

$$MIPS_B = \frac{f_B}{CPI_B * 10^6} = \frac{1.125 * 10^9}{\frac{3}{2} * 10^6} = 750 MIPS$$

Rechenbeispiel (forts.)

$$i_A = 3.500.000, CPI_A = \frac{7}{5}$$
$$f_A = 2450MHz, MIPS_A = 1750MIPS$$

$$i_B = 1.500.000, CPI_B = \frac{3}{2}$$
$$f_B = 1125MHz, MIPS_B = 750MIPS$$

$$t = 2ms$$

- **Welcher Prozessor ist für dieses Problem zu wählen und warum?**

Rechenbeispiel (forts.)

$$i_A = 3.500.000, CPI_A = \frac{7}{5}$$
$$f_A = 2450MHz, MIPS_A = 1750MIPS$$

$$i_B = 1.500.000, CPI_B = \frac{3}{2}$$
$$f_B = 1125MHz, MIPS_B = 750MIPS$$

$$t = 2ms$$

- **Welcher Prozessor ist für dieses Problem zu wählen und warum?**
- **Prozessor B**, weil
 - ohne Berechnung: Gleich schnell in der Abarbeitung bei wesentlich kompakterem Code (1.5 vs. 3.5 Mio Instruktionen)
 - Weniger als halbe Taktfrequenz ($P \sim U^2 * f$, Fertigung)

Rechenbeispiel Benchmarks

Benchmarks sind eine verlässliche Methode zur Leistungsbewertung. Auf einem 4GHz-Prozessor wird ein solcher Benchmark abgearbeitet. Nachfolgende Tabelle listet die auftretenden Befehlstypen mit Häufigkeit und jeweiliger Zyklenzahl.

Befehlstyp	Anzahl in 10^3	Zyklenzahl
Integer-Arithmetik	300	1
Fließkomma-Arithmetik	75	2
Speicherzugriff	150	3
Kontrollflusstransfer	25	4

Zu bestimmen sind die Werte für Ausführungszeit, CPI, MIPS und MFLOPS.

Rechenbeispiel (forts.)

Befehlstyp	Anzahl in 10^3	Zyklenzahl
Integer-Arithmetik	300	1
Fließkomma-Arithmetik	75	2
Speicherzugriff	150	3
Kontrollflusstransfer	25	4

Befehlstyp	Anzahl in 10^3	Zyklenzahl
Integer-Arithmetik	300	1
Fließkomma-Arithmetik	75	2
Speicherzugriff	150	3
Kontrollflusstransfer	25	4

- Anzahl Instruktionen**

$$\begin{aligned} i &= \sum i_{\text{typ}} \\ &= (300 + 75 + 150 + 25) * 10^3 = 550.000 \end{aligned}$$

Rechenbeispiel (forts.)

Befehlstyp	Anzahl in 10^3	Zyklenzahl
Integer-Arithmetik	300	1
Fließkomma-Arithmetik	75	2
Speicherzugriff	150	3
Kontrollflusstransfer	25	4

- Anzahl Instruktionen**

$$\begin{aligned} i &= \sum i_{\text{typ}} \\ &= (300 + 75 + 150 + 25) * 10^3 = 550.000 \end{aligned}$$

- Taktzyklen**

$$\begin{aligned} c &= \sum i_{\text{typ}} * c_{\text{typ}} \\ &= (300 * 1 + 75 * 2 + 150 * 3 + 25 * 4) * 10^3 = 1.000.000 \end{aligned}$$

Befehlstyp	Anzahl in 10^3	Zyklenzahl
Integer-Arithmetik	300	1
Fließkomma-Arithmetik	75	2
Speicherzugriff	150	3
Kontrollflusstransfer	25	4

- Anzahl Instruktionen**

$$\begin{aligned}i &= \sum i_{\text{typ}} \\ &= (300 + 75 + 150 + 25) * 10^3 = 550.000\end{aligned}$$

- Taktzyklen**

$$\begin{aligned}c &= \sum i_{\text{typ}} * c_{\text{typ}} \\ &= (300 * 1 + 75 * 2 + 150 * 3 + 25 * 4) * 10^3 = 1.000.000\end{aligned}$$

- Zykluszeit bei 4GHz Taktfrequenz**

$$t = \frac{1}{f} = \frac{1}{4\text{GHz}} = 0.25 * 10^{-9}\text{s} = 0.25\text{ns}$$

- **Angaben und bisherige Berechnungen:**

$$f = 4\text{GHz} \rightarrow t_c = 0.25\text{ns}$$

$$i = 550.000, c = 1.000.000 = 1000 * 10^3$$

- **Angaben und bisherige Berechnungen:**

$$f = 4\text{GHz} \rightarrow t_c = 0.25\text{ns}$$

$$i = 550.000, c = 1.000.000 = 1000 * 10^3$$

- **Ausführungszeit**

$$t_{\text{exec}} = c * t_{\text{cyc}}$$

$$= 1000 * 10^3 * 0.25 * 10^{-9} = 250 * 10^{-6}\text{s} = 250\mu\text{s}$$

Rechenbeispiel (forts.)

- **Angaben und bisherige Berechnungen:**

$$f = 4\text{GHz} \rightarrow t_c = 0.25\text{ns}$$

$$i = 550.000, c = 1.000.000 = 1000 * 10^3$$

- **Ausführungszeit**

$$t_{\text{exec}} = c * t_{\text{cyc}}$$

$$= 1000 * 10^3 * 0.25 * 10^{-9} = 250 * 10^{-6}\text{s} = 250\mu\text{s}$$

- **CPI**

$$\text{CPI} = \frac{c}{i} = \frac{1000 * 10^3}{550 * 10^3} = \frac{100}{55} = \frac{20}{11} \approx 1.82$$

Rechenbeispiel (forts.)

- Angaben und bisherige Berechnungen:

$$f = 4\text{GHz} \rightarrow t_c = 0.25\text{ns}$$

$$i = 550.000, c = 1.000.000 = 1000 * 10^3$$

- Ausführungszeit

$$t_{\text{exec}} = c * t_{\text{cyc}}$$

$$= 1000 * 10^3 * 0.25 * 10^{-9} = 250 * 10^{-6}\text{s} = 250\mu\text{s}$$

- CPI

$$\text{CPI} = \frac{c}{i} = \frac{1000 * 10^3}{550 * 10^3} = \frac{100}{55} = \frac{20}{11} \approx 1.82$$

- MIPS

$$\text{MIPS} = \frac{i}{t * 10^6} = \frac{550.000}{250} = 2200$$

Rechenbeispiel (forts.)

- Angaben und bisherige Berechnungen:

$$f = 4\text{GHz} \rightarrow t_c = 0.25\text{ns}$$

$$i = 550.000, c = 1.000.000 = 1000 * 10^3$$

- Ausführungszeit

$$t_{\text{exec}} = c * t_{\text{cyc}}$$

$$= 1000 * 10^3 * 0.25 * 10^{-9} = 250 * 10^{-6}\text{s} = 250\mu\text{s}$$

- CPI

$$\text{CPI} = \frac{c}{i} = \frac{1000 * 10^3}{550 * 10^3} = \frac{100}{55} = \frac{20}{11} \approx 1.82$$

- MIPS

$$\text{MIPS} = \frac{i}{t * 10^6} = \frac{550.000}{250} = 2200$$

- MFLOPS

- Wie MIPS, wobei Anzahl der Befehle und Ausführungszeit nur für Fließkommaberechnung

$$\text{MFLOPS} = \frac{75.000}{(75.000 * 2) * (0.25 * 10^{-9}) * 10^6} = \frac{1}{0.5 * 10^{-3}} = 2000$$

Für eine Rechenanlage soll ein geeigneter Plattenspeicher angeschafft werden. Mithilfe eines Warteschlangenmodells sollen hierzu der **Durchsatz D** und die **Auslastung U** der Plattensysteme berechnet werden unter der Annahme, die durchschnittliche **Ankunftsrate A** von Schreib-/Leseaufträgen im System liegt bei 40/s. Zur Auswahl stehen Festplatten mit folgenden Daten:

- Platte 1: Zugriffszeit 12ms, Datenrate 6MByte/s
- Platte 2: Zugriffszeit 10ms, Datenrate 7,5MByte/s
- Platte 3: Zugriffszeit 8ms, Datenrate 8MByte/s

- Berechnen Sie für die 3 Festplatten die Bedienzeit X_i , wenn der Schreib-/Leseauftrag im Schnitt 100kB groß ist.
- Platte 1: Zugriffszeit 12ms, Datenrate 6MByte/s
- Platte 2: Zugriffszeit 10ms, Datenrate 7,5MByte/s
- Platte 3: Zugriffszeit 8ms, Datenrate 8MByte/s

- Berechnen Sie für die 3 Festplatten die Bedienzeit X_i , wenn der Schreib-/Leseauftrag im Schnitt 100kB groß ist.
- Platte 1: Zugriffszeit 12ms, Datenrate 6MByte/s
- Platte 2: Zugriffszeit 10ms, Datenrate 7,5MByte/s
- Platte 3: Zugriffszeit 8ms, Datenrate 8MByte/s

- **Bedienzeiten:** $X_i = t_{\text{Zugriff}} + t_{\text{Übertragung}}$

- Berechnen Sie für die 3 Festplatten die Bedienzeit X_i , wenn der Schreib-/Leseauftrag im Schnitt 100kB groß ist.
 - Platte 1: Zugriffszeit 12ms, Datenrate 6MByte/s
 - Platte 2: Zugriffszeit 10ms, Datenrate 7,5MByte/s
 - Platte 3: Zugriffszeit 8ms, Datenrate 8MByte/s
-
- **Bedienzeiten:** $X_i = t_{\text{Zugriff}} + t_{\text{Übertragung}}$

$$X_1 = 12ms + \frac{100kB}{6000kB/s} = 28,67ms$$

$$X_2 = 10ms + \frac{100kB}{7500kB/s} = 23,33ms$$

$$X_3 = 8ms + \frac{100kB}{8000kB/s} = 20,5ms$$

- Wie groß sind die Durchsätze D_i der einzelnen Festplatten?
Welche Festplatten wären aufgrund der Berechnung im System einsetzbar?

- Wie groß sind die Durchsätze D_i der einzelnen Festplatten?
Welche Festplatten wären aufgrund der Berechnung im System einsetzbar?
- **Maximaler Durchsatz:** $D_{imax} = \frac{1}{X_i}$

- Wie groß sind die Durchsätze D_i der einzelnen Festplatten?
Welche Festplatten wären aufgrund der Berechnung im System einsetzbar?
- **Maximaler Durchsatz:** $D_{imax} = \frac{1}{X_i}$

$$D_{1max} = \frac{1}{28,67ms} = 34,88/s$$

$$D_{2max} = \frac{1}{23,33ms} = 42,86/s$$

$$D_{3max} = \frac{1}{20,5ms} = 48,78/s$$

- Wie groß sind die Durchsätze D_i der einzelnen Festplatten?
Welche Festplatten wären aufgrund der Berechnung im System einsetzbar?
- **Maximaler Durchsatz:** $D_{imax} = \frac{1}{X_i}$

$$D_{1max} = \frac{1}{28,67ms} = 34,88/s$$

$$D_{2max} = \frac{1}{23,33ms} = 42,86/s$$

$$D_{3max} = \frac{1}{20,5ms} = 48,78/s$$

Nur Platten mit $D_{max} > A$ können eingesetzt werden, da sonst die Festplatte nicht genügend Zeit hat, um alle Aufträge rechtzeitig zu bedienen.

Aufgrund von $A = 40/s$ sind somit nur die Platten 2 und 3 einsetzbar.

- Wie groß ist die Auslastung der einsetzbaren Festplatten?

- Wie groß ist die Auslastung der einsetzbaren Festplatten?
- **Auslastung:** $U_i = D/D_{imax} = D * X_i$, hier $D = A$

- Wie groß ist die Auslastung der einsetzbaren Festplatten?
- **Auslastung:** $U_i = D/D_{imax} = D * X_i$, hier $D = A$

$$U_2 = D * X_2 = 40/s * 23,33ms = 0,93,$$

d.h. 93% Auslastung

$$U_3 = D * X_3 = 40/s * 20,5ms = 0,85,$$

d.h. 85% Auslastung

- Das Betriebssystem stelle eine FIFO-basierte Warteschlange zur Verfügung. Mit einem Monitor wurden im Betrieb hierzu ermittelt, dass die Warteschlange Q_2 von Festplatte 2 drei Aufträge umfasst, Q_3 von Festplatte 3 fasse zwei Aufträge. Berechnen Sie die Zeit der Aufträge in der Warteschlange und die Reaktionszeit des Gesamtsystems aus Warteschlange und Festplatte.

- Das Betriebssystem stelle eine FIFO-basierte Warteschlange zur Verfügung. Mit einem Monitor wurden im Betrieb hierzu ermittelt, dass die Warteschlange Q_2 von Festplatte 2 drei Aufträge umfasst, Q_3 von Festplatte 3 fasse zwei Aufträge. Berechnen Sie die Zeit der Aufträge in der Warteschlange und die Reaktionszeit des Gesamtsystems aus Warteschlange und Festplatte.
- **Gesetz von Little:** $Q = W * D$

Q: Anzahl von Aufträgen in der Warteschlange

W: Wartezeit

D: Durchsatz

- **Gesetz von Little:** $Q = W * D$

Q: Anzahl von Aufträgen in der Warteschlange

W: Wartezeit

D: Durchsatz

d.h. $W_i = \frac{Q_i}{D}$, wobei abermals gilt $D = A$ und somit

$$W_2 = \frac{Q_2}{D} = \frac{3}{40/s} = 75ms$$

$$W_3 = \frac{Q_3}{D} = \frac{2}{40/s} = 50ms$$

Fragen?